МОЛОДЁЖЬ И НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Часть 1

Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, 06-10 апреля 2026 г.

Комсомольск-на-Амуре
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

МОЛОДЕЖЬ И НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Часть 1

Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции
молодых учёных
Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2026 г.

Комсомольск-на-Амуре
2026

УДК 001
ББК 95.4
М754

Рецензент – Козин Виктор Михайлович,
главный научный сотрудник Института
машиноведения и металлургии, ХФИЦ ДВО РАН,
д-р техн. наук, профессор

Редакционная коллегия:
Ответственный редактор – и. о. проректора по НР,
д-р техн. наук, проф. А. В. Космынин;
технический секретарь – Н. А. Жалдак

М754 **Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований** : материалы IX Всероссийской нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2026 г. : в 4 ч. / А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2026. – Ч. 1. – 533 с.

ISBN 978-5-7765-1624-5 (Ч. 1)
ISBN 978-5-7765-1623-8

Материалы сборника посвящены актуальным проблемам развития науки и техники. Приводимые материалы могут быть полезны преподавателям вузов, руководителям предприятий, а также студентам и аспирантам.

Материалы публикуются в авторской редакции. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

УДК 001
ББК 95.4

ISBN 978-5-7765-1624-5 (Ч. 1)
ISBN 978-5-7765-1623-8

© ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2026

СЕКЦИЯ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.791.17:621.9
Барановский Степан Романович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Baranovsky Stepan Romanovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Григорьев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Grigorev Vladimir Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor Department of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ФРЕЗЕРОВАНИЯ К СЕЛЕКТИВНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПЛАВЛЕНИЮ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95
ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF TRANSITION FROM MILLING TO SELECTIVE LASER MELTING IN THE MANUFACTURE OF PARTS FROM HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY V95

Аннотация. Выполнен анализ целесообразности перехода от фрезерования к селективному лазерному плавлению (СЛП) при изготовлении деталей из высокопрочного алюминиевого сплава В95 (аналог 7075) для авиационной техники. Показано, что коэффициент использования материала при фрезеровании не превышает 0,44-0,70, а при СЛП достигает 0,87-0,95. Применение бионического дизайна позволяет дополнительно снизить массу деталей на 7-16%. Рассмотрены технологические ограничения сплава В95 (испарение цинка, склонность к горячим трещинам) и предложены режимы СЛП, минимизирующие дефекты.
Abstract. The analysis of feasibility of replacing milling with selective laser melting (SLM) for parts made of high-strength aluminum alloy V95 (analogue of 7075) for aerospace applications is carried out. It is shown that the material utilization factor for milling does not exceed 0,44-0,70, while for SLM it reaches 0,87-0,95. Bionic redesign allows additional weight reduction of parts by 7–16 %. Technological limitations of V95 alloy (zinc evaporation, hot cracking tendency) are considered, and SLM parameters minimizing defects are proposed.
Ключевые слова: селективное лазерное плавление, высокопрочный алюминиевый сплав, В95, фрезерование, коэффициент использования материала, бионический дизайн.
Key words: selective laser melting, high-strength aluminum alloy, V95, milling, material utilization factor, bionic design.

Введение

В авиационном и автомобильном машиностроении ключевыми требованиями к деталям остаются снижение массы и повышение прочности. Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu (российский сплав В95, международный аналог 7075) обладают высокой удельной прочностью ($\sigma_в$ до 550-700 МПа) [1]. Однако традиционная технология фрезерования из плиты или поковки приводит к низкому коэффициенту использования материала (КИМ): по данным действующего производства для типовых деталей (основание, носок, рельс, узел стыковой, кронштейн, шкворневой узел) КИМ составляет от 0,23 до 0,70. При этом до 77% материала уходит в стружку. Кроме того, сложная геометрия конструкций (внутренние полости, тонкие стенки, криволинейные поверхности) при фрезеровании требуют многооперационной обработки, специальной оснастки и длительного машинного времени.

Технология селективного лазерного плавления позволяет изготавливать детали послойным сплавлением металлического порошка (рис. 1), обеспечивая КИМ до 95% и возможность реализации бионического дизайна для снижения массы [2]. Однако для сплавов серии 7ххх ключевой проблемой является испарение цинка (температура кипения 907°С) при

локальном нагреве лазером, что приводит к изменению химического состава, пористости и образованию микротрещин [3].

Цель настоящей работы – обоснование технологической возможности перехода от фрезерования к СЛП при изготовлении деталей из сплава В95.

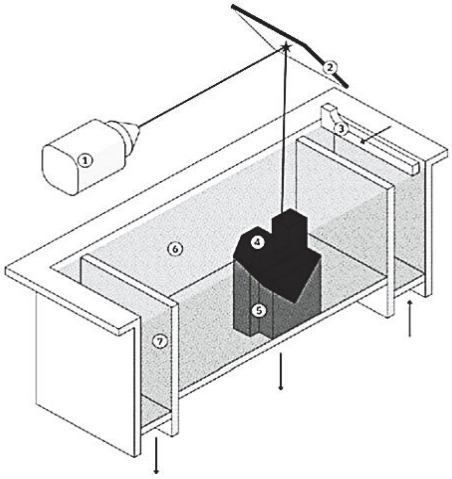


Рис. 1. Схема процесса СЛП:
1 – лазер; 2 – система сканирующих зеркал; 3 – ракель (рекуотер); 4 – деталь; 5 – поддержки; 6 – металлический порошок; 7 – пересыпной бункер

Сравнительный анализ технологий

На основе данных технологических карт действующего механообрабатывающего производства выполнен анализ шести деталей, изготавливаемых из плит и поковок сплава В95. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ двух технологий изготовления деталей

Деталь	КИМ (фрезерование)	КИМ (СЛП, свежий порошок)	КИМ (СЛП с рециклингом)	Снижение массы, %	Тфр, мин	Тслп, мин
Основание	0,23	0,87	0,95	7	45,21	1500
Носок 2	0,44	0,87	0,95	10	46,29	1150
Рельс	0,62	0,87	0,95	11	99,26	4200
Узел стыковой	0,33	0,87	0,95	12	365,78	4350
Кронштейн 1	0,70	0,87	0,95	14	249,80	6650
Шкворневой узел передний	0,34	0,87	0,95	16	591,13	8950

Применение СЛП позволяет увеличить КИМ в 1,2-3,8 раза. При организации рециклинга несплавленного порошка КИМ достигает 0,95 [4]. Дополнительное снижение массы на 7-16 % достигается за счет бионического дизайна (топологической оптимизации), что особенно важно для конструкции летательного аппарата (рис. 2).

Время построения деталей методом СЛП (например, для шкворневого узла – 8950 мин) значительно превышает машинное время фрезерования (591 мин). Однако это увеличение компенсируется отсутствием сложной технологической оснастки, возможностью изготовления деталей с внутренними полостями и сокращением цикла технологической подготовки производства [5].

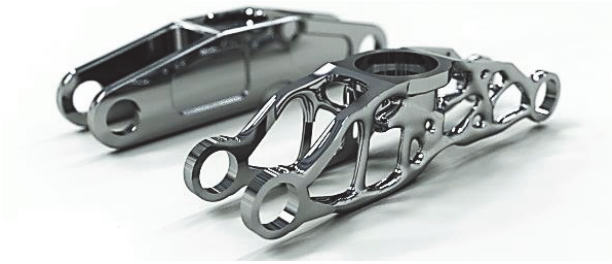


Рис. 2. Кронштейн, изготовленный методом СЛП с применением бионического дизайна

Технологические ограничения сплава В95 и режимы СЛП

Высокопрочные сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu склонны к горячему растрескиванию при быстрой кристаллизации, характерной для СЛП. Основная причина – испарение цинка (Ткип = 907°С) из зоны лазерного воздействия. В работе [3] показано, что после СЛП содержание цинка в сплаве 7075 снижается с 5,9 % до 4,15 %. Для минимизации дефектов по методике [2] выбирается толщина слоя L из условия Lк < L < Lк + Lп, где $L_к$ = 40 мкм – зона кипения, $L_п$ = 60 мкм – зона плавления.

Предлагаются следующие режимы СЛП применительно к установке М-450-L (рис. 3):

- мощность лазера – 350-400 Вт;
- скорость сканирования – 600-800 мм/с [6];
- толщина слоя – 40-50 мкм;
- шаг сканирования – 90-100 мкм;
- стратегия сканирования – шахматная с поворотом на 67°;
- подогрев платформы – 180-200 °С;
- защитная атмосфера – аргон.



Рис. 3. Промышленная установка селективного лазерного плавления М-450-L

Указанные режимы позволяют получить плотность материала не менее 99,9 % и минимизировать потерю цинка, что в свою очередь также позволяет исключить образование дефектов в виде пор и трещин.

Заключение

Технология селективного лазерного плавления позволяет увеличить коэффициент использования материала с 0,23-0,70 (фрезерование) до 0,87-0,95, а с учетом рециклинга – до 0,95, что дает многократную экономию дорогостоящего алюминиевого сплава.

Бионическая оптимизация деталей обеспечивает снижение массы на 7-16 % при сохранении прочностных характеристик, что критически важно для авиационных силовых элементов.

Предложенные режимы СЛП (толщина слоя 40-50 мкм, мощность 350-400 Вт, скорость сканирования 600-800 мм/с и применение шахматной стратегии) минимизируют дефекты, связанные с испарением цинка и горячим растрескиванием.

Несмотря на более высокое машинное время по сравнению с фрезерованием, СЛП является технологически оправданным для сложных малосерийных деталей, особенно при необходимости создания внутренних полостей и решетчатых структур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сенаторова, О. Г., Антипов, В. В., Бронз, А. В., Сомов, А. В., Серебренникова, Н. Ю. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al–Zn–Mg–Cu, их роль в технике и возможности развития / О. Г. Сенаторова, В. В. Антипов, А. В. Бронз, А. В. Сомов, Н. Ю. Серебренникова // Технология легких сплавов. – 2016. – № 2. – С. 43–49.

2. Изготовление изделий методом селективного лазерного плавления из порошков высокопрочных алюминиевых сплавов / Ф. Бертран, Р. Р. Аблеева, Т. В. Тарасова, И. А. Мовчан // Вестник МГТУ «Станкин». – 2017. – № 1(40). – С. 15–20.

3. Разносчиков, А. С. Конструкторско-технологическая подготовка процесса селективного лазерного плавления корпусных деталей / А. С. Разносчиков, А. В. Жданов, Л. В. Беляев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 12. – С. 246–250.

4. Oko, O. E. Experimental investigation of the effect of processing parameters on densification, microstructure and hardness of selective laser melted 7075 aluminium alloy / O. E. Oko, C. Mbakaan, E. Barki // Materials Research Express. – 2020. – Vol. 7, No. 3. – P. 036512. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab7c25.

5. Исследование влияния моды лазерного излучения на геометрические особенности единичных треков при селективном лазерном плавлении / П. Ю. Перетягин, И. В. Жирнов, Ю. Г. Владимиров [и др.] // СТИН. – 2014. – № 12. – С. 32–35.

6. Zhao, Z. Numerical simulation and experimental study of the 7075 aluminum alloy during selective laser melting / Z. Zhao, J. Wang, W. Du, et al. // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 167. – P. 109814. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109814.

УДК 66.071.51

Булыгин Александр Александрович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bulygin Alexander Alexandrovich, student Komsomolsk-na-Amure State University

Кравченко Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Elena Genadyevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ ТОПЛИВНОГО ГАЗА ОТ СЕРОВОДОРОДА
ANALYSIS OF METHODS FOR PURIFYING FUEL GAS FROM HYDROGEN SULFIDE

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ современных методов очистки топливного газа от сероводорода (H_2S), рассмотрены их технологические особенности, преимущества и недостатки. Особое внимание уделено химическим методам, таким как абсорбция аминами и щелочная очистка, а также окислительным процессам, включая каталитическое окисление и озонолиз. Описаны физико-химические и комбинированные подходы, в том числе отдувка инертными газами и использование химических поглотителей. Приведены критерии выбора оптимального метода в зависимости от концентрации сероводорода, требуемой степени очистки, экономической эффективности и экологических требований. Сделан вывод о перспективности комбинированных схем очистки для повышения качества топлива и минимизации воздействия на окружающую среду.

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of modern methods for purifying fuel gas from hydrogen sulfide (H_2S), their technological features, advantages and disadvantages are considered. Particular attention is paid to chemical methods such as amine absorption and alkaline purification, as well as oxidative processes including catalytic oxidation and ozonolysis. Physicochemical and combined approaches are described, including purging with inert gases and the use of chemical absorbers. Criteria for choosing the optimal method are given depending on the concentration of hydrogen sulfide, the required degree of purification, economic efficiency and environmental re-

quirements. It was concluded that combined purification schemes are feasible to improve fuel quality and minimize environmental impact.
Ключевые слова: очистка, топливный газ, сероводород, абсорбер, аминовый раствор.
Key words: cleaning, fuel gas, hydrogen sulfide, absorber, amine solution.

Введение

Очистка топливного газа от сероводорода (H_2S) является ключевой задачей современной газовой и нефтеперерабатывающей промышленности. Сероводород не только снижает качество топлива, но и вызывает коррозию оборудования, а также представляет серьёзную экологическую угрозу. Проведенный анализ [1-3] показал, что не существует идеального способа очистки топливного газа от сероводорода. В данной статье проводится анализ существующих методов очистки топливного газа от H_2S, рассматриваются их преимущества, недостатки и области применения.

Основные способы очистки

Абсорбция аминами как метод основана на химической абсорбции сероводорода водными растворами аминов, чаще всего моноэтаноламина (МЭА), диэтаноламина (ДЭА) или метилдиэтаноламина (МДЭА). Газовый поток пропускается через абсорбер, где контактирует с аминовым раствором. В результате происходит химическая реакция между H_2S и амином, в ходе которой сероводород связывается с функциональной группой, образуя растворимые сульфиды или гидросульфиды аминов. Очищенный газ выводится из верхней части аппарата, а насыщенный амин направляется на регенерацию. Регенерация осуществляется в десорбере при нагревании до 120 – 170 °C: происходит обратное выделение H_2S, который далее может быть переработан (например, по процессу Клауса до элементарной серы), а восстановленный амин возвращается в цикл.

В качестве преимущества метода можно отметить высокую степень очистки (достигаются нормативные остаточные концентрации H_2S менее 4 мг/м³); масштабность (переработка больших объёмов газа); возможность автоматизации технологии; хорошую избирательность к сероводороду (ключевой аспект для последующей переработки H_2S). К недостаткам можно отнести высокую энергоемкость процесса на стадии регенерации амина; необходимость переработки или утилизации выделенного H_2S; потенциальную опасность окисления (деградации) амина при присутствии в газе кислорода; риск коррозии оборудования при несоблюдении норм эксплуатации.

Таким образом, абсорбция аминами – это самый надёжный и эффективный метод очистки топливного газа от сероводорода в промышленных масштабах. Вопреки большим эксплуатационным затратам, внедрение цифровых технологий и поиск новых прогрессивных формул аминов позволят повысить экологические аспекты и экономическую эффективность метода. В перспективе создание гибридных схем, интегрирующих аминовую очистку с адсорбционными и мембранными способами для достижения высокой надёжности и гибкости.

Щелочная очистка базируется на процессе химической абсорбции сероводорода водными растворами щелочей (например, NaOH, KOH) или их солей. Поток газа проходит через абсорбер, контактируя с раствором щелочи. В результате протекают реакции нейтрализации:

$$H_2S + 2NaOH \rightarrow Na_2S + 2H_2O, \quad H_2S + NaOH \rightarrow NaHS + H_2O, \quad H_2S + Na_2S \rightarrow 2NaHS.$$

В результате сероводород связывается в виде сульфидов или гидросульфидов, а очищенный газ выводится из системы. Насыщенный раствор далее направляется на регенерацию или утилизацию.

В качестве преимущества метода можно отметить простоту технологии и доступность реагентов; высокую скорость абсорбции H_2S; возможность применения для локальной или предварительной очистки газа; экологичность (отсутствие токсичных побочных продуктов при утилизации). К недостаткам можно отнести необходимость утилизации или регенерации отработанных растворов и образование солей, которые могут вызывать засоление сточных вод.

Таким образом, щелочная очистка – это традиционный и экономически выгодный способ удаления сероводорода из топливного газа. Несмотря на определённые ограничения,

данный метод по-прежнему востребован для предварительной и локальной очистки, особенно когда ресурсы ограничены, а проект требует быстрого внедрения. Современные усовершенствования технологических схем, а также интеграция с процессами регенерации и утилизации позволяют повысить как эффективность, так и экологичность щелочной очистки в нынешних условиях.

Каталитическое окисление, по сути метода, заключается в селективном окислении сероводорода кислородом воздуха до элементарной серы с использованием катализаторов, содержащих металлы (такие как никель, молибден, ванадий, хром), нанесённые на оксидные носители, например, оксид алюминия, кремния или алюмосиликаты. Ключевая реакция процесса: $H_2S + ½\ O_2 \rightarrow S + H_2O$. Окисление осуществляется при температуре от 210 до 370 °C и времени контакта 1-5 секунд. Для повышения активности и стабильности катализаторов в их состав могут вводиться дополнительные компоненты, такие как карбид кремния, промотированный графитом или оксидами металлов.

В качестве преимущества метода можно отметить высокую степень очистки (современные каталитические системы обеспечивают остаточное содержание H_2S менее 0,01 %, что соответствует требованиям для использования газа в установках), получение товарной серы, экологичность (метод не сопровождается образованием токсичных отходов, а выделенная сера подлежит утилизации или промышленному использованию) и возможность интеграции (процесс легко встраивается в существующие схемы газоочистки). К недостаткам можно отнести необходимость строгого контроля температуры, давления и соотношения кислород/сероводород, а также высокую стоимость катализаторов и потенциальную вероятность образования аэрозольной серы, приводящую к необходимости введения дополнительных этапов очистки.

Таким образом, каталитическое окисление – это современный, экологически безопасный и высокоэффективный способ очистки топливного газа от сероводорода. Метод обеспечивает глубокую десульфуризацию и позволяет получать товарную серу, что делает его экономически выгодным для крупных промышленных предприятий. Постоянное совершенствование катализаторов и оптимизация технологических схем способствуют дальнейшему развитию этого направления в условиях ужесточения экологических требований.

Озонолиз базируется на селективном окислении сероводорода озоном до получения диоксида серы и воды по приведенной реакции: $H_2S + O_3 \rightarrow SO_2 + H_2O$. Высокую селективность процесса обеспечивает повышенное значение константы скорости этой реакции – значительно выше, чем для большинства других компонентов топливного газа. Озон вводится в поток газа или жидкого топлива в виде озонированного воздуха, где происходит быстрое и практически полное окисление H_2S. Образующийся SO_2 далее может быть нейтрализован или переработан.

В качестве преимущества метода можно отметить высокую эффективность (глубокая очистки при низких концентрациях сероводорода), отсутствие катализаторов и высоких температур, экологичность (отсутствие токсичных органических отходов, а продукты реакции могут быть утилизированы или использованы в промышленности) и возможность интеграции в существующие схемы газоочистки. К недостаткам можно отнести высокие затраты на производство озона, необходимость нейтрализации диоксида и сложность оборудования (для реализации процесса необходимы озонаторы, системы сепарации и контроля состава газа).

Таким образом, озонолиз – перспективный и экологически безопасный метод очистки топливного газа от сероводорода. Он обеспечивает высокую степень десульфуризации, не требует катализаторов и высоких температур, а также позволяет получать ценные побочные продукты. Совершенствование оборудования и снижение стоимости генерации озона способствуют расширению применения этого метода в промышленности.

Отдувка инертными газами и углеводородными парами, как *м*етод, основана на продувке сероводородсодержащего газа инертными газами (например, азотом) или углеводородными парами. В результате массообмена сероводород и лёгкие меркаптаны переходят из жидкой или газовой фазы в поток отдувочного агента, после чего удаляются из системы. Та-

кой подход позволяет снизить концентрацию сернистых соединений в топливном газе без использования сложных химических реагентов.

В качестве преимущества метода можно отметить простоту технологического оформления и доступность реагентов, возможность применения для локальной или предварительной очистки газа, а также отсутствие необходимости в сложной химической регенерации поглотителей и экологичность. К недостаткам можно отнести неглубокую очистку по сравнению с аминовыми или каталитическими процессами, необходимость последующей доочистки для достижения нормативных показателей по H_2S и потери углеводородов при использовании углеводородных паров в качестве отдувочного агента.

Таким образом, отдувка – проверенный временем и экономически доступный метод удаления сероводорода из топливного газа. Несмотря на ряд ограничений, метод остаётся востребованным для предварительной и локальной очистки, особенно в условиях ограниченных ресурсов и необходимости быстрой реализации проекта. Совершенствование технологических схем и интеграция с процессами регенерации и утилизации позволяют повысить эффективность и экологичность этого метода в современных условиях.

Использование химических поглотителей – твёрдых или жидких веществ, которые необратимо или обратимо связывают сероводород в результате химических реакций – в основном механизме основано на хемосорбции, при которой H_2S взаимодействует с активной поверхностью поглотителя с образованием сульфидов: $MeO + H_2S \rightarrow MeS + H_2O$, где Me – металл. Наиболее широко применяются поглотители на основе оксидов цинка, меди, железа, а также их композиты и нанесённые системы. В некоторых случаях применяются катализаторы-хемосорбенты, которые не только связывают сероводород, но и ускоряют его последующее превращение, например, гидрогенолиз или окисление до элементарной серы.

В качестве преимущества метода можно отметить возможность обработки больших объёмов газа, высокая степень очистки (остаточное содержание H_2S составляет менее 1 мг/м³), длительный срок службы поглотителей (при правильной эксплуатации сохраняют эффективность десятки лет) и экологичность (возможность регенерации некоторых систем, отсутствие токсичных отходов). К недостаткам можно отнести высокую стоимость некоторых поглотителей (особенно на основе благородных металлов), необходимость замены или регенерации после насыщения, чувствительность к влаге и другим примесям (например, CO_2), а для некоторых систем требуется предварительное восстановление или специальная подготовка газа.

Таким образом, применение химических поглотителей – результативный и универсальный способ очистки топливного газа от сероводорода. Развитие новых материалов и технологий позволяет повышать экономическую и экологическую эффективность процесса, что важно в условиях ужесточения стандартов качества топлива и охраны окружающей среды.

Заключение

Анализ показывает, что универсального метода очистки топливного газа от сероводорода не существует. Выбор технологии зависит от конкретных условий эксплуатации, состава газа и концентрации в нем H_2S, от требуемой степени очистки, экономической эффективности, экологических требований и возможности утилизации побочных продуктов. Наиболее перспективны комбинированные схемы, сочетающие абсорбцию, каталитическое окисление и современные химические методы. Применение современных технологий очистки позволяет не только повысить качество топлива, но и существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исмагилов, Ф. Р. Технологии сбора, подготовки и очистки природных и попутных сернистых газов / Ф. Р. Исмагилов, Р. М. Ахмадуллин. – Старый Оскол: ООО "Тонкие наукоемкие технологии", 2026. – 540 с. – EDN ZPZTVV.

2. Очистка газов разложения от сероводорода на установках атмосферно-вакуумной или вакуумной перегонки нефти / Т. Х. Рахимов, Г. Н. Латыпова, К. Г. Абдульминев, И. А. Мнушкин // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 100-105. – EDN ZIAWGX.

3. Литвяков, И. С. Очистка топливного углеводородного газа от сероводорода для предотвращения коррозии электрогенераторных установок на объектах нефтегазодобычи / И. С. Литвяков, Э. Г. Теляшев // Мир нефтепродуктов. – 2025. – № 5. – С. 26-33. – DOI 10.32758/2782-3040-2025-0-5-26-33. – EDN HBLSVI.

УДК 539.371
Великанов Виктор Александрович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Velikanov Viktor Aleksandrovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Иванюта Ярослав Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Ivanyuta Yaroslav Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Солецкий Вячеслав Вадимович, инженер-технолог, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Soleckiy Vyacheslav Vadimovich, engineer-technologist, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУЗА
ANALYSIS OF LABORATORY TESTS OF A PROTOTYPE VERTICAL LOAD STABILIZATION SYSTEM

Аннотация. В статье приведены лабораторные испытания, нацеленные на определение величины продольного перемещения узлов системы стабилизации груза и искривления её подвижной рамы под действием весовой нагрузки переносимого груза. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить допустимые деформации и какие пиковые нагрузки может выдержать физический образец системы стабилизации груза.
Abstract. The article presents laboratory studies aimed at determining the magnitude of the longitudinal displacement of the nodes of the load stabilization system and the curvature of its movable frame under the influence of the weight load of the transported cargo. The experimental data obtained make it possible to estimate the permissible deformations and what peak loads a physical sample of the load stabilization system can withstand.
Ключевые слова: система стабилизации груза, подвижная рама, неподвижная рама, узлы системы стабилизации груза.
Key words: cargo stabilization system, movable frame, fixed frame, cargo stabilization system components.

Введение

В рамках научно-исследовательской деятельности был разработан опытный образец системы стабилизации груза для уменьшения динамических нагрузок при транспортировке грузов [1]. Данная система спроектирована так, чтобы выдерживать пиковые многократно превышающие нагрузки на срез, изгиб, растяжение и сжатие вдоль типичных и нетипичных векторов узловых нагрузок.

Методика проведения испытаний:

Подвижная рама системы стабилизации (рис. 1) прочно зафиксирована на неподвижной раме по центру буферной зоны путем заклинивания пары скольжения каретка-направляющая. Система стабилизации расположена так, чтобы её верх упирался в основание подвижной станины (рис. 2), при этом неподвижная рама соединена с неподвижной станиной болтовыми соединениями. Испытательная машина (система электромеханическая для испытаний материалов INSTRON-3382) тянет вверх подвижную станину с силой F, которая в свою очередь прикладывает распределенную нагрузку на верхнюю часть подвижной рамы, имитируя усугубленную распределенную весовую нагрузку, возникающую при переносе

груза. Поскольку подвижная рама прочно зафиксирована на неподвижной раме, нагрузка будет приводить к деформации узлов системы стабилизации, искривляя их геометрическую форму, что в свою очередь приведет к перемещению пятна контакта подвижной рамы и подвижной станины [2].

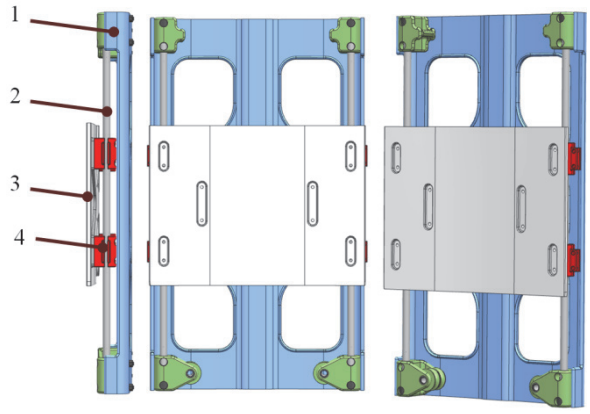


Рис. 1. 3D-модель конструкции системы стабилизации подвергаемой нагрузке: 1 – подвижная рама, 2 – направляющая, 3 – неподвижная рама, 4 – каретки

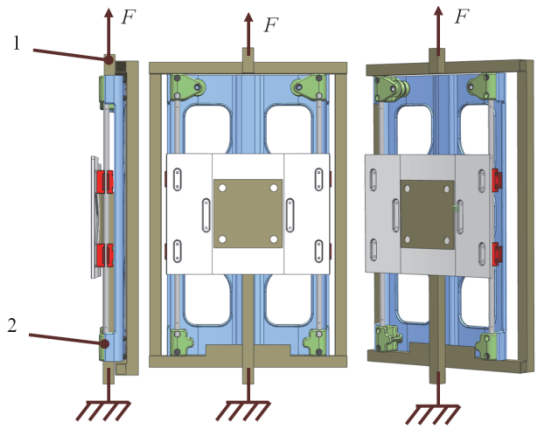


Рис. 2. 3D-модель конструкции системы стабилизации, установленной на станинах, с указанием направления нагружающей силы и расположения жесткой заделки 1 – подвижная станина, 2 – неподвижная станина

Перед началом эксперимента после установки системы стабилизации и станин в экспериментальной машине (рис. 3) проводится устранение зазоров между подвижной станиной и подвижной рамой. Далее устанавливается контрольная рейка параллельная вектору нагрузки, от которой производится измерения расстояний до подвижной рамы в её крайней верхней l_1, крайней нижней l_2 и средней l_3 точках вдоль её высоты H. В течение эксперимента испытательная машина увеличивает нагрузку F от 0 до 600 Н за время T равное 27 с, при этом производит измерения величины продольного перемещения L и нагрузки F с интервалом в 0,1 с (результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 4), после чего останавливается для проведения повторного измерения расстояний до подвижной рамы в крайней верхней l_1, крайней нижней l_2 и средней l_3 точках вдоль её высоты H (результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 5).

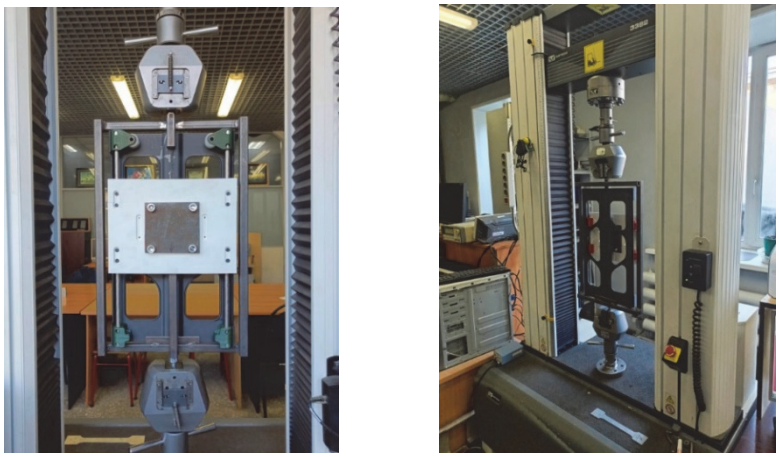


Рис. 3. Фотографии проведения исследования

Результаты

Полученные экспериментальные данные величин продольного перемещения узлов и искривления подвижной рамы системы стабилизации груза под действием весовой нагрузки переносимого груза приведены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Таблица 1

Величина продольного перемещения узлов системы стабилизации груза под действием весовой нагрузки переносимого груза (представленное количество измерений уменьшено в 10 раз)

№	*T*, с	*L*, мм	*F*, кг
1	0	0	0,67716
10	0,9	0,07522	27,2672
20	1,9	0,1585	53,9483
30	2,9	0,24185	77,7865
40	3,9	0,32514	97,6777
50	4,9	0,40848	117,873
60	5,9	0,49183	137,735
70	6,9	0,57517	157,461
80	7,9	0,65852	178,682
90	8,9	0,74187	198,774
100	9,9	0,82521	219,250
110	10,9	0,90856	242,725
120	11,9	0,99185	261,232
130	12,9	1,07525	285,665

№	*T*, с	*L*, мм	*F*, кг
140	13,9	1,15854	306,280
150	14,9	1,24189	326,909
160	15,9	1,32517	344,026
170	16,9	1,40852	365,022
180	17,9	1,49187	386,024
190	18,9	1,57515	407,520
200	19,9	1,65844	429,821
210	20,9	1,74179	449,325
220	21,9	1,82513	471,000
230	22,9	1,90842	494,106
240	23,9	1,99183	518,232
250	24,9	2,07517	542,213
260	25,9	2,15852	570,025
270	26,9	2,24181	597,926

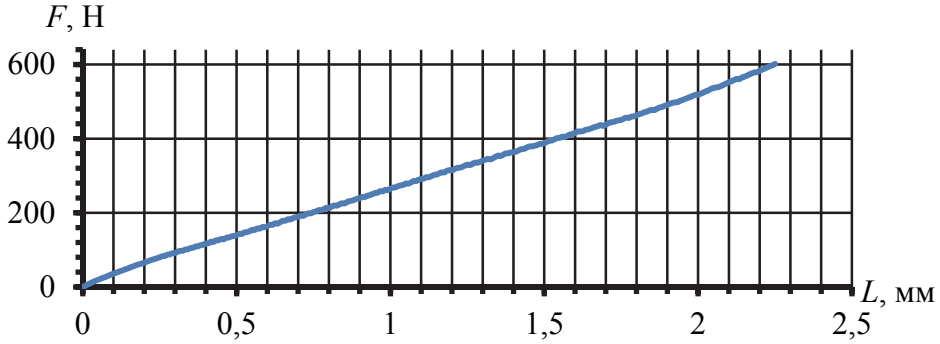


Рис. 4. График зависимости продольного перемещения L от нагрузки F

Таблица 2

Величина искривления подвижной рамы системы стабилизации груза под действием весовой нагрузки переносимого груза.

Наименование	l_1, мм	l_2, мм	l_3, мм
до эксперимента	53,07	58,36	60,13
после эксперимента	47,61	56,77	60,07
величина кривизны	5,46	1,59	0,06

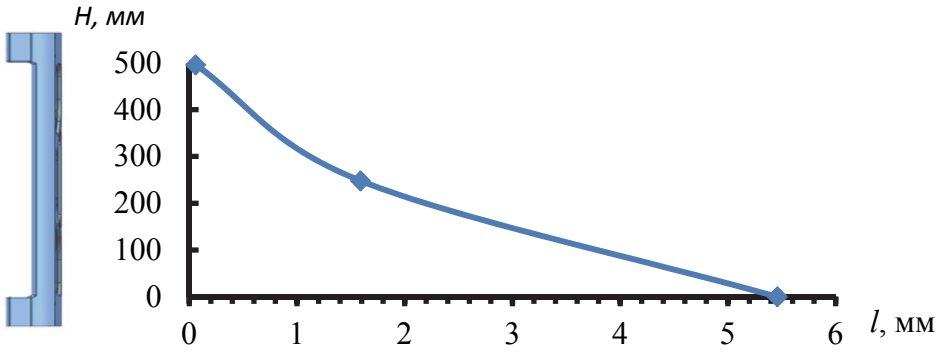


Рис. 5. График искривления подвижной рамы при нагрузке F = 600Н

Заключение

По результатам проведённых испытаний установлены:

- зависимость продольного перемещения узлов системы стабилизации груза от весовой нагрузки переносимого груза вплоть до нагрузки, превышающей в 2 раза максимально допустимую при использовании рюкзака с системой стабилизации груза.
- величины искривления подвижной рамы системы стабилизации груза под действием весовой нагрузки, превышающей в 2 раза максимально допустимую при использовании рюкзака с системой стабилизации груза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент на полезную модель № 232790 U1 Российская Федерация, МПК A45F 3/08, A45C 5/00. Устройство для снижения динамических нагрузок при переносе грузов : № 2024113379 : заявл. 16.05.2024 : опубл. 20.03.2025 / В.В. Солецкий, И.А. Петренко, М.С. Гринкруг ; заявитель В.В. Солецкий.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие. В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев – Санкт-Петербург : Лань, 2006. – 350 с.

УДК 629.5.02:678.067

Гнатив Денис Михайлович, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И.Невельского

Denis Mikhailovich Gnativ, student, Admiral Nevelskoy Maritime State University

Комаров Артём Сергеевич, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И.Невельского

Komarov Artem Sergeevich, student, Admiral G.I.Nevelsky Maritime State University

Арестов Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского

Arestov Oleg Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair Technology and Organization, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРОВ И ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ГРАЖДАНСКОМ СУДОСТРОЕНИИ
RESEARCH OF BARRIERS AND PROSPECTS FOR USING POLYMER COMPOSITES IN CIVIL SHIPBUILDING

Аннотация. В статье анализируется переход от лабораторных и опытно-конструкторских работ к серийному применению полимерных композиционных материалов в российском гражданском судостроении на фоне мирового опыта. В качестве эталонных примеров рассмотрены полностью композитные корветы типа Visby ВМС Швеции, а также результаты европейского проекта RAMSSES по демонстрации полноразмерных композитных секций корпусов длиной до 85 м. На основе анализа действующей нормативной базы РМРС и «Стратегии развития судостроительной промышленности до 2035 года» выявлены основные барьеры.

Abstract. The article analyzes the transition from laboratory and experimental design work to the mass application of polymer composite materials in Russian civilian shipbuilding, taking into account global experience. As reference examples, it considers the fully composite Visby-class corvettes of the Swedish Navy, as well as the results of the European RAMSSES project, which demonstrated full-size composite hull sections up to 85 m in length. Based on an analysis of the current regulatory framework of the Russian Maritime Register of Shipping and the "Strategy for the Development of the Shipbuilding Industry until 2035," the main barriers have been identified.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; гражданское судостроение; композитные корпуса судов; проект RAMSSES; корветы Visby; стратегия судостроения РФ; нормативные барьеры.
Key words: polymer composite materials; civil shipbuilding; composite ship hulls; RAMSSES project; Visby corvettes; Russian shipbuilding strategy; regulatory barriers.

Введение

В последние десятилетия полимерные композиционные материалы (ПКМ) из разряда нишевых решений для маломерных судов перешли в категорию ключевых технологий, определяющих конкурентоспособность морской техники по массе, энергоэффективности и эксплуатационным расходам. Мировая практика показала, что использование стекло- и углепластиков в корпусах и надстройках позволяет снижать массу конструкций до 40–50 % по сравнению со стальными аналогами, что даёт судовладельцу выигрыш в грузоподъёмности, скорости или запасах топлива. В России композиты традиционно применялись в маломерном и военном судостроении, однако принятая «Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года и дальнейшую перспективу» прямо выделяет композиционные материалы в перечне приоритетных судостроительных материалов наряду с высокопрочными сталями и специальными покрытиями.

Мировой опыт: от корветов Visby к проекту RAMSSES

Одним из наиболее известных примеров применения ПКМ в крупном военном кораблестроении стала серия шведских корветов класса Visby. Корпус и надстройка этих кораблей выполнены полностью из углепластикового сэндвича, что позволило при длине порядка 72–73 м обеспечить полное водоизмещение около 650 т - минимум на 50% меньше, чем у стального корабля сопоставимых габаритов. Снижение массы конструкции позволило высвободить запас по водоизмещению под полезную нагрузку; фактически композитная архитектура дала возможность при том же тоннаже разместить больше вооружения и оборудования, что критично для корабля прибрежной зоны. Одновременно уменьшение массы привело к снижению сопротивления движению и расхода топлива, а также к меньшему износу движительно-рулевых комплексов, что положительно сказалось на жизненном цикле кораблей [1].



Рис. 1. Корвет Visby полностью композитный углепластиковый корпус и надстройка, длина 72-73 м, полное водоизмещение около 650 т.

Если Visby демонстрирует потенциал композитов в военном сегменте, то европейский проект RAMSSES (Realisation and Demonstration of Advanced Material Solutions for Sustainable and Efficient Ships) нацелен на масштабирование этих решений в гражданском судостроении. В рамках RAMSSES на верфи Damen Schelde Naval Shipbuilding был изготовлен и продемонстрирован полноразмерный 6-метровый по высоте демонстрационный участок корпуса крупного оффшорного судна из стеклопластиковых и углепластиковых конструкций, спроектированный с прицелом на применение в корпусах судов длиной до 85 м при соблюдении требований SOLAS и правил классификационного общества Bureau Veritas.

Существенным барьером, который RAMSSES стремится преодолеть, являются нормативные ограничения: действующие международные правила в области пожарной безопасности и прочности конструкций долгое время фактически допускали широкое использование

композитов лишь на судах водоизмещением до 500 т и длиной примерно до 25 м, что ограничивало их применение в крупнотоннажном флоте. Проект работает в тесном взаимодействии с классификационными обществами и исследовательскими институтами (RISE, Bureau Veritas, нидерландские и шведские организации) над формированием «быстрого пути одобрения» (fast track to approval) для крупногабаритных композитных конструкций, включая толстые ламинированные панели высотой до 6 м [2,3].

Состояние применения полимерных композитов в России

Российская нормативная база в части ПКМ в судостроении за последние годы претерпела заметную эволюцию. Российский морской регистр судоходства (РМРС) выделил специальный раздел XVI «Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов» в Правилах классификации и постройки морских судов, регламентирующий выбор материалов, методы расчёта и испытаний композитных конструкций. Современная версия правил допускает использование однослойных и трёхслойных ПКМ на основе стеклянных, углеродных и арамидных волокон с термореактивными связующими (полиэфирные, винилэфирные и эпоксидные смолы) для различных элементов корпуса и надстройки.

В гражданском судостроении Россия уже освоила серийный выпуск промысловых судов из композитов длиной порядка 12–25 м; ведётся разработка проектов более крупных рыболовных и служебных судов длиной 33–35 м, а также специализированных катамаранов, таких как композитный катамаран «Грифон», доведённый до опытной эксплуатации. В лабораториях и опытных производственных участках (например, в Астраханском государственном техническом университете) разрабатываются и испытываются новые составы ПКМ на основе эпоксидных связующих и полимерных нитей для изготовления листовых конструкций толщиной до 5 мм, предназначенных для корпусов и надстроек малых судов. Однако применение композитов в корпусах крупнотоннажных гражданских судов (танкеры, газовозы, крупные пассажирские суда) пока ограничивается отдельными элементами и не носит системного характера. Основная масса крупных корпусов, особенно ледового класса, по-прежнему строится из стали и высокопрочных сплавов, а композиты используются в надстройках, элементах корпусного насыщения, гребных винтах и трубопроводах систем охлаждения, где они позволяют снизить массу и повысить коррозионную стойкость.

Технологические и экономические ограничения

С технологической точки зрения полимерные композиты предъявляют иные требования к производству, чем традиционные стальные корпуса. При формовании крупногабаритных элементов требуется строго контролировать влажность и температуру, полностью удалять воздух при вакуумной инфузии и обеспечивать полное отверждение смолы - иначе повышается риск пористости, водопоглощения и преждевременного развития осмоса. Российские рекомендации по формованию стеклопластиковых корпусов указывают на необходимость применения качественного гелькоута толщиной не менее 0,6 мм, использования под ватерлинией только белого или прозрачного гелькоута и формирования барьерного слоя из материалов с пониженным водопоглощением.

В ряде проектов отмечается, что присутствие влаги в стеклопластике, даже при отсутствии гидролиза, существенно снижает усталостную прочность, поэтому защита от водопоглощения и контроль технологической дисциплины становятся критическим фактором долговечности корпуса.

Экономические барьеры связаны с высокой стоимостью высококачественных армирующих наполнителей (углеродное волокно, высокомодульное стекловолокно), смол и оснастки для крупногабаритных инфузионных форм, а также с относительно низкой степенью локализации производства материалов и полуфабрикатов в России. В существующих условиях санкционного давления и необходимости импортозамещения судостроительная отрасль вынуждена одновременно разворачивать производство судов и формировать новую сырьевую и технологическую базу для ПКМ, что ограничивает скорость их внедрения.

С другой стороны, анализ зарубежных проектов показывает, что при тиражировании композитных решений в серии (например, типовые рыболовные суда или оффшорные сер-

висные суда длиной до 85 м) удельная стоимость корпуса может снижаться за счёт сокращения трудоёмкости сборки, уменьшения объёма сварочных и антикоррозионных работ и снижения эксплуатационных расходов по топливу и ремонту. Это особенно важно в контексте планов России к 2036 году построить более 1600 гражданских судов и морской техники, где при увеличении доли серийности до 50 % экономия даже нескольких процентов затрат на корпус в жизненном цикле даёт значимый совокупный эффект.

Перспективы до 2035 года: возможные траектории развития

С учётом международного опыта и отечественных наработок можно выделить несколько направлений, по которым композиты могут перейти из экспериментальной стадии в устойчивую серийную практику российского гражданского судостроения к 2035 году.

Во-первых, это дальнейшее наращивание длины композитных рыболовных, служебных и пассажирских судов - от освоенных сегодня 12–25 м к диапазону 30–40 м, опираясь на уже ведущиеся разработки корпусов длиной 33–35 м и результаты RAMSSES, демонстрирующие техническую реализуемость композитных судов длиной до 85 м.

Во-вторых, это расширение применения ПКМ в надстройках крупнотоннажных судов и ледоколов, где снижение массы верхней части корпуса позволяет уменьшить метацентрическую высоту, оптимизировать архитектуру и повысить энергоэффективность, не затрагивая при этом стальной ледовый пояс [4].

Третье направление - разработка и внедрение композитных элементов корпусного насыщения и крупногабаритных модулей (перегородки, палубные секции, рулевые устройства, гребные винты, композитные балконные конструкции и пр.), что уже успешно реализуется в рамках европейских и азиатских проектов и может быть адаптировано к российским условиям. При достаточном объёме серийного заказа такие решения позволяют снизить массу надстроек и вспомогательных конструкций на десятки процентов, одновременно уменьшая объём сварочных и малярных работ, что хорошо согласуется с трендом стратегии на укрупнённую блочно-модульную сборку и цифровое моделирование всего жизненного цикла судна.

Для реализации этого потенциала необходим комплекс мер, таких как актуализация нормативно-технической базы с учётом международных наработок по «быстрому пути одобрения» композитных конструкций, создание сети испытательных центров для крупногабаритных ПКМ; развитие отечественного производства армирующих волокон, смол и препрегов, а также подготовка кадров в области расчёта и технологий композитных конструкций. Важную роль играет и государственная поддержка НИОКР и опытно-промышленных проектов. В обновлённой стратегии развития судостроения к 2036 году предусмотрено более 500 млрд руб. федерального финансирования поддержки производителей судов и комплектующих, что создаёт окно возможностей для крупных пилотных проектов по композитам [4].

Заключение

Таким образом, опыт шведских корветов Visby и европейский проект RAMSSES демонстрируют, что технологические и нормативные барьеры для применения полимерных композитов в крупнотоннажном судостроении могут быть преодолены при целенаправленной научно-технической и регуляторной политике, а российская стратегия развития судостроения до 2035–2050 годов, включающая композиционные материалы в число приоритетных, создаёт предпосылки для того, чтобы композиты постепенно заняли своё место не только в лабораториях и военных проектах, но и в серийном гражданском строительстве судов различного назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lindblom J. Use of composites in the Visby class stealth corvette // Proceedings of the 2nd International Conference on Ship and Offshore Technology. – 2003. – P. 1–8. URL: https://www.saab.com/products/visby-class-corvette (дата обращения: 07.03.2026).

2. Saab AB. Visby-class corvette // Saab Official Website. – 2026. – Режим доступа: https://www.saab.com/products/visby-class-corvette (дата обращения: 03.03.2026).

3. RAMSSES Project. Ramsses Project: Realisation and Demonstration of Advanced Material Solutions for Sustainable and Efficient Ships // Официальный сайт проекта RAMSSES. – 2020. – Режим доступа: https://www.ramsses-project.eu (дата обращения: 04.03.2026).
4. Правительство Российской Федерации. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2036 года и на дальнейшую перспективу до 2050 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 28.10.2019 № 2553-р (в ред. от 12.05.2025) // Офиц. интернет-портал правовой информации. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/563615576 (дата обращения: 02.03.2026).

УДК 620.22
Джумаева Шахноз Джасурбоевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Dzhumaeva Shakhnoz Jasurboeva, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Белова Инна Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Belova Inna Valerievna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ
APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN MODERN MATERIALS SCIENCE

Аннотация. В работе анализируется современное состояние внедрения методов искусственного интеллекта (ИИ) в материаловедческую науку. Рассматриваются возможности использования машинного обучения, нейросетевых архитектур и оптимизационных алгоритмов для прогнозирования физико-механических характеристик материалов, ускорения вычислительных экспериментов и автоматизации поиска новых химических соединений. Основное внимание уделено стратегиям цифрового дизайна материалов, комбинированию высокопроизводительных расчётов с алгоритмами ИИ, а также практическим примерам применения указанных подходов для металлических сплавов, полимерных композитов и керамики.
Absrtact. This paper analyzes the current state of artificial intelligence (AI) implementation in materials science. It explores the potential of machine learning, neural network architectures, and optimization algorithms to predict the physical and mechanical properties of materials, accelerate computational experiments, and automate the search for new chemical compounds. The focus is on digital materials design strategies, combining high-performance computing with AI algorithms, and practical examples of applying these approaches to metal alloys, polymer composites, and ceramics.
Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, материаловедение, прогнозирование свойств, нейронные сети, цифровое материаловедение, высокопроизводительные вычисления.
Key words: artificial intelligence, machine learning, materials science, property prediction, neural networks, digital materials science, high-performance computing.

Введение

Современное материаловедение переживает этап активного перехода к цифровым методам работы. Классическая схема разработки новых материалов, включающая синтез, анализ и эмпирический подбор составов, требует значительных ресурсов и занимает в среднем от 10 до 15 лет до момента внедрения в промышленность. В условиях ускорения научно-технологического развития возникает потребность в инструментах, способных существенно сократить этот цикл.

Искусственный интеллект и его составляющие – машинное обучение, глубокое обучение, эволюционные алгоритмы - предоставляют новые подходы для решения центральных задач материаловедения. В отличие от традиционных методов, основанных на первых прин-

ципах (теория функционала плотности), ИИ-методы позволяют обнаруживать сложные нелинейные зависимости между составом, структурой, технологией получения и свойствами материала, используя экспериментальные или расчётные данные, даже когда физическая природа этих связей неизвестна или трудно формализуема. Цель настоящей работы – оценка современного состояния и перспектив использования ИИ в материаловедении, систематизация ключевых направлений их применения и анализ эффективности данных подходов.

Основные направления использования ИИ в материаловедении

На основе анализа научных публикаций последних пяти лет можно выделить три главных направления внедрения ИИ в материаловедческие исследования:

1. предсказание свойств материалов на основе данных о составе и структуре. Наибольшее распространение получили модели, связывающие структуру материала с его свойствами. Ранее для прогнозирования таких параметров, как прочность на разрыв, теплопроводность, электрическая проводимость или устойчивость к коррозии, применялись регрессионные модели, требующие детального понимания физико-химических механизмов. Однако в случае многокомпонентных систем, например, высокоэнтропийных сплавов или сложных полимерных композитов, аналитическое описание становится крайне затруднительным.

В настоящее время активно применяются ансамблевые методы (Random Forest, Gradient Boosting) и нейросетевые подходы. В исследовании [1] показано, что использование градиентного бустинга (XGBoost) для прогнозирования твёрдости высокоэнтропийных сплавов по данным о составе и электронной структуре позволяет достичь точности (R^2>0,92), сравнимой с экспериментальной погрешностью.

Важным преимуществом таких моделей является их интерпретируемость через анализ значимости признаков, что помогает выявлять ключевые легирующие элементы, определяющие итоговые свойства. Для полимерных материалов эффективными оказываются методы глубокого обучения, в частности, графовые нейронные сети (GNN), которые позволяют учитывать топологию мономерных звеньев. Графовое представление молекул даёт возможность моделировать не только локальные взаимодействия, но и глобальные характеристики полимеров, такие как температура стеклования (Tg) и модуль упругости, с погрешностью менее 5 % относительно экспериментальных данных [2].

2. ускорение атомистического моделирования (*молекулярно-динамических и квантово-химических расчётов).* Методы ИИ активно применяются в вычислительном материаловедении для создания высокоточных межатомных потенциалов. Традиционные молекулярно-динамические расчёты ограничены либо точностью эмпирических потенциалов, либо вычислительной сложностью методов DFT. Альтернативой стали потенциалы машинного обучения (MLIP), такие как нейросетевые потенциалы Behler-Parrinello, тензорные потенциалы моментов (MTP) и эквивариантные потенциалы (NequIP).

Обучение таких потенциалов выполняется на наборах данных, полученных из DFT-расчётов для различных атомных конфигураций (деформации решётки, дефекты, поверхности). В результате удаётся достичь точности, сопоставимой с квантово-химическими методами, при вычислительной скорости, близкой к классическим эмпирическим потенциалам. Согласно данным [3], применение MLIP позволяет моделировать диффузию атомов в сплавах на временных масштабах до микросекунд (что недоступно для ab initio MD), сохраняя ошибку в энергии активации в пределах 0,05 эВ.

3. обратный дизайн материалов (автоматизированное конструирование новых материалов с заданными характеристиками). Наиболее сложной и перспективной задачей является автоматизированный синтез материалов с заранее заданными свойствами (обратный дизайн). В отличие от прямого прогнозирования (вход - состав, выход - свойство), обратная задача (вход - желаемое свойство, выход - состав или структура) является некорректной, так как допускает множество возможных решений. Для её решения используются генеративные модели: вариационные автокодировщики (VAE) и генеративно-состязательные сети (GAN), адаптированные для работы с кристаллическими структурами.

Одним из успешных примеров является платформа Materials Project и инструмент GNoME (Graph Networks for Materials Exploration), разработанный DeepMind. Комбинируя графовые нейросети и активное обучение, авторам удалось предсказать стабильность более 2,2 млн новых кристаллических структур, из которых сотни тысяч оказались теоретически стабильны, а десятки были синтезированы экспериментально. Такой подход трансформирует традиционную исследовательскую парадигму: вместо последовательного синтеза и тестирования учёный получает список наиболее перспективных кандидатов, отобранных ИИ по критериям стабильности, возможности синтеза и требуемых свойств.

Проблемы и ограничения

Несмотря на достигнутые успехи, применение ИИ в материаловедении сталкивается с рядом вызовов.

Проблема переносимости. Модели, обученные на ограниченном наборе химических элементов или структурных классов, часто теряют точность при выходе за пределы обучающей выборки. Особенно остро это проявляется для потенциалов машинного обучения, которые могут давать нефизичные результаты в конфигурациях, не встречавшихся в тренировочном наборе.

Недостаток данных о синтезе. Большинство существующих баз данных содержат информацию о равновесных структурах и свойствах, но практически не включают данные о кинетике процессов, условиях синтеза (температурно-временных режимах), что критически важно для перехода от теоретически стабильных структур к реальным технологическим процессам.

Заключение

Методы искусственного интеллекта стали неотъемлемой частью методологического арсенала современного материаловедения, превращая его из эмпирической дисциплины в область, управляемую данными. Наибольшие успехи достигнуты в прогнозировании свойств сложных систем (высокоэнтропийные сплавы, композиты), создании высокоточных межатомных потенциалов для молекулярной динамики и реализации обратного дизайна для поиска новых функциональных материалов.

Проведённый анализ показывает, что интеграция ИИ позволяет сократить цикл «от идеи к прототипу» в среднем на 30–40 %, а в перспективе, с развитием автономных лабораторий и повышением качества баз данных, этот показатель может достичь 60–70 %.

Ключевым условием дальнейшего прогресса является объединение усилий специалистов в области информатики, вычислительной физики и экспериментального материаловедения для создания сквозных цифровых платформ, обеспечивающих полную автоматизацию цепочки от прогноза структуры до масштабируемой технологии синтеза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юров, В. В. Применение искусственного интеллекта в материаловедении / В. В. Юров // Летняя школа молодых ученых : Сборник трудов региональной летней научной конференции Липецкого государственного технического университета, Липецк, 26–29 августа 2024 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2024. – С. 213-217. – EDN RFOFEB.

2. Вырикова, А. Д. Искусственный интеллект и цифровое материаловедение в интересах ОПК РФ / А. Д. Вырикова // Композитный мир. – 2022. – № 1(98). – С. 22-23. – EDN KEEDOV.

3. Плеханов, В. И. Искусственный интеллект как инструмент решения задач материаловедения / В. И. Плеханов // Актуальные вопросы науки 2025 : сборник статей XI Международной научно-практической конференции. В 2 ч., Пенза, 25 ноября 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 34-37. – EDN TVRQOL.

УДК 621.791.927.5
Дмитриев Петр Станиславович, аспирант, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Dmitriev Petr Stanislavovich, Postgraduate student, V. P. Larionov Institute of Physical and Technical problems of the North, SB RAS
Сараев Юрий Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Saraev Yuri Nikolaevich, Doctor of Engineering Sciences, Chief science researcher, V. P. Larionov Institute of Physical and Technical problems of the North, SB RAS

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ
STUDY OF THERMAL CYCLES IN PULSED ARC WELDING

Аннотация. Термический цикл сварки, определяемый параметрами режима и температурой окружающей среды, играет ключевую роль в формировании структуры и механических свойств металла. Зона термического влияния (ЗТВ), в особенности участок перегрева, отличается крупнозернистой структурой и пониженной ударной вязкостью. В рамках решаемых исследовательских задач, предусматриваются выполнение физических экспериментов по регистрации тепловых процессов, их обработке, в том числе построения кривых термических циклов (КТЦ), устанавливающих временные интервалы пребывания свариваемого изделия в области температур структурно фазовых превращений. Экспериментально полученные результаты, планируется применить при создании и исследовании математических моделей, разрабатываемых на основе уравнений теплопроводности, описывающих распространение тепла от импульсно-дугового источника нагрева.
Abstract. The welding thermal cycle, determined by process parameters and ambient temperature, plays a key role in the formation of the metal's structure and mechanical properties. The heat-affected zone (HAZ), particularly the overheating region, is characterized by a coarse-grained structure and reduced impact toughness. Within the framework of the research tasks to be addressed, physical experiments are planned for recording thermal processes and processing the data, including the construction of thermal cycle curves (TCCs) that establish the time intervals during which the welded component remains in the temperature range of structural and phase transformations. The experimentally obtained results are intended to be used in the development and study of mathematical models, based on heat conduction equations, that describe heat propagation from a pulsed arc heating source.
Ключевые слова: термический цикл сварки, импульсно-дуговая сварка, расчетная математическая модель, околошовная зона, осциллограммы.
Key words: welding thermal cycle, pulsed arc welding, computational mathematical model, heat-affected zone, oscillograms.

Введение

Экспериментальные исследования характеристик тепломассопереноса, сопровождающих плавление и кристаллизацию металла шва при импульсной электродуговой сварке, основываются на регистрации основных энергетических параметров режима, их обработке и установлении взаимосвязи с геометрическими размерами шва и теплофизическими показателями технологического процесса (температурой в зоне действия источника нагрева, изменение температуры в металле шва при его перемещении, определении времени пребывания металла в исследуемой зоне в области температур структурно-фазовых превращений) [1]. Для успешного выполнения выше сформулированной задачи требуется, не только разработка методик измерения контролируемых величин, но и применение физико-математической модели, позволяющая увязать энергетические параметры режима с характеристиками тепломассопереноса и геометрическими размерами получаемых неразъемных соединений.

Как показано в работе [2], описывающих результаты исследовании по математическому моделированию импульсной аргонодуговой сварки, ключевым объектом контроля должен быть мгновенный тепловой поток от дуги к изделию, величина которого определяется параметрами импульсов тока. Теоретически именно этот поток, рассчитанный на основе анализа значений тока и напряжения дуги, взятых из экспериментально полученных осциллограмм, является первичным фактором, определяющим форму и размеры сварочной ванны, а следовательно, и геометрию формируемого валика. С учетом данного обстоятельства, корректная методика регистрации характеристик тепломассопереноса, должна включать синхронную фиксацию электрических параметров и последующее термодинамическое моделирование для верификации тепловложения.

Специфика измерений при импульсном воздействии напрямую вытекает из его циклической природы, приводящей к периодическому нагреву и охлаждению металла. В монографии профессора В. А. Кархина [3] подчеркивается, что важнейшим результатом оптимизации импульсного режима является достижение заданной глубины проплавления при минимальном объеме наплавленного металла и ширине шва. Это ставит перед измерением сложную задачу: необходимо не только фиксировать статические итоговые параметры валика (высоту, ширину, площадь), но и оценивать динамику процесса через косвенные признаки. К последним относятся, согласно [3], характер чешуйчатости поверхности шва, напрямую связанный с частотой импульсов, и форма обратной стороны проплавления (для сквозных процессов), что требует применения методов макро- и микроскопического анализа подготовленных срезов.

Материалы и методы

Изучение термических циклов наплавки проводились на низколегированной стали марки 09Г2С. Размеры образцов: пластина 150×140 мм толщиной 8 мм. Наплавку образцов производили электродами марки WN H 6/60. Источником для наплавки модулированным током выбран МАГМА ФЕБ-315 с параметрами, представленными на табл. 1.

Таблица 1

Параметры режимов сварки образцов

Режим сварки	Среднее напряжение, В.	Ток импульса, А	Ток паузы, А	Время импульса, с.	Время паузы, с.
НМ с частотой 1 Гц	25,2	184	60	0,5	0,5
НМ с частотой 2,5 Гц	23,9	170	40	0,4	0,2
НМ с частотой 5 Гц	24,8	180	60	0,2	0,2
НМ с частотой 1,67 Гц	23,9	180	60	0,1	0,1

Основные энергетические параметры (сварочный ток и напряжение дуги) регистрировали с помощью регистратора AWR-224МД.

На рис. 1 представлена принципиальная схема устройства для регистрации термических циклов сварки. Блок-схема состоит из следующих основных компонентов: сглаживающие конденсаторы; микроконтроллер Arduino Nano 3.0; аналогово-цифровой преобразователь ADS1115; резистор; датчик окружающей среды; измерительные термопары.

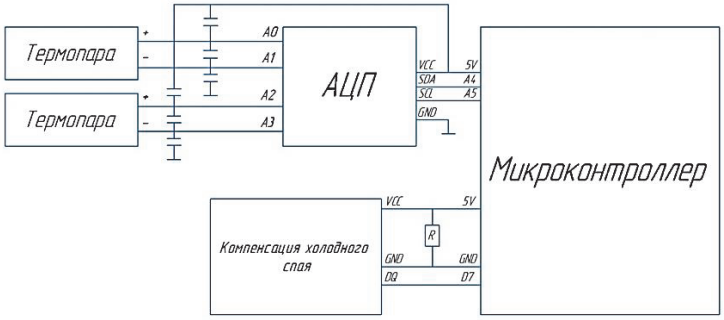


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для измерения термических циклов сварки

Для изучения распространения тепла на пластинах при наплавке использовали термоэлектрические преобразователи (термопары) компании «ОВЕН» марки ДТПК031-1,2/0,5/1 с открытым контактом. Данная марка термопары изготовлена из хромелевой и алюмелевой проволок диаметром 1,2 мм. Применение данных термопар обусловлено их высоким диапазоном рабочих температур (хромель-алюмелевые до +1372 □) [4]. Предварительно перед измерением каждую термопару и собранные устройства тестировали в лабораторной муфельной печи Nabertherm Model L9/11/S27 до 800°С с шагом 100°С. Значения температур и времени выводились на экран и сохранялись в текстовом файле. В каждой пластине устанавливались по 4 термопары с нижней поверхности пластин под корневым швом согласно схеме. Спаи термопар закреплялись в подготовленные сквозные отверстия диаметром 3 мм. Глубины отверстий составляли: 6.5мм, 5.5 мм, 5 мм, 4 мм.

Результаты и их обсуждение

Для обработки полученных значений, потребовалось их извлечение из текстового файла в табличный вариант Excel. Данные были разделены на столбцы по времени, температуре среды процесса, температуры термопары 1, температуры 2 и т.д. Столбец по времени был разделен на 1000, для приведения его значений в соответствии с единицами измерения в секундах в соответствии с системой измерений в системе СИ.

Для иллюстрации графиков было использовано программное обеспечение: Origin Pro – пакет программ фирмы Origin Lab Corporation для численного анализа данных и научной графики (США, 1992 г.). В указанной программе имеется возможность изменения вида и структуры графиков, добавления заметок, исключения или добавления значений по полям. Кроме того, можно изменять масштабирование иллюстраций пиков термических циклов, что особенно актуально при реализации импульсного режима технологического процесса.

На рис. 2 (а-г) представлены термические циклы после наплавки в режиме импульсного изменения энергетических параметров всех 4 образцов. При увеличенном масштабе наплавки модулированным током первых термопар с глубиной 6,5 мм заметны периодические колебания по температуре.

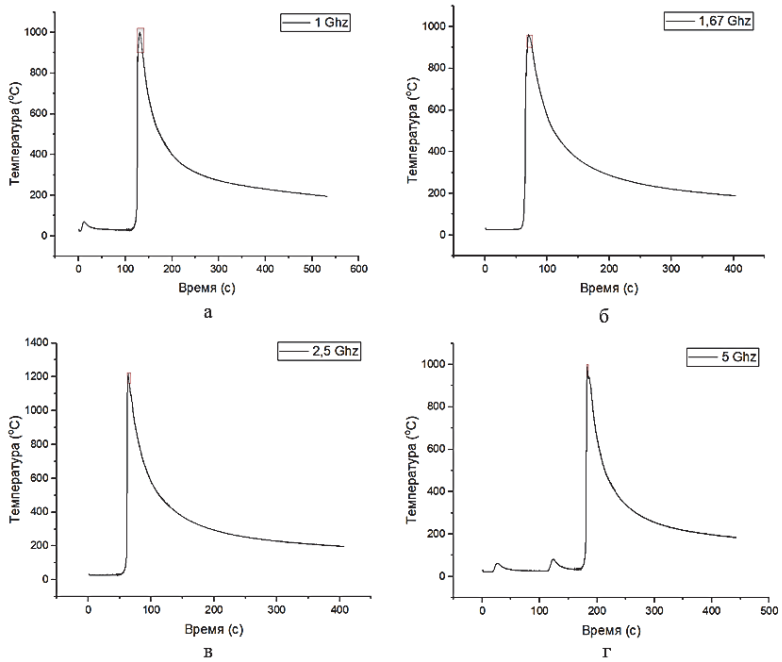


Рис. 2. Термические циклы наплавки: а - 1 Гц; б - 1,67 Гц; в - 2,5 Гц; г - 5 Гц

На рис. 3, 4 показаны осциллограммы с графиками в увеличенном масштабе, на которых видно сопоставление изменений по току и по температуре. Рассчитанные периоды практически совпадают с заданными значениями задаваемого частотного диапазона.

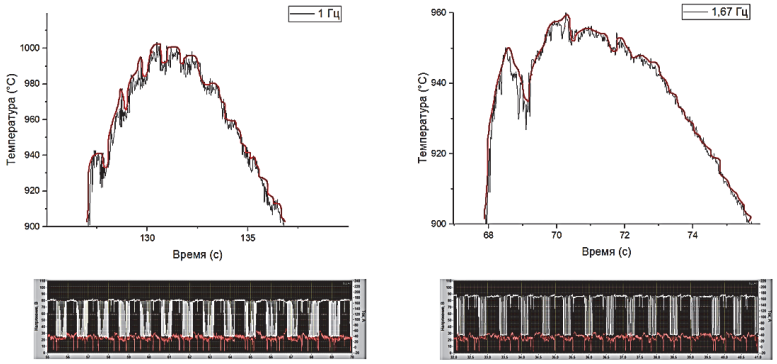


Рис. 3. Осциллограмма и термический цикл в увеличенном виде при частотах 1 и 1,67 Гц

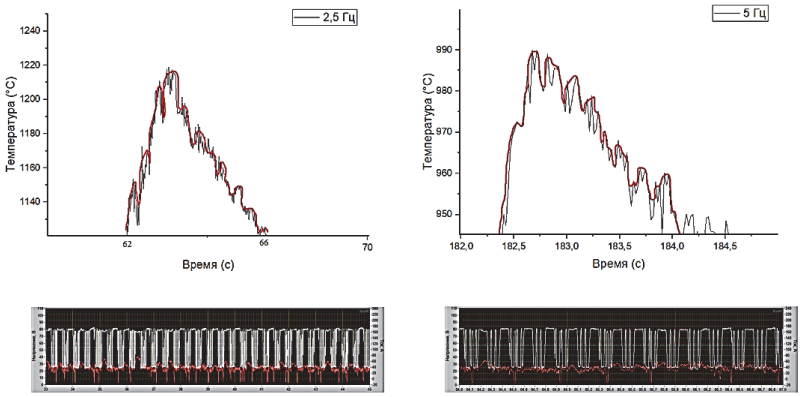


Рис. 4. Осциллограмма и термический цикл в увеличенном виде при частотах 2,5 и 5 Гц

На основе измеренных значений энергетических параметров режима, была построена расчетная математическая модель для сравнения рассчитанных значений с экспериментально полученными результатами. В качестве примера были взяты параметры образца, обработанного с частотой 1,67 Гц. Формулы для вычисления эффективной тепловой мощности и уравнение теплопроводности от быстродвижущегося нормально распределенного источника в любой точке пластины были взяты из работы В. А. Кархина [3]. На рис. 5 показана расчетная модель и уравнение теплопроводности.

$$qcp := \eta \cdot \frac{(Ipause \cdot \tau pause \cdot U) + (Impulse \cdot \tau mpulse \cdot U)}{\tau mpulse + \tau pause}$$

$$Tulsen2(t,y) := \begin{cases} T0 + \left[\frac{qcp}{v \cdot sigma \cdot \sqrt{\left[4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\lambda}{a}\right) \cdot t\right]}}\right] \cdot \left[e^{-\left[\frac{y^2+(x-v\cdot t)^2}{4\cdot a\cdot t}\right]}\right] & \text{if } t > 0 \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}$$

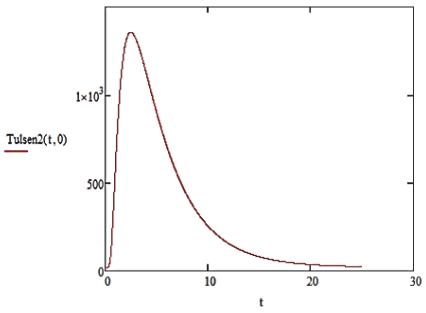


Рис. 5. Расчетная математическая модель на Mathcad 15

Заключение

Представленные результаты, по расчету термических циклов при помощи математической модели и применении разработанного измерительного устройства, позволяют оценить уровень тепловложения в обрабатываемое изделие с учетом импульсного характера источника нагрева. Представленные экспериментальные зависимости соответствует значениям тепловых флуктуаций, рассчитанных при помощи математической модели, что подтверждает принципиальную возможность применения рассмотренного подхода для оценки характеристик тепломассопереноса при выполнении работ в естественных климатических условиях, в том числе и в условиях Крайнего Севера (до -55 ℃)

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта FWRS-2024-0034 и с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Peng, Y. Research Status of Weldability of Advanced Steel / Y. Peng, L. Song, L. Zhao, Y. Zhang // Acta Metallurgica Sinica. – 2020. – Vol. 56, No. 4. – P. 601–618. – DOI 10.11900/0412.1961.2019.00369.

2. Сараев, Ю. Н. Математическое моделирование технологических процессов импульсной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом / Ю. Н. Сараев, Р. А. Кректулева, В. А. Косяков // Сварочное производство. – 1997. – № 4. – С. 2–4.

3. Karkhin, V. A. Thermal processes in welding / V. A. Karkhin. — Singapore : Springer, 2019. – 478 p. – DOI 10.1007/978-981-13-5965-1.

4. Применение термопар для измерения температуры [Электронный ресурс] : публикация от 13.10.2023 // RealLab! – Российское оборудование и системы промышленной автоматизации. – URL: https://www.reallab.ru/about/articles/the-use-of-thermocouples-for-temperature-measurement/ (дата обращения: 17.04.2026).

УДК 547.458.61

Долгова Евгения Сергеевна, студентка, Ивановский государственный химико-технологический университет

Dolgova Evgeniya Sergeevna, student, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Ракутина Ирина Сергеевна, студентка, Ивановский государственный химико-технологический университет

Rakutina Irina Sergeevna, student, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Лосев Николай Владимирович, кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук

Losev Nikolay Vladimirovich, Candidate of Chemical Sciences, researcher, Institute of Solution Chemistry named after G.A. Krestov of the Russian Academy of Sciences

Трифонова Ирина Павловна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Химии и технологии высокомолекулярных соединений», Ивановский государственный химико-технологический университет

Trifonova Irina Pavlovna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Бурмистров Владимир Александрович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Химии и технологии высокомолекулярных соединений», Ивановский государственный химико-технологический университет

Burmistrov Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА
EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT TIME ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POTATO STARCH SOLUTIONS

Аннотация. Ультразвуковой обработке с частотой 22 кГц подвергали дисперсии картофельного крахмала в олеиновой кислоте. Методом ИК спектроскопии было установлено, что гидроксильные группы крахмала подвергаются этерификации. В спектрах модифицированных крахмалов обнаружена новая полоса при 1730 $см^{-1}$, соответствующая карбонильной группе C=O в сложных эфирах. Изменения реологических характеристик растворов крахмалов в ДМСО подтверждает модификацию поверхности крахмальных зерен.

Abstract. A dispersion of potato starch in oleic acid was ultrasonically processed at 22 kHz. IR spectroscopy revealed that the starch's hydroxyl groups undergo esterification. A new band was detected in the spectra of the modified starches at 1730 cm^{-1}, corresponding to the carbonyl group C=O in esters. Changes in the rheological properties of starch solutions in DMSO confirm surface modification of the starch granules.
Ключевые слова: крахмал, ультразвук, растворы, реология.
Key words: starch, ultrasound, solutions, rheology.

Введение

В последнее время в полимерной промышленности все чаще используют биоразлагаемые пластики для производства изделий с ограниченным сроком службы, например, упаковки. Природные полимеры, такие как крахмалы различного происхождения, являются прекрасным сырьем для таких композиций. Но нативные крахмалы не обладают необходимой термопластичностью и требуют предварительной модификации, которую можно осуществить как химическим путем, так и за счет физических воздействий [1,2]. В литературе описаны реакции с участием гидроксильных групп крахмала и получение этерифицированных крахмалов [3], которые лучше совмещаются с термопластами. В результате физических воздействий, таких как ультразвук, высокое давление, микронизация, получают пластичный аморфизированный крахмал [4].

Ультразвук, как метод физического воздействия на вещество, способствует образованию в жидкости пузырьков с «горячими точками». Локальное повышение температуры и давления ускоряет химические реакции, увеличивает выход продукта. В органическом синтезе ультразвуковое воздействие применяют как для гомогенных, так и гетерогенных реакций [5].

Основная часть

Модификацию картофельного крахмала проводили в среде олеиновой кислоты с добавкой винной кислоты как катализатора на установке УЗДН-2Т при частоте 22 кГц в течение разного времени. Затем крахмал был отмыт водой и этанолом для удаления остатков кислот. Отмытый крахмал высушивали при 55°С. В ИК спектрах модифицированного крахмала уменьшается интенсивность полосы 1645 $см^{-1}$, соответствующей колебаниям гидроксильных групп, и появляется полоса в области характерной для карбонильной группы в сложных эфирах при 1730 $см^{-1}$.

Из модифицированного и нативного картофельного крахмала готовили растворы в ДМСО концентрацией 4,5%, которые исследовали на реометре Anton Paar MCR 102 с измерительной системой конус – плита CP50-1 (диаметр 50 мм, угол конуса 1 градус). Контроль температуры системы проводился с помощью элемента Пельтье P-PTD. Кривые течения растворов, представленные на рис. 1, с достаточной точностью могут быть аппроксимированы уравнением Оствальда – де Ваале: $\tau = k \cdot \gamma^n$.

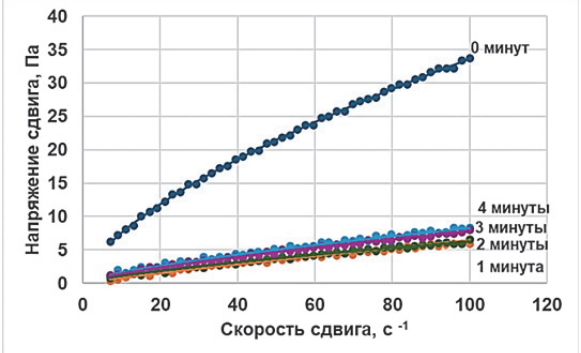


Рис. 1. Кривые течения растворов исходного и модифицированного крахмала для разного времени обработки

Результаты аппроксимации реологических кривых течения растворов крахмала представлены в таблице 1. Полученные результаты демонстрируют значительное изменение реологических характеристик растворов после модификации крахмала олеиновой кислотой. Для всех времен обработки резко снижается вязкость растворов, наиболее значительные изменения наблюдаются при ультразвуковом воздействии в течение 2 минут. Коэффициент *k*, который является мерой консистенции жидкости, также резко уменьшается. Показатель $n<1$ для всех растворов, неньютоновский характер течения сохраняется.

Таблица 1

Параметры уравнения Оствальда – де Ваале и вязкость крахмальных растворов при 35°С

	k, Па·с^n	n	R^2	Вязкость при 15 с$^{-1}$, Па·с	Вязкость при 100 с$^{-1}$, Па·с
Крахмал картофельный необработанный	1,71	0,65	0,99	0,67	0,34
Крахмал картофельный модифицированный, 1 мин	0,10	0,91	0,99	0,11	0,06
Крахмал картофельный модифицированный, 2 мин	0,19	0,76	0,99	0,08	0,07
Крахмал картофельный модифицированный, 3 мин	0,31	0,71	0,99	0,16	0,08
Крахмал картофельный модифицированный, 4 мин	0,26	0,73	0,99	0,14	0,08

Заключение

Можно предположить, что физико-химические процессы, протекающие в крахмале при ультразвуковом воздействии в присутствии олеиновой кислоты, увеличивают гидрофобные свойства, и это оказывает влияние на реологические свойства крахмальных растворов. В конечном итоге, модификация крахмала способствует увеличению пластичности и лучшей совместимости с полимерной термопластичной матрицей.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания министерства науки и высшего образования РФ на выполнение НИР (тема № FZZW-2026-0003).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ashogbon, A. O. Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review / A. O. Ashogbon, E. T. Akintayo // Starch-Starke. – 2014. –Vol. 66. – P. 41-57.

2. Руськина, А.А. Анализ современных способов модификации крахмала как инструмента повышения его технологических свойств / Руськина, А.А., Попова Н.В., Науменко Н.В., Руськин Д.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». - 2017. - Т. 5, № 3. - С.12–20.

3. Yang, Y. Preparation and characterization of thermoplastic starches and their blends with poly(lactic acid) / Y. Yang, Zh. Tang, Zh. Xiong, J. Zhu // International Journal of Biological Macromolecules. – 2015. – Vol. 77. – P. 273-279.

4. Punia, S. Barley starch modifications: physical, chemical and enzymatic - a review. // Int J Biol Macromol. – 2020. – V. 144. – P.578–585

5.Majhi, S. Applications of ultrasound in total synthesis of bioactive natural products: A promising green tool / S. Majhi // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – Vol. 77. – Art. no. 105665.

УДК 620.193.8
Драпиковский Антон Петрович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Drapikovskiy Anton Petrovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Кравченко Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kravchenko Elena Genadyevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ANALYSIS OF OPERATIONAL REMOTE CONTROL SYSTEMS FOR DIAGNOSTICS OF PRE-INSULATED PIPELINES

Аннотация. В настоящей работе проводится анализ системы оперативного дистанционного контроля (СОДК), предназначенной для мониторинга состояния теплоизоляционного слоя изолированных трубопроводов. Описан принцип действия СОДК, основанный на измерении электрических и волновых свойств системы, включающей сигнальные медные проводники и стальную трубу, заключенные в пенополиуретановую изоляцию. Рассмотрены причины возможного нарушения целостности теплоизоляции и причины увеличения влажности. Установлена нормативная база, регламентирующая применение СОДК. Проведен обзор компонентов системы, включая трубную часть и сигнальную часть. Описаны методы диагностики, такие как измерение сопротивления и импульсная рефлектометрия.
Abstract. In this work, an analysis of the operational remote control system (ODC) is carried out, designed to monitor the state of the heat insulation layer of isolated pipelines. Described is the principle of operation of the ODC, based on measuring electrical and wave properties of the system, which includes signal copper conductors and a steel pipe enclosed in polyurethane foam insulation. The reasons for the possible violation of the integrity of thermal insulation and the reasons for the increase in humidity are considered. The regulatory framework governing the use of ODCs has been established. A review of the system components including the piping and signal parts was carried out. Diagnostic techniques such as resistance measurement and pulse reflectometry are described.
Ключевые слова: система оперативного дистанционного контроля, предизолированные трубопроводы, диагностика, импульсная рефлектометрия, мониторинг.
Key words: operational remote control system, pre-insulated pipelines, diagnostics, pulse reflectometry, monitoring.

Введение

Современные промышленные объекты, в особенности нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), предъявляют высокие требования к надежности и безопасности эксплуатации трубопроводных систем. Целостность теплоизоляционного слоя имеет критическое значение, поскольку он предотвращает тепловые потери, защищает трубопровод от внешних воздействий и исключает аварийные утечки теплоносителя. Нарушение герметичности изоляции провоцирует коррозию стальной трубы и может привести к аварии.

Для непрерывного мониторинга состояния изоляции применяются системы оперативного дистанционного контроля (СОДК). Это комплексные решения, предназначенные для обнаружения участков с повышенной влажностью, что является индикатором возможных повреждений [1, 2]. Принцип действия СОДК базируется на использовании встроенных в теплоизоляционный слой сигнальных проводников, образующих совместно с изоляционным материалом единый датчик увлажнения.

Проблематика возникновения повышенной влажности в теплоизоляционном слое изолированных трубопроводов может быть вызвана рядом причин:

Нарушение герметичности наружного защитного слоя: проникновение атмосферной влаги через механические повреждения внешней оболочки.

Утечка теплоносителя: прорыв теплоносителя из основной трубы, вызванный коррозионными процессами, дефектами сварных соединений или механическими повреждениями.

Нормативные требования и обоснование применения СОДК. Внедрение СОДК является не просто рекомендацией, а обязательным требованием, закреплённым в стандартах. В частности, пункт 4.24 ГОСТ 30732-2006 «Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. Технические условия» прямо предписывает оснащать все изделия из пенополиуретановой теплоизоляции проводниками системы контроля. Это правило едино для трубопроводов с любой внешней защитой, включая оболочки из оцинкованной стали и полиэтилена.

Теоретические основы систем оперативного дистанционного контроля

Назначение и принцип действия СОДК

Система оперативного дистанционного контроля (СОДК) обеспечивает непрерывный мониторинг состояния пенополиуретановой изоляции предизолированных трубопроводов на протяжении всего срока службы. Являясь обязательным элементом трубопроводов, выполненных по технологии «труба в трубе» (рис. 1), СОДК служит для оперативного и высокоточного выявления участков с нарушением целостности изоляции.

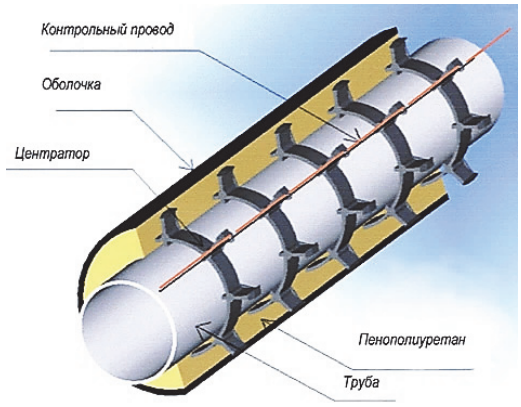


Рис. 1. Трубная часть СОДК



Рис. 2. Структура чувствительного датчика

Структура датчика увлажнения изоляции

Ключевым элементом системы контроля является датчик увлажнения изоляции (рис. 2), представляющий из себя распределенную систему и действующий по всей длине трубопровода. Конструктивно выделяются следующие части датчика.

Внешняя оболочка: выполнена из прочного материала, обеспечивающего механическую защиту внутреннего устройства сенсора от внешних воздействий (температурных колебаний, влаги, механических нагрузок).

Центральный элемент (металлическая трубка): внутренний металлический сердечник, предназначенный для передачи нагрузки и фиксации оптического волокна.

Заполнение пространства (внутритрубный гидрофильный заполнитель): специальное вещество, которое обладает способностью воспринимать механические напряжения и передавать их непосредственно на оптическое волокно. Гидрофильность вещества обеспечивает равномерное распределение нагрузки и хорошую передачу сигналов.

Дополнительные защитные слои (гидроизолирующие бронеленты): обеспечивают дополнительную гидроизоляцию и защиту от проникновения воды внутрь конструкции сенсора.

Промежуточная оболочка (полимерная): дополнительный защитный полимерный слой, повышающий устойчивость сенсора к механическим повреждениям и воздействию агрессивных факторов окружающей среды.

Рабочий элемент (оптическое волокно): сердцевина сенсора, выполненная из высокопрозрачного кварцевого стекла. Именно оно воспринимает внешние воздействия (влажность, деформации, вибрации, колебания температуры) и передает соответствующие сигналы, регистрируемые измерительной аппаратурой.

Сигнальные проводники прокладывают вдоль всей разветвленной сети трубопровода и объединяются в двухпроводную линию, замыкающуюся на концевых элементах в единую петлю. Проводники от всех ответвлений включаются в разрыв сигнального проводника основного трубопровода. Таким образом, петля из медных сигнальных проводников, стальная труба и теплоизоляционный слой ППУ между ними образуют комплексный датчик увлажнения изоляции, обеспечивающий надежную, точную и долговременную регистрацию показаний в трубопроводах.

Основные функциональные возможности датчика увлажнения

Определение длины контролируемого участка трубопровода. Благодаря измерению электрического сопротивления сигнальных проводников, датчик автоматически рассчитывает длину контролируемого участка трубопровода. Расчет производится по формуле: общая величина сопротивления делится на удельное сопротивление проводников.

Мониторинг влажности теплоизоляции. Электрическая проводимость теплоизоляционного слоя непрерывно отслеживается. Чем больше уровень влажности, тем выше становится электропроводность и меньше удельное сопротивление изоляции, что свидетельствует о нарушении влагозащитных свойств.

Выявление и точное определение мест увлажнений или обрывов. Система оперативно обнаруживает участки с аномально высокой влажностью или повреждениями сигнальных проводников, позволяя оператору точно локализовать проблемные зоны.

Методы контроля и диагностики

Контроль влажности: принцип измерения основан на изменении электрической проводимости теплоизоляционного слоя. Чем выше влажность, тем выше проводимость и ниже сопротивление изоляции.

Поиск мест повреждений: для локализации увлажнения изоляции или обрыва провода применяется метод импульсной рефлектометрии. При увлажнении изоляции или обрыве сигнала изменяются волновые характеристики датчика. Метод заключается в отправке высокочастотных импульсов по линии сигнальных проводников и измерении времени задержки между отправкой зондирующего импульса и получением отраженного импульса от неоднородности.

Компоненты системы СОДК

Традиционно система оперативного дистанционного контроля (СОДК) состоит из следующих основных компонентов:

Трубная часть

Представляет собой элементы трубопровода и комплектующие, непосредственно формирующие датчик увлажнения. Включает:

- Элементы трубопровода с сигнальными проводниками: трубы с заранее установленной изоляцией, отводы, компенсаторы, тройники, шаровые краны и другие фасонные изделия. Внутри теплоизоляционного слоя (пенополиуретана) размещаются два медных сигнальных проводника на расстоянии 16–25 мм от стенки стальной трубы, закрепленные центраторами с интервалом 0,8–1,2 метра.
- Промежуточные и концевые кабельные выводы: предназначены для подключения сигнальных проводников и заземляющего контакта («массы»).
- Концевые элементы трубопровода: служат для завершения линии сигнализации и включают монтажно-соединительные комплекты, обеспечивающие надежное соединение сигнальных проводников.

Сигнальная часть. Образована медными сигнальными проводниками, обычно располагаемыми параллельно стальной трубе внутри теплоизоляционного слоя.

Кабельные выводы. Используются для подключения сигнальных проводников и заземляющего контакта («массы») к различным устройствам:

- Концевой элемент трубопровода с кабельным выводом и металлической заглушкой изоляции: предназначен для подвода сигнальных проводников и «массы» внутрь зданий, цехов и технологических помещений.
- Концевой элемент трубопровода с металлической заглушкой изоляции и кабельным выводом: применяется для вывода сигнальных проводников и «массы» наружу, к наружным техническим устройствам (коверам). Соединение выполняется через герметичные вводы, установленные на наружной оболочке трубы.

Заключение

Системы оперативного дистанционного контроля зарекомендовали себя как важный инструмент и метод обеспечивающий надежную и безопасную эксплуатацию систем трубопроводов на нефтеперерабатывающих предприятиях. Использование данного метода с учетом нормативных требований и существующих технологий позволяет эффективно применять СОДК для мониторинга состояния трубопроводов. Совершенствование представленной системы мониторинга, основанное на более точном анализе патентов в данной области и интегрировании с имеющимися системами управления, позволит открыть новые возможности в области повышения эффективности диагностики трубопроводов опасных производственных объектов и предотвратить возможные аварийные ситуации, связанные с повреждением трубопроводов с углеводородами и другими носителями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казаков, Э. Р. Система оперативного дистанционного контроля при подземной прокладке теплосети / Э. Р. Казаков, М. С. Липатов // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем : Материалы Всероссийской научно - практической конференции обучающихся и преподавателей. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 17 декабря 2020 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. – С. 23-28. – EDN IPKMCJ.

2. Ильин, Ю. Т. Альтернативные методы контроля состояния изоляционного покрытия теплопроводов в ППУ-изоляции. Опыт применения / Ю. Т. Ильин, Н. Н. Шаповалов // Энергосбережение. – 2025. – № 7. – С. 48-53. – EDN LVCFOU.

УДК 62-799

Зайцев Евгений Николаевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zaitsev Evgeniy Nikolaevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
IMPROVING THE EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGER EQUIPMENT REPAIRS

Аннотация. В данной статье рассматриваются методы и подходы к повышению эффективности ремонтных работ теплообменного оборудования на промышленных предприятиях. Проанализированы основные проблемы, возникающие при техническом обслуживании и ремонте теплообменников, предложены современные технологические решения по оптимизации ремонтных процессов. Особое внимание уделено вопросам диагностики оборудования,

планирования ремонтных работ и внедрения предупредительного обслуживания. Представлены практические рекомендации по увеличению межремонтного периода и снижению эксплуатационных затрат.
Abstract. This article discusses methods and approaches to improving the efficiency of heat exchanger equipment repairs at industrial enterprises. The main problems arising during maintenance and repair of heat exchangers are analyzed, and modern technological solutions for optimizing repair processes are proposed. Special attention is paid to equipment diagnostics, repair planning, and implementation of preventive maintenance. Practical recommendations are presented for increasing the time between repairs and reducing operational costs.
Ключевые слова: теплообменное оборудование, ремонтные работы, эффективность обслуживания, техническая диагностика, промышленное оборудование, энергоэффективность.
Key words: heat exchange equipment, repair works, maintenance efficiency, technical diagnostics, industrial equipment, process optimization, energy efficiency.

Введение

В современной нефтегазовой промышленности теплообменное оборудование играет ключевую роль в технологических процессах переработки углеводородов. Эффективность работы теплообменных аппаратов напрямую влияет на производительность всего предприятия, качество продукции и экономические показатели производства. Важнейшим аспектом обеспечения надежной работы теплообменного оборудования является правильная организация ремонтных работ.

Специфика нефтегазовой отрасли предъявляет особые требования к эксплуатации теплообменного оборудования. Агрессивные среды, высокие температуры и давления создают сложные условия работы для теплообменных аппаратов. В процессе эксплуатации происходит загрязнение поверхностей теплообмена, коррозионный износ материалов, возникают механические повреждения конструктивных элементов. Все эти факторы приводят к снижению эффективности теплообмена и требуют проведения своевременного технического обслуживания и ремонта.

Основная часть

Современный подход к организации ремонтных работ теплообменного оборудования основывается на принципах предупредительного обслуживания и диагностики технического состояния. Внедрение систем онлайн-мониторинга позволяет отслеживать ключевые параметры работы теплообменников в режиме реального времени. Анализ данных о температурных режимах, перепадах давления, расходах теплоносителей дает возможность своевременно выявлять отклонения в работе оборудования и планировать ремонтные мероприятия.

Важным аспектом повышения эффективности ремонтных работ является применение современных технологий очистки теплообменного оборудования. Традиционные механические методы очистки постепенно уступают место более эффективным технологиям, таким как гидродинамическая, химическая и ультразвуковая очистка. Использование специализированных химических реагентов позволяет удалять даже сложные отложения без повреждения поверхностей теплообмена. Внедрение автоматизированных систем промывки сокращает время проведения очистных работ и повышает их качество [1].

Сравнительный анализ основных методов очистки теплообменного оборудования представлен в табл. 1. Как видно из представленных данных, каждый метод имеет свои преимущества и ограничения, что определяет необходимость их комплексного применения в зависимости от характера загрязнений и особенностей конструкции теплообменных аппаратов. При выборе метода очистки необходимо учитывать не только его эффективность, но и экономические показатели, включая стоимость оборудования, расходных материалов и трудозатраты [2].

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов очистки теплообменного оборудования

Метод очистки	Преимущества	Недостатки	Область применения
Механическая очистка	- Низкая стоимость - Простота выполнения - Не требует специальных реагентов	- Возможность повреждения поверхности -Высокая трудоемкость - Длительность процесса	Удаление твердых отложений и накипи
Гидродинамическая очистка	- Высокая эффективность - Отсутствие механических повреждений - Возможность очистки труднодоступных мест	-Высокие энергозатраты - Необходимость специального оборудования - Расход воды	Удаление различных видов загрязнений, включая твердые отложения
Химическая очистка	- Высокая эффективность - Возможность удаления сложных отложений - Отсутствие механического воздействия	-Высокая стоимость реагентов - Экологические риски - Возможность коррозии	Удаление накипи, солевых и органических отложений
Ультразвуковая очистка	- Высокое качество очистки - Отсутствие механических повреждений - Автоматизация процесса	- Высокая стоимость оборудования - Ограничения по размерам очищаемых поверхностей - Энергозатраты	Удаление тонких и средних отложений различного происхождения

Особое внимание при организации ремонтных работ уделяется вопросам контроля качества и диагностики технического состояния оборудования. Применение современных методов неразрушающего контроля, таких как ультразвуковая дефектоскопия, вихретоковый контроль, термография, позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях их развития. Это дает возможность своевременно планировать ремонтные работы и предотвращать аварийные ситуации [1, 3].

Важным направлением повышения эффективности ремонтных работ является оптимизация логистических процессов. Создание складов запасных частей, организация оперативной доставки материалов и комплектующих, формирование мобильных ремонтных бригад позволяют минимизировать время простоя оборудования. Внедрение современных информационных систем управления ремонтами (CMMS) обеспечивает эффективное планирование и контроль выполнения ремонтных работ.

Значительный потенциал повышения эффективности ремонтных работ связан с применением новых конструкционных материалов и технологий ремонта. Использование современных антикоррозионных покрытий, композитных материалов, специальных сплавов позволяет увеличить срок службы теплообменного оборудования и снизить частоту ремонтов. Технологии ремонта с применением сварки, наплавки, металлизации обеспечивают восстановление работоспособности оборудования с высоким качеством [4].

Важным аспектом является обучение и повышение квалификации персонала, выполняющего ремонтные работы. Внедрение современных технологий требует соответствующих знаний и навыков. Организация регулярных тренингов, изучение передового опыта, освоение новых методов ремонта позволяют повысить качество выполняемых работ и сократить время их проведения.

Экономическая эффективность мероприятий по повышению качества ремонтных работ определяется снижением эксплуатационных затрат, увеличением межремонтного периода, сокращением времени простоя оборудования. Внедрение современных технологий и методов организации ремонтных работ требует определенных инвестиций, но обеспечивает значительный экономический эффект в долгосрочной перспективе [5].

Заключение

В заключение следует отметить, что повышение эффективности ремонтных работ теплообменного оборудования является комплексной задачей, решение которой требует си-

стемного подхода. Внедрение современных технологий диагностики и ремонта, совершенствование организации работ, повышение квалификации персонала позволяют обеспечить надежную и эффективную работу теплообменного оборудования в сложных условиях нефтегазового производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Монтаж, техническая диагностика и ремонт основного технологического оборудования химических производств и нефтегазопереработки : Учебник / И. И. Поникаров, С. И. Поникаров, С. И. Валеев [и др.]. – Казань : Издательство "Фэн" Академии наук Республики Татарстан, 2018. – 798 с. – ISBN 978-5-9690-0424-5. – EDN OEOOAF.

2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов : учебник для студентов химико-технологических специальностей вузов / А. Г. Касаткин ; А. Г. Касаткин. – Изд. 14-е, стер. Перепечатка с 9-го изд. 1973 г.. – Москва : АльянС, 2008. – 750 с. – ISBN 978-5-903034-33-8. – EDN QNEKVP. Поникаров И.И., Поникаров С.И., Рачковский С.В. Расчеты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки. – Москва : Альфа-М, 2021. - 720 с.

3. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта промышленных зданий и сооружений : Справочник / А. И. Ящура. – Москва : ЭНАС, 2009. – 312 с. – ISBN 978-5-93196-930-5. – EDN RYRUOH.

4. Анализ конструкций пластинчатых теплообменников / В. В. Привалов, Н. А. Соколов, М. Ф. Хасанов, С. В. Лапонов // Естественные и технические науки. – 2024. – № 11(198). – С. 214-216. – EDN OSDEAY.

5. Шерстнев, Н. В. Обслуживание и ремонт судовых теплообменных аппаратов : Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 26.05.00 "Техника и технологии кораблестроения и водного транспорта" (квалификация "инженер") / Н. В. Шерстнев. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. – 232 с. – (Высшее образование: Специалитет (СевГУ)). – ISBN 978-5-16-014895-3. – DOI 10.12737/textbook_5c6e5598043e12.21893891. – EDN ZBNMDB.

УДК 621.791.72

Зиновьев Илья Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zinoviev Ilya Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Плетнев Никита Олегович, старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Pletnev Nikita Olegovich, Senior lecturer of the Department «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ
EXPERIMENTAL SEARCH FOR OPTIMAL PARAMETERS OF PULSE LASER WELDING OF THIN-WALLED CORROSION-RESISTANT STEEL PIPES

Аннотация. Установлены зависимости формы импульса и фокусного расстояния при импульсной лазерной сварке в один проход коррозионностойких сталей марки 03Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, AISI-202. Определены оптимальные режимы сварки тонкостенных труб. Для получения большего воздействия на поверхность металла и проплавления от 80 % при фокусном расстоянии 6 – 7 единиц предложено увеличить длительность импульса до максимального значения 20 мс, и частоту до 3 Гц.

Abstract. The dependencies of the pulse shape and focal length during pulse laser welding in one pass of corrosion-resistant steels of grades 03X18N10T, 12X18N10T, and AISI-202 have been established. Optimal welding modes for thin-walled pipes have been determined. To obtain a greater effect on the metal surface and penetration of 80% at a focal length of 6-7 units, it is proposed to increase the pulse duration to a maximum value of 20 ms and the frequency to 3 Hz.
Ключевые слова: сварка, неразъемные соединения, лазерная сварка, лазерный импульс.
Key words: welding, permanent joints, laser welding, laser pulse.

Введение

Особенности формирования сварной точки при воздействии лазерным импульсом на поверхность низкоуглеродистой стали, выявленные ранее [1], позволяют определить структурные изменения металла шва и стадийность формирования сварного шва для низкоуглеростых сталей. Также ранее определено влияние формы и параметров единичного импульса на геометрию сварной точки на образцах стали марки 12Х18Н10Т [2, 3]. Кроме того, изучено влияние температуры на внутренние напряжения и появление деформации и создана математическая модель, позволяющая прогнозировать геометрические параметры сварного шва при выполнении роботизированной лазерной сварки [4, 5].

В текущей работе проведён экспериментально-аналитический подход для оценки влияния технологический параметров лазерной сварки на качество швов тонкостенных труб при разработке нового технологического процесса. Целью исследования является определение оптимальных режимов сварки тонкостенных труб для марок ASIS 202, 03Х18Н10Т, 12Х18Н10Т при диаметрах 32-50 мм и толщиной 1-2,6 мм.

Основная часть

Перед проведением экспериментальных исследований было произведено моделирование параметров установки на геометрию сворной точки с выявлением оптимальных режимов на стальной пластине толщиной 1 мм (рис. 1). Перед проведением исследований образцы подвергали химическому анализу для определения соответствия химического состава.

Полученные результаты представлены в виде графика относительности глубины проплавление от формы импульса установки для определения максимального проплавления (рис. 2).

При определении влияния формы импульса на глубину проплавления от 80 до 100%, оптимальными формами импульса для сварки являются: колокол, трапеция, прямоугольник, плавное нарастание и плавный спад.

Определив оптимальную форму импульса на низкоуглеродистой стали, следующим этапом проводили аналогичные испытания на пластинах из коррозионностойкой стали для получения данных о максимальной глубине поправления, используя пластины марки 12Х18Н10Т толщиной 1мм. Параметры режимов представлены в таблице 1.

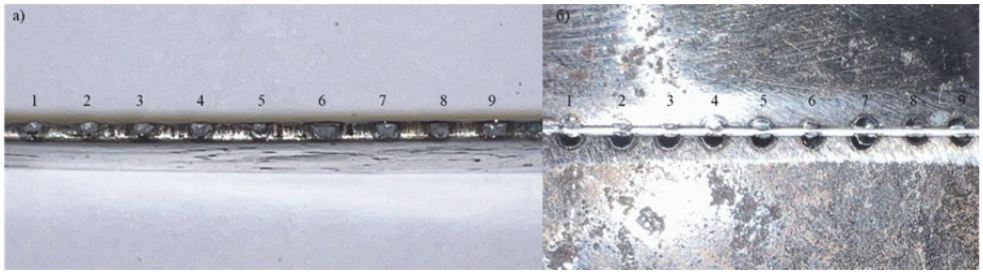


Рис. 1. Влияние формы импульса на геометрию сварной точки:
а) вид сверху; б) вид с боку

Таблица 1

Отработка режимов для коррозионной стали

№	Фокусное расстояние, единиц	Нагрузка	Форма импульса, мс	Напряжение, В	Длительность импульса, мс	Частота, Гц	Ширина, мм	Глубина провара, мм
(Рис. 3.- 1)								
1-2	5	27	Прямоугольник	450	15	1	1,50	0,42-0,42
3-4	6	26			16	1	1,40	0,65-0,52
5-6	6	29			17	1	1,40	0,64-0,55
7-8	7	29			17	1	1,20	1,00-0,87
(Рис. 3.- 2)								
1-2	5	19	Трапеция	450	15	1	1,50	0,30-0,30
2-3	6	20			16	1	1,40	0,60-0,59
4-5	6	21			17	1	1,40	0,63-0,60
60	7	22			17	1	1,20	1,00-1,00*
(Рис. 3.- 3)								
1-2	5	19	Колокол	450	15	1	2,00	0,70-0,70
3-4	6	19			16	1	1,90	0,83-0,84
5-6	6	20			17	1	1,90	1,00-1,00
7-8	7	20			17	1	1,70	1,00-1,00*
(Рис. 3.- 4)								
1-2	5	22	Плавное нарастание	450	15	1	1,50	0,85-0,73
2-3	6	23			16	1	1,40	0,75-0,88
3-4	6	24			17	1	1,25	0,63-0,50
5-6	7	24			17	1	1,15	0,80-0,78
(Рис. 3.- 5)								
1-2	5	22	Плавный спад	450	15	1	1,40	0,50-0,50
3-4	6	23			16	1	1,35	0,53-0,53
5	6	24			17	1	1,35	0,56
6	7	24			17	1	1,20	0,60
*-проплавление сквозное								

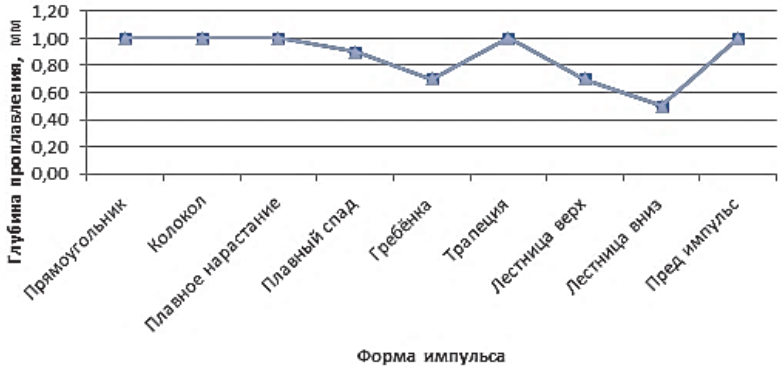


Рис. 2. График относительности глубины проплавления от формы импульса

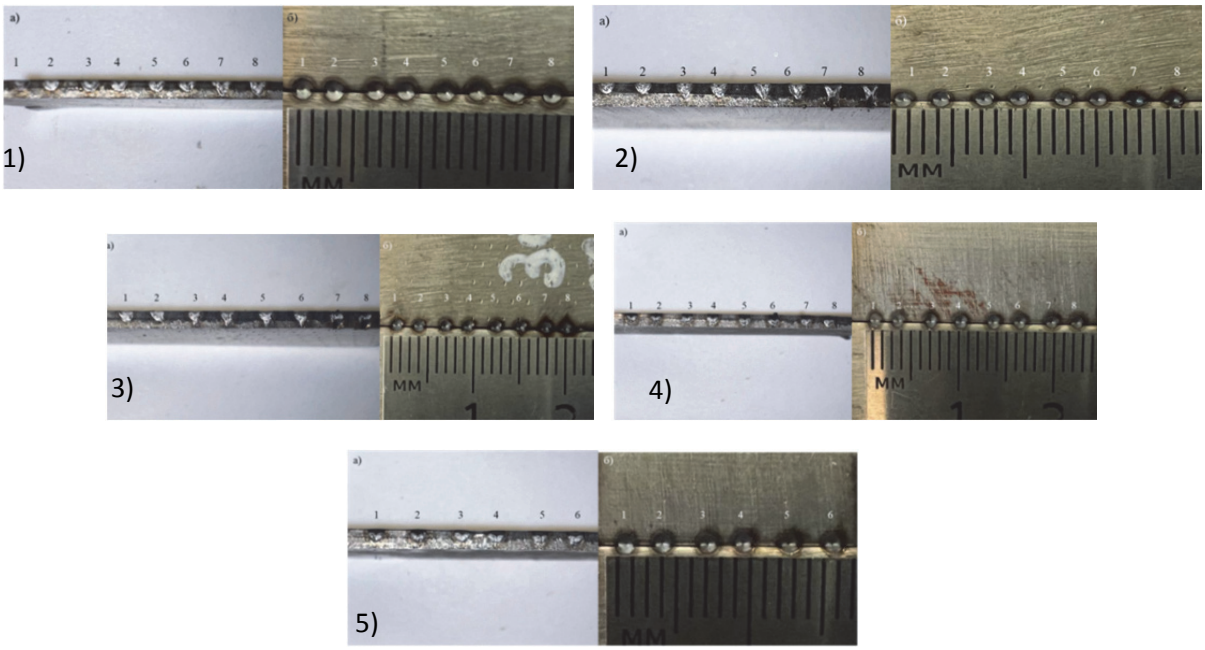


Рис. 3. Отработка режимов для коррозионной стали:
1 – Прямоугольник; 2 – Трапеция; 3 – Колокол; 4 – Плавное нарастание; 5 – Плавный спад

Для получения большего воздействия на поверхность металла и проплавления 80 – 100 % предложено увеличить длительность импульса до максимального значения 20 мс, и частоту до 3 Гц. На рис. 4 представлен образец, полученный с новыми параметрами эксперимента.

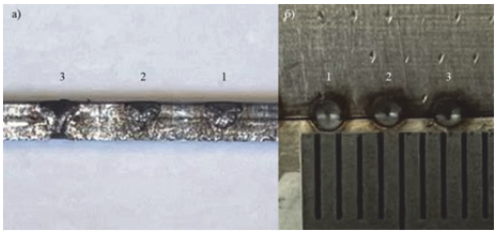


Рис. 4. Образец полученный с увеличением длительности и частоты импульса:
а) вид с боку; б) вид с верху

Заключение

Таким образом, экспериментально определено, что из-за свойств нержавеющей стали влияние параметров на геометрию сварной точки сильно различается от стали Ст3. Для получения полной глубины проплавления от 80 % для нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1мм следует использовать оптимальные режимы для формы импульса:
- колокол: фокусное расстояние 6 – 7 единиц, длительность импульса 16-17мс, частота 3 Гц;
- трапеции: фокусное расстояние 6 единиц, длительность импульса 16 мс, частота 3 Гц;
- прямоугольник, фокусное расстояние 7 единиц, длительность импульса 17 мс, частота 3 Гц;
- плавное возрастание, фокусное расстояние 7 единиц, длительность импульса 17 мс, частота 3 Гц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахматов, П. В. Исследование особенности формирования сварной точки неразъемного соединения при воздействии единичным лазерным импульсом на поверхность низкоуглеродистой стали / П. В. Бахматов, Н. О. Плетнев // Вестник МАИ. – 2020. – Т. 27, № 3. – С. 94-102. – DOI 10.34759/vst-2020-3-94-102. – EDN NLNIJX.

2. Бахматов, П. В. Влияние режимов лазерной сварки тонкостенных конструкций на структуру и свойства сварных соединений из нержавеющих сталей / П. В. Бахматов, Н. О. Плетнев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – Т. 1, № 2(38). – С. 82-89. – EDN EKHYCI.

3. Полейчук, П. А. Влияние формы импульса на соотношение наплавленного металла в объеме сварной точки / П. А. Полейчук, Н. О. Плетнев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной НПК молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 150-154. – EDN ZUVCUR.

4. Плетнев, Н. О. Воздействие температуры зоны термического влияния на деформацию при импульсной лазерной сварке / Н. О. Плетнев, П. А. Полейчук // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 1(73). – С. 107-110. – EDN FWTKZF.

5. Рубан, К. Е. Расчёт математической модели, определяющей зависимость входных параметров лазерной сварки на формирование сварных швов сплава АМг5 / К. Е. Рубан, П. В. Бахматов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2021. – № 3(51). – С. 58-61. – DOI 10.17084/20764359-2021-51-58. – EDN WXRBUA.

УДК 669.156.5

Зиновьев Олег Анатольевич, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zinovev Oleg Anatolevich, postgraduate, Komsomolsk-na-Amure State University
Суртаева Ксения Романовна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Surtaeva Ksenya Romanovna, postgraduate, Komsomolsk-na-Amure State University
Башков Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bashkov Oleg Victorovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department «Chemistry and materials science», Komsomolsk-na-Amure State University

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ОБРАЗЦА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ
COMPARATIVE ANALYSIS OF THEORETICAL CALCULATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HEATING TIME OF A SAMPLE IN AN ELECTRIC OVEN

Аннотация. Правильное определение времени нагрева образцов в печи является одним из необходимых условий проведения качественной термической обработки. Поскольку существует несколько различных способов теоретического расчета времени нагрева, демонстрирующих отличные друг от друга значения, авторами были проведены экспериментальные измерения, позволяющие определить, какой способ теоретического расчета предоставляет наиболее достоверные данные в рассматриваемых условиях.

Abstract. Correct determination of the heating time of samples in the furnace is one of the necessary conditions for high-quality heat treatment. Since there are several different methods of theoretically calculating the heating time, demonstrating different values from each other, the authors made experimental measurements to determine which method of theoretical calculation provides the most reliable data under the conditions considered.

Ключевые слова: термическая обработка, расчет времени нагрева, образец сложной конфигурации, электрическая печь, термопара

Key words: heat treatment, heating time calculation, sample of complex configuration, electric furnace, thermocouple

Введение

Подбор оптимального технологического режима термической обработки (ТО) детали включает в себя, в том числе, правильное вычисление времени нагрева в печи. Точный расчет критически важен, поскольку влияет на качество и структуру металла (недогрев, пережог или высокая степень обезуглероживания материала), а также определяет производительность

и экономическую целесообразность работы печи. Время нагрева под закалку (нормализацию) зависит от размеров детали и формы сечения, температуры и способа нагрева, нагревающей среды, теплофизических характеристик материала. Множество учитываемых при расчете параметров обуславливает наличие разнообразия методов, которые позволяют рассчитывать время нагрева с учетом ряда допущений [1-5]. В результате, исследователь сталкивается с несколькими значениями, значительно отличающимися между собой. В связи с этим, авторы статьи сравнили несколько популярных методов теоретического расчета с экспериментальными данными, полученными для конкретного образца, чтобы выбрать наиболее достоверный способ расчета, применимый в конкретных условиях нагрева.

Основная часть

В статье рассматривается расчет времени нагрева образца, изготовленного из стали 45, сложной конфигурации (рисунок 1) в камерной электрической печи сопротивления при температуре нагрева 855 °С под закалку в условиях загрузки одного образца, когда температура посадки образца в печь примерно равна температуре проведения операции.

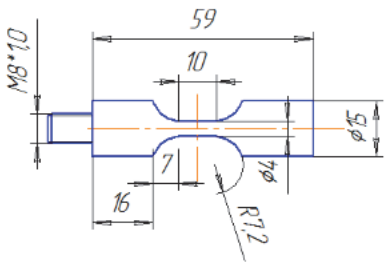


Рис. 1. Конфигурация образца

Расчеты, приведенные в данной статье, основаны на допущении, что нагрев материала осуществляется с самого начала загрузки образца, поскольку теплоемкость его значительно мала по сравнению с печью. Условием нагрева является постоянство температуры, основным видом теплообмена – лучеиспускание, поскольку в отсутствии искусственной циркуляции воздуха конвективный теплообмен в электрических печах имеет малую интенсивность и приближенно принят авторами 15 Вт ($м^2 \cdot К$).

Теоретический расчет времени нагрева

По данным автора [1], для практических расчетов норма времени нагрева углеродистой стали при ТО в электропечи в интервале температур 820-880 °С составляет 50-55 с на 1 мм наибольшего сечения, однако форма сечения при этом не учитывается.

Согласно [2], расчет времени нагрева до температур 800-900 °С проводится по формуле:

$$\tau_н = 0{,}1 D_1 K_1 K_2 K_3, \quad (1)$$

где D_1 – минимальный размер максимального сечения (15), мм; K_1 –коэффициент среды (для газа – 1); K_2 –коэффициент формы (для цилиндра – 2); K_3 – коэффициент равномерности нагрева (для всестороннего нагрева -1).

Следующий способ вычисления предложен Е. А. Смольниковым [3]. Во внимание принимается материал образца и его геометрические особенности.

$$\tau_н = K \cdot W, \quad (2)$$

где K – суммарный физический фактор нагрева, учитывающий марку стали, интервал температур и среду нагрева (40), мин/см^3; W – геометрический показатель нагреваемой в печи детали, см.

По ГОСТ 71257-2024 расчет для деталей, с отношением длины к диаметру большим или равным 3, следующий: для нагрева заготовок из углеродистой стали в интервале температур 850-920 °С требуется 1,5 мин на 1 мм наибольшего сечения. Поскольку нагрев осуществляется в электрической печи, представленная норма увеличивается в 1,2 раза.

Для инженерных расчетов продолжительность нагрева определяется с учетом теплофизических свойств образца. Поскольку образец загружается в разогретую печь холодным, то необходимо учитывать возможное влияние перепада температур по его толщине, оцениваемого числом Био, Bi:

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda} = \frac{274 \cdot 0{,}015}{37{,}25} = 0{,}11, \quad (3)$$

где S – характерный геометрический размер изделия (в данном случае наибольший радиус), м; λ – средний коэффициент теплопроводности в интервале начальной (20 °С) и конечной температуры (850

°С) нагреваемого изделия, Вт/(м² · °С); α – суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией, Вт/(м² · К).

Поскольку $Bi < 0{,}25$, образец является тонким телом, а значит термическим сопротивлением образца в дальнейших расчетах можно пренебречь [4].

В электрических камерных печах при температурах свыше 700 °С без принудительной циркуляции воздуха преобладает лучистый теплообмен. В этом случае расчет времени нагрева тонкого тела определяется по формуле [4]:

$$\tau = \frac{Gc}{FC_{\text{пр}}} \cdot \nu, \tag{4}$$

где G – масса металла, кг; c – средняя удельная теплоемкость тела в интервале начальной и конечной температур нагрева, Дж/(кг · К); $C_{\text{пр}}$ – коэффициент излучения загрузки, Вт/(м²·К⁴); F – площадь тепловоспринимающей поверхности, м².

Коэффициент ν, К$^{-3}$ при нагреве вычисляется по формуле:

$$\nu = \frac{T_{\text{п}}}{2\theta_{\text{п}}}\left[1{,}1515lg\frac{\left(1+\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{п}}}\right)\left(1-\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{п}}}\right)}{\left(1-\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{п}}}\right)\left(1+\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{п}}}\right)} + arctg\frac{\left(\frac{T_{\text{к}}-T_{\text{н}}}{T_{\text{п}}}\right)}{1+\frac{T_{\text{к}}T_{\text{н}}}{T_{\text{п}}^2}}\right] = 0{,}12, \tag{5}$$

где $T_{\text{п}}$ – температура печи (1128), К; $\theta_{\text{п}} = \left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4$; $T_{\text{к}}$ –конечная температура нагрева (1123), К; $T_{\text{н}}$ –температура образца начальная (293), К.

В таблице 1 приведены исходные данные для расчетов, а также результаты вычислений некоторых промежуточных параметров для конечных формул. В таблице 2 представлены полученные расчетные значения с приведением способа и результата расчета в последовательности, в которой они приведены в вышеизложенном тексте, а также приводится расчетная погрешность по сравнению с данными экспериментального измерения.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

Параметр	Значение	Единицы измерения
Коэффициент теплопроводности, λ	37,25	Вт/(м·°С)
Площадь активной поверхности, F	0,003	м²
Масса образца	0,058	кг
Степень черноты поверхности образца, $\varepsilon_{\text{загр}}$	0,8	-
Приведенный коэффициент излучения, $C_{\text{пр}}$. $C_{\text{пр}}$=5,7· $\varepsilon_{\text{загр}}$	4,56	Вт/(м²·К⁴)
Средняя за время нагрева температура образца, $T_{\text{Мср}}$ $T_{\text{Мср}}$= 1/3 ($t_{\text{мн}}$+2 $t_{\text{мк}}$) + 273	846 (1119)	°С (К)
Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, $\alpha_{\text{л}}$ $\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}}\frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_{\text{мср}}}{100}\right)^4}{T_{\text{п}}-T_{\text{мср}}}$	259	Вт/(м²·°С)
Коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\alpha_{\text{к}}$	10…15	Вт/(м²·°С)
Средняя удельная теплоемкость, с	670	Дж/(кг · °С)

Таблица 2

Расчетные значения времени нагрева

Способ расчета	Полученное значение, мин	Погрешность вычисления, %
По Ю. Е. Седову	13,75	52,7
По А.П. Гуляеву	30,00	233,3
По Е. А. Смольникову	13,31	47,89
По ГОСТ 71257-2024	27,00	200
По Ю.М. Лахтину	5,63	37,45

Результаты вычислений времени нагрева из таблицы 2 демонстрируют большой разброс значений, что объясняется отличным количеством параметров, учитываемых в том или ином методе расчете. Независимо от способа расчета теоретические вычисления продолжительности нагрева предоставляют лишь приближенные данные. Установление точного времени нагрева возможно лишь опытным путем для каждой детали в заданных условиях.

Экспериментальное измерение времени нагрева

Для осуществления экспериментального измерения времени нагрева к образцу крепятся две хромель-алюмелевых термопары, позволяющие измерять температуру на поверхности и в центре образца в процессе нахождения его в печи. Часть термопары, подвергаемая воздействию высоких температур, защищена фарфоровой соломкой. Остальная часть термопары покрыта полихлорвиниловой изоляцией. Общая длина термопары позволяет свободно перемещать опытный образец при посадке его в печь и выдачи из печи.

Второй конец термопар (холодный спай) через разъем подключается к медному проводнику, который в свою очередь подключается к гнездам АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Сигнал, полученный АЦП, обрабатывается программой LabVIEW 2011 и выводится на экран монитора.

Рисунок 2 демонстрирует рост температуры в течение 8,5-9 мин, после чего кривые выходят на плато, что говорит о том, что образец прогрелся до заданной температуры 850 °С. Обе кривые накладываются друг на друга, что подтверждает отсутствие перепада температур по сечению образца.

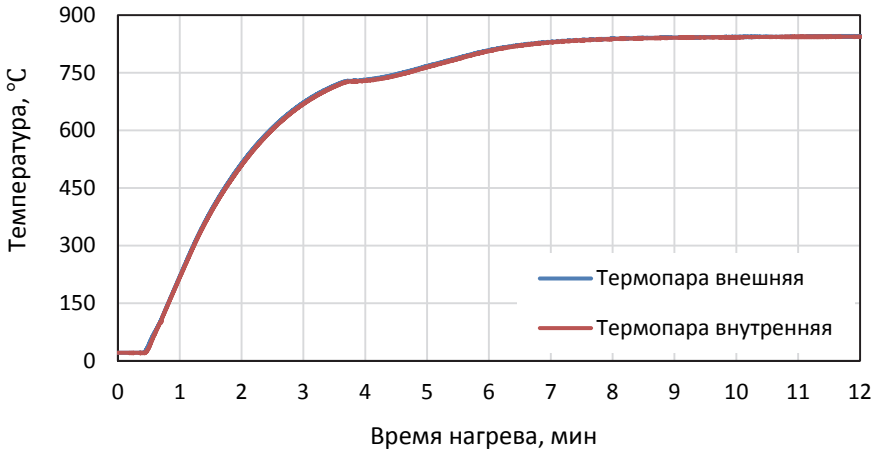


Рис. 2. Экспериментальное измерение времени нагрева

Заключение

Результаты эксперимента продемонстрировали возможность получения периода нагрева образца или изделия до заданной температуры опытным путем. Для исследуемого образца указанное время составило 9 мин. Результатом теоретического расчета с наименьшей погрешностью является время нагрева, полученное по методу [8] с учетом теплофизических характеристик образца. Большая погрешность теоретических расчетов подтверждает необходимость использования опытных данных для определения времени нагрева в случае ТО особо ответственных деталей.

Благодарности

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Новые материалы и технологии» КнАГУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Седов, Ю. Е. Справочник молодого термиста / Ю. Е. Седов. – Москва : Высшая школа, 1986. – 239 с.

2. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с.

3. Смольников, Е. А. Термическая обработка инструментов в соляных ваннах / Е. А. Смольников. – Москва: Машиностроение, 1981. – 271 с.

4. Лахтин, Ю. М. Термическая обработка в машиностроении : справочник / Ю. М. Лахтин. – Москва. Машиностроение, 1980. – 783 с.

5. Сапожник К. Р., Божоев И. Ч., Башков О. В. Влияние сверхмногоцикловой нагрузки на структуру и микротвёрдость стали 45 // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 1 (65). С. 116–122.

УДК 66-936
Золотов Алексей Валериевич студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zolotov Alexey Valerievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ СБОРА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НЕФТЕРАЗЛИВОВ В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ
DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR COLLECTING THIN-FILM OIL SPILLS IN A DISTILLATION COLUMN

Аннотация. Рассмотрена задача удаления тонкой пленки углеводородов, возникающей при малых утечках и нештатных стеканиях в дренажных узлах ректификационных колонн. Основной целью работы является разработка компоновки пленкосборного модуля, обеспечивающего селективный отбор углеводородной фазы при минимальном вовлечении воды и без вмешательства в контактные устройства колонны. В статье рассматривается конструктивная схема, включающая в себя концентратор пленки с олеофильным барабаном со скребковым съемом и накопитель. Получены расчетные оценки производительности при малой толщине пленки и сформулированы требования к материалам, приводу и режимам вращения, ориентированные на эксплуатацию в закрытом дренажном кармане сборника.
Abstract. The problem of removing a thin film of hydrocarbons that occurs with small leaks and abnormal drains in the drainage nodes of distillation columns is considered. The main purpose of the work is to develop an arrangement of a film collecting module that ensures selective selection of the hydrocarbon phase with minimal water involvement and without interfering with the contact devices of the column. The article discusses a design scheme that includes a film concentrator with an oleophilic drum with a scraper removal and a storage device. Calculated estimates of performance with a small film thickness are obtained and requirements for materials, drive and rotation modes are formulated, focused on operation in a closed drainage pocket of the collector..
Ключевые слова: ректификационная колонна, тонкая нефтяная пленка, дренажный карман, олеофильный барабан, скребковый съем, селективный отбор, слоп-линия.
Key words: distillation column, thin oil film, drain pocket, oleophilic drum, scraper removal, selective recovery, slop line.

Введение

Ректификация известна с начала XIX века как один из важнейших технологических процессов главным образом спиртовой и нефтяной промышленности. В настоящее время ректификацию во всем мире применяют в самых различных областях химической технологии, где выделение компонентов в чистом виде имеет существенное значение (в производствах органического синтеза, изотопов, полимеров, полупроводников и различных других веществ высокой чистоты).

В широкой области работ по ликвидации разливов нефти показано, что механический сбор, как и выбор типа оборудования, определяется физическими свойствами нефти и поведением пленки (в том числе рисками эмульгирования и ростом водосодержания). Эти вопросы системно рассматриваются в профильных обзорах и монографиях по методам локализации и сбору нефти и нефтепродуктов. В качестве прикладных решений для селективного извлечения углеводородной фазы широко описываются олеофильные скиммеры, в которых ремни, щетки, диски или барабаны удерживают нефть, а затем она удаляется скребками и перекачивается в накопитель [1,2].

При переходе от открытой водной поверхности к закрытым дренажным узлам колонн появляется специфика, слабо раскрытая в типовой литературе по разливам: ограниченное

пространство, требования к герметичности и обслуживанию, необходимость стабильного отбора при очень малой толщине слоя и без вмешательства в контактные устройства колонны. Отдельная ветвь публикаций по эксплуатации колонн указывает, что утечки с коллекторных устройств и подобные нарушения распределения жидкости способны ухудшать материальный и тепловой баланс аппарата, то есть создают предпосылки к нештатным стеканиям и росту нагрузки на дренаж. В частности, Д. Хэнсон, Дж. Браун Бёрнс и М. Тедерс рассматривают влияние протечек коллекторных устройств на работу колонн и подчеркивают важность контроля таких утечек для устойчивого режима.

Проблема, с которой связано данное исследование, возникает на стыке эксплуатации ректификационных колонн и задач предотвращения потерь нефтепродуктов: при малых утечках и нештатных стеканиях углеводородная жидкость может образовывать тонкую пленку в дренажных узлах (карман, закрытый сборник), где нередко присутствует водный конденсат. В результате формируется верхний тонкий слой углеводородов, который сложно отбирать устойчиво: объемы невелики, но явление повторяется, а вовлечение воды в откачиваемую смесь быстро увеличивает нагрузку на слоп-систему и ухудшает качество стоков. Один и тот же принцип действия ректификационной колонны используется как в относительно простых лабораторных приборах, так и в сложных промышленных установках нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, газовой, пивоваренной и других отраслей.

Работа направлена на разработку устройства для сбора тонкопленочных нефтеразливов в дренажной зоне ректификационной колонны.

Основная часть

Объектом проектирования принят узел дренажной зоны колонны (карман, закрытый сборник), в котором присутствуют: нижний водный слой (конденсат, промывная вода) и верхний слой углеводородов малой толщины. В качестве базового принципа отделения выбран механический селективный отбор на олеофильной вращающейся поверхности барабана, поскольку он допускает работу при малых притоках, обеспечивает съем углеводородов скребком и дает возможность вывести продукт в отдельный накопитель без сложных сепарационных аппаратов. Описание принципа олеофильного съема и скребкового удаления соответствует общим схемам, применяемым для олеофильных скиммеров [3].

Предложенная схема включает три функциональных узла:

1. пленочный концентратор (лоток, направляющий профиль), который собирает пленку с большей площади и подводит ее к зоне контакта с барабаном;
2. олеофильный барабан с приводом и скребковым съемом;
3. накопитель (буферная емкость малого объема) с отводом в слоп-линию насосом малой подачи.

Для первичной оценки производительности использована упрощенная математическая модель переноса слоя с поверхности барабана:

$$Q \approx 2\pi R\, L\, n\, h\, \eta, \qquad (1)$$

где Q— расход отобранной углеводородной фазы, м³/с; R— радиус барабана, м; L— длина барабана, м; n— частота вращения, с$^{-1}$; h— эквивалентная толщина слоя углеводорода, удерживаемого барабаном за оборот, м; η— коэффициент фактического съема (0…1), учитывающий проскальзывание, возврат жидкости и неполное снятие скребком.

В расчетах приняты ориентировочные габариты, совместимые с монтажом в закрытом кармане: $R = 0{,}15$ м, $L = 0{,}30$ м. Диапазон h выбран на основе типовых представлений о тонкой пленке и условий механического сбора, где упоминаются доли миллиметра и выше.

Результаты

Модуль устанавливается в дренажной зоне так, чтобы барабан частично погружался в верхний углеводородный слой, а скребок снимал налипшую фазу в сборный желоб, связанный с накопителем. Пленочный концентратор (лоток) размещается выше уровня раздела фаз и обеспечивает направленный подвод углеводородов к барабану при малых притоках (рис. 1).

По формуле (1) рассчитаны ориентировочные значения $\boldsymbol{Q}$ при $\boldsymbol{\eta = 0{,}7}$ и разных значениях $\boldsymbol{h}$ и частоты вращения. Перевод выполнен в м³/ч.

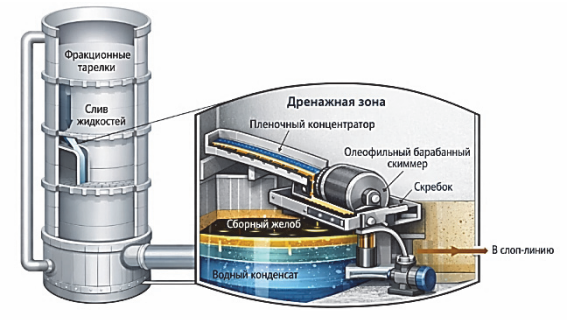


Рис. 1. Схема размещения пленкосборного модуля в дренажной зоне ректификационной колонны

Таблица 1

Оценка производительности модуля при $R = 0,15$ м, $L = 0,30$ м, $\eta = 0,7$

h, мм	n, rpm	Q, м³/ч
0,2	30	0,36
0,2	60	0,71
0,5	30	0,89
0,5	60	1,78
1,0	30	1,78
1,0	60	3,56

Таблица показывает ожидаемую линейную зависимость от h и n. Для условий тонкого слоя главная инженерная задача – не «разгон» вращения, а обеспечение устойчивого подвода пленки к барабану и предотвращение лишнего вовлечения воды, что решается геометрией концентратора и настройкой глубины погружения барабана.

Обсуждение результатов

Полученная компоновка сочетает селективный отбор и простую схему вывода продукта. Её отличие от решений для открытых водоемов состоит в ориентации на закрытый объем дренажного узла, где есть ограничения по месту, доступу при обслуживании и по герметичности. В качестве основы для понимания поведения тонкой нефтяной пленки и применимости механического сбора использованы сведения о диапазонах толщин и осложняющих факторах (эмульгирование, свойства нефти). Принцип олеофильного удержания нефти на вращающейся поверхности с последующим снятием скребком согласуется с описанием работы олеофильных скиммеров [4] и может быть реализован в компактном исполнении за счет барабана вместо щетки диска. Ограничение выполненной оценки служит для использования эквивалентной толщины h, которая в реальном узле зависит от вязкости, температуры, скорости вращения, состояния поверхности барабана и присутствия поверхностно-активных примесей. Поэтому значения в таблице 1 следует рассматривать как порядок величины для выбора типоразмера, а уточнение параметров требуется по данным эксплуатационных наблюдений и стендовых испытаний на конкретной паре углеводородов с водой.

Заключение

Предложена схема устройства для сбора тонкопленочных нефтеразливов в дренажной зоне ректификационной колонны, включающая пленочный концентратор, олеофильный барабан со скребковым съемом и буферный накопитель с выводом в слоп-линию. Выполнена расчетная оценка производительности по упрощенной модели переноса слоя, показывающая, что при малой толщине пленки работоспособность в первую очередь определяется организацией подвода пленки и настройкой погружения барабана, а не увеличением частоты вращения. Практическая ценность решения состоит в снижении попадания нефтепродуктов в водный контур дренажа и уменьшении потерь продукта при малых, но повторяющихся утечках. Дальнейшая работа должна быть связана с экспериментальной калибровкой коэффициента η и установлением допустимых режимов вращения для типовых фракций и температур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Ашихмина, Т. В. Особенности ликвидации аварийных разливов нефти при ее добыче с точки зрения охраны окружающей среды / Т. В. Ашихмина, Т. В. Овчинникова, М. В. Скрынникова // Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях : межвузовский сборник научных трудов / Воронежский государственный технический университет. Том Часть 1. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2012. – С. 158-162. – EDN BFSSES.
2. Ашихмина, Т. В. Анализ современных технологий и средств ликвидации аварийных разливов нефти / Т. В. Ашихмина, С. А. Гладков, П. С. Агупов // Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях : межвузовский сборник научных трудов / Воронежский государственный технический университет. Том Часть 1. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2007. – С. 101-105. – EDN AUSCHS.
3. Оценка эффективности средств для ликвидации аварийных разливов нефти при пересечении магистральными трубопроводами водных преград / Р. Х. Идрисов, К. Р. Идрисова, Р. С. Резбаева, М. Г. Беспалов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 2. – С. 407-424. – EDN STGYDT.
4. Бочарников, А. В. Дисковый скиммер для сбора тонких пленок нефтеразливов / А. В. Бочарников // Водоочистка. – 2013. – № 6. – С. 68-70. – EDN PZVQTD.

УДК 621.565
Золотовский Владимир Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zolotovsky Vladimir Yurievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
INCREASING THE EFFICIENCY OF REPAIR WORK OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные подходы к повышению эффективности технического обслуживания и ремонта теплообменного оборудования, широко применяемого в энергетической, нефтехимической и пищевой промышленности. Анализируются основные причины снижения производительности теплообменников, такие как образование отложений и коррозионное воздействие. Предлагается комплекс мероприятий по совершенствованию ремонтного цикла, включающий внедрение методов неразрушающего контроля, применение современных способов очистки (гидродинамических и химических) и использование защитных покрытий. Большее внимание уделяется переходу от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому техническому состоянию на основе цифрового мониторинга.
Abstract. This article discusses current approaches to improving the efficiency of maintenance and repair of heat exchange equipment, which is widely used in the energy, petrochemical, and food industries. It analyzes the main causes of reduced heat exchanger performance, such as the formation of deposits and corrosion. The article proposes a set of measures to improve the repair cycle, including the implementation of non-destructive testing methods, the use of modern cleaning techniques (hydrodynamic and chemical), and the application of protective coatings. The article also emphasizes the transition from scheduled maintenance to condition-based maintenance based on digital monitoring.
Ключевые слова: теплообменное оборудование, ремонтные работы, техническое обслуживание, коррозия, отложения, гидродинамическая очистка, диагностика, энергоэффективность.
Keywords: heat exchange equipment, repair work, maintenance, corrosion, deposits, hydrodynamic cleaning, diagnostics, energy efficiency.

Введение

Теплообменное оборудование является важнейшим элементом технологических процессов на промышленных предприятиях. Его эффективность определяет как энергозатраты производства, так и качество выпускаемой продукции. В ходе эксплуатации теплообменники испытывают серьёзные нагрузки при воздействии агрессивных сред, высоких температур и давлений, что ведёт к ухудшению их рабочих характеристик.

Согласно современной статистике на текущий момент, расходы на очистку, а также ремонт теплообменников достигают 15-20 % от общих затрат на обслуживание предприятия в целом. Оптимизация ремонтных работ позволяет не только увеличивать срок службы довольно дорогостоящего оборудования, но и сокращает также потери тепловой энергии, которые возникают из-за термического сопротивления различных отложений [1].

Основная часть

Эффективность работы теплообменного (кожухотрубчатого, пластинчатого или секционного) аппарата снижается вследствие воздействия ряда факторов. К наиболее критическим факторам относят:

- образование отложений (фулинг), таких как солевые отложения, накипь, биологические обрастания, а также коксование продуктов. Эти слои отложений толщиной в 1 мм могут способствовать снижению коэффициента теплопередачи примерно на 30-40 %;

- коррозионный износ, в которых входит питтинговая, щелевая, межкристаллитная коррозия стенок трубок, а также пластин, которая в свою очередь приводит к смешиванию сред и к аварийным остановкам работы;

- образование эрозии, которая является механическим износом поверхностей в зонах высокой турбулентности потока;

- нарушение герметичности влечет за собой разгерметизацию узлов крепления трубок в трубных решетках. Также возможно старение уплотнений в пластинчатых аппаратах из данного фактора.

Традиционная система планово-предупредительных ремонтов (ППР) чаще всего не учитывает реальное текущее состояние оборудования, что приводит либо к избыточным работам, или же к резким отказам. Для повышения эффективности предлагается классификация современных методов воздействия, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов повышения эффективности эксплуатации теплообменников

Метод	Описание	Преимущества	Недостатки
Гидродинамическая очистка	Удаление отложений струями воды под высоким давлением (до 1500 бар)	Экологичность, высокая скорость, отсутствие повреждения металла	Требует специализированного оборудования и больших объемов воды
Химическая автоматическая безразборная мойка (CIP)	Циркуляция активных реагентов внутри аппарата	Возможность очистки без разборки, удаление стойких солевых отложений	Риск коррозии при неправильном подборе реагентов, проблема утилизации химии
Ультразвуковая диагностика и очистка	Использование УЗ-волн для выявления дефектов и разрушения структуры накипи	Высокая точность диагностики, возможность автоматизации	Сложность применения на крупногабаритных аппаратах
Применение защитных покрытий	Нанесение полимерных или керамических слоев на внутренние поверхности	Снижение адгезии отложений, защита от коррозии	Ограничение по температуре эксплуатации, возможное снижение теплопроводности

Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение систем интеллектуального мониторинга. Установка датчиков давления, датчиков температуры на входе и вы-

ходе каждого контура позволяет в режиме реальном времени рассчитывать текущий коэффициент теплопередачи. При достижении критического порога система сигнализирует о необходимости проведения очистки, реализуя стратегию «ремонт по состоянию» [2].

На рис. 1 представлена схема узла теплообменного аппарата, оснащенного системой контроля параметров для ранней диагностики неисправностей.

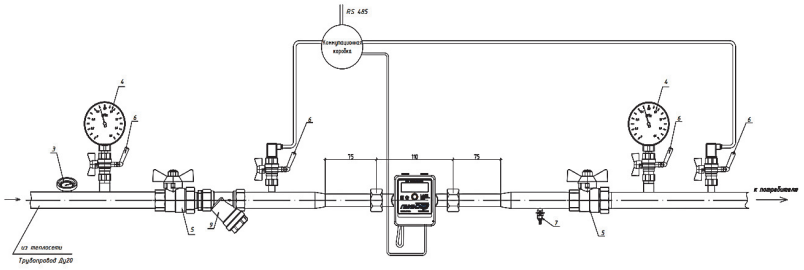


Рис. 1. Схема теплообменного узла с контрольно-измерительными приборами

На рис. 2 приведены обозначения к схеме теплообменного узла с контрольно-измерительными приборами.

При проведении ремонтных работ критически важно правильно выбрать метод очистки. Для трубных пучков нефтеперерабатывающих заводов наиболее эффективной признана комбинированная очистка, а именно, механическое удаление твердых пробок с последующей гидродинамической промывкой.

Применение современных ингибиторов коррозии при химической очистке позволяет снизить потерю массы металла труб на 95-98 %. Также доказано, что использование электрогидроимпульсного метода (ЭГИ) эффективно разрушает накипь в труднодоступных местах теплообменников сложной конфигурации, где механические способы бессильны [3].

В процессе ремонта эффективность может быть повышена не только восстановлением исходного состояния, но и частичной модернизацией, например:

- замена латунных трубок на титановые или нержавеющие в зонах с высокой коррозионной активностью;
- использование турбулизаторов (вставок внутри трубок), которые увеличивают скорость потока и препятствуют оседанию частиц;
- применение современных графитовых или спирально-навитых прокладок для обеспечения герметичности при температурных деформациях [4].

Поз.	*Наименование и техническая характеристика оборудования и материалов, завод-изготовитель (для импортного оборудования – страна, фирма)*
1	*2*
	Приборы и средства автоматизации
	Шкаф
	Автоматический выключатель 4А
1	Теплосчетчик ультразвуковой « Пульсар» Ду15; qp=0,6 м3/час; 1 расходомер; Tmax=150º С; формула расчета тепла №4; RS485; МПИ 6 лет
2	GPRS модем или Преобразователь RS232/RS485-Ethernet (1 порт RS485, 1 порт RS 232)
	Антенна "АНТЕЙ-906" SMA 13,5 dBi; крепление магнит
	Источник питания ИП-12
	Оборудование
3	Термометр технический, биметаллический, показывающий
4	Манометр G1/2 1,6 МПа, 150 º С
5	Кран шаровый муфтовый Ду 20 РУ16, 150 º С, 1,6 Mпа
6	Кран трехходовой шаровый муфтовый латунный (с краном Маевского) Ду15 Ру16 225 º С, 1,6 Mпа
7	Кран шаровый Ду 15 РУ16, 150 º С, 1,6 Mпа
8	Коммутационная коробка
9	Фильтр Ду 20 РУ16, 150 º С
10	Муфта переходная 20х15

Рис. 2. Обозначения к схеме теплообменного узла с контрольно-измерительными приборами

Заключение

Эффективность ремонтных работ теплообменного оборудования достигается за счет комплексного подхода, который включает в себя своевременную диагностику. Данный подход достигается также за счет применения высокотехнологичных методов очистки и использования современных материалов. Переход от жестких графиков ППР к обслуживанию по фактическому техническому состоянию на основе мониторинга теплофизических показателей позволяет сократить простои оборудования на 15–20 % и снизить затраты на энергоресурсы. Внедрение предложенных методов обеспечивает надежность работы промышленных систем и существенно повышает общую область эксплуатации теплоэнергетического хозяйства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1 Корнеев, С. Д. Конструирование и расчет рекуперативного теплообменника: Учебно-методическое пособие / С. Д. Корнеев, И. Л. Савельев, В. С. Тимохин. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Московский политехнический университет, 2024. – 110 с. – ISBN 978-5-276-02908-5. – EDN PZJCLR.

2 Кунтыш, В. Б. Кожухотрубные теплообменные аппараты (расчет и конструирование) : справочное пособие / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалеев. – Санкт-Петербург : Издательство "Недра", 2014. – 262 с. – ISBN 978-5-905153-38-8. – EDN XQBFBR.

3 Медведева, М. Л. Последние достижения в области защиты от коррозии нефтезаводского оборудования (по материалам работы секции "Коррозия и защита нефтезаводского оборудования" Международного коррозионного конгресса EUROCORR'2010) / М. Л. Медведева // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. – 2010. – № 4(37). – С. 24-29. – EDN NCMHYB.

4 Иванов, Б. Г. Применение инновационных уплотнительных материалов в соединениях трубопроводов / Б. Г. Иванов, А. И. Разговоров, Д. Н. Шмонин // Актуальные проблемы морской энергетики : Материалы девятой Международной НТК, Санкт-Петербург, 20–21 февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный морской технический университет", 2020. – С. 501-503. – EDN VHZGUU.

УДК 620.193.5

Зуева Виталия Михайловна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zueva Vitalia Mikhailovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Кравченко Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kravchenko Elena Genadievna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ В ОБОРУДОВАНИИ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ
INVESTIGATION OF METAL CORROSION CONTROL METHODS IN OIL REFINING EQUIPMENT

Аннотация. Работа посвящена всестороннему исследованию и оценке актуальных способов противодействия коррозии металлических компонентов, используемых в оборудовании нефтеперерабатывающих заводов. Выявлены ключевые виды коррозионных разрушений, присущие разнообразным производственным установкам НПЗ, такие как коррозия, вызываемая нафтенами, разрушение под слоями осадка и охрупчивание вследствие воздействия водорода. Идентифицированы высокоэффективные и передовые стратегии коррозионной защиты, включающие подбор материалов с повышенной стойкостью к агрессивным средам, нанесение защитных покрытий, применение ингибирующих составов, электрохимические методы предотвращения коррозии и её диагностику. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода по управлению коррозией, сочетающего превентивные меры, активную

защиту и постоянный мониторинг для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации оборудования.
Abstract. The presented work is devoted to a comprehensive study and assessment of current methods of countering corrosion of metal components used in equipment of oil refineries. Key types of corrosion damage inherent in various refinery production units were identified, such as corrosion caused by naphthenes, destruction under sediment layers and embrittlement due to hydrogen exposure. Highly effective and advanced corrosion protection strategies have been identified, including the selection of materials with increased resistance to aggressive media, the application of protective coatings, the use of inhibitory compositions, electrochemical methods for preventing corrosion and its diagnosis. It was concluded that a comprehensive corrosion management approach combining preventive measures, active protection and continuous monitoring is necessary to ensure reliable and safe operation of the equipment.
Ключевые слова: коррозия металлов, нефтепереработка, методы контроля коррозии, защитные покрытия, ингибиторы коррозии, мониторинг коррозии, коррозионностойкие материалы.
Key words: metal corrosion, oil refining, corrosion control methods, protective coatings, corrosion inhibitors, corrosion monitoring, corrosion resistant materials.

Введение

Нефтеперерабатывающая промышленность является одной из ключевых отраслей мировой экономики, обеспечивающей производство широкого спектра топлива и химического сырья. Однако, в процессе переработки нефти и газа, оборудование постоянно подвергается воздействию агрессивных сред, что приводит к интенсивному коррозионному износу металлов. Коррозия является одной из основных причин аварий, простоев, снижения эффективности производства и значительных экономических потерь на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ). По оценкам экспертов, ежегодные потери от коррозии в мировой промышленности составляют миллиарды долларов, значительная часть которых приходится на нефтегазовый сектор. Проблема коррозии в нефтепереработке усложняется разнообразием коррозионных механизмов, обусловленных сложным химическим составом сырой нефти (наличие сернистых соединений, нафтеновых кислот, хлоридов, воды), высокими температурами и давлениями, а также спецификой технологических процессов. Среди наиболее часто встречающихся форм разрушения материалов выделяется высокотемпературная, серная, нафтеновая, подшламовая и хлоридная коррозия. Каждый из упомянутых типов коррозии нуждается в индивидуально разработанных стратегиях для контроля и нейтрализации.

Анализ научной литературы показал, что в настоящее время происходит активная разработка инновационных материалов, а также совершенствование существующих технологий защиты и систем мониторинга [1-5]. Однако, несмотря на значительные достижения, проблема остается актуальной, особенно в контексте переработки более тяжелых и высокосернистых сортов нефти, а также ужесточения экологических требований и требований к безопасности. Актуальной остается потребность в систематизации и сравнительном анализе существующих методов контроля коррозии с учетом их комплексного применения и экономической целесообразности в различных условиях эксплуатации НПЗ.

Результаты анализа методов защиты от коррозии

Наиболее значительными видами коррозии в нефтепереработке являются:

1) высокотемпературная сульфидная коррозия, она вызывается сероводородом и другими сернистыми соединениями при высоких температурах (выше 230 °С).

2) нафтеновая коррозия, которая обусловлена нафтеновыми кислотами при температурах 200-400 °С, особенно при высоких скоростях потока.

3) эрозионно-коррозионный износ, т.е. комбинированное воздействие механического износа и химической коррозии.

4) хлоридная коррозия, вызываемая хлоридами (хлороводородом) в присутствии воды, особенно в зонах конденсации.

5) коррозия под отложениями – она возникает под слоями ранних продуктов коррозии, солей или кокса, создавая локальные анодные и катодные зоны.
6) водородное охрупчивание и растрескивание, которое связано с проникновением атомарного водорода в металл, особенно в присутствии H_2S.

Анализ методов защиты от коррозии выявил наиболее прогрессивные.

1. Выбор коррозионностойких материалов. Использование легированных сталей (например, хромомолибденовых, нержавеющих) и сплавов (никелевых, титановых) является фундаментальным методом. Преимущества: высокая собственная стойкость к агрессивным средам, долговечность. Недостатки: высокая стоимость, сложность обработки, не всегда эффективны против всех видов коррозии.

2. Защитные покрытия. Применяются для изоляции поверхности металла от агрессивной среды. *Органические покрытия*: эпоксидные, полиуретановые, фенольные смолы. Преимущества: относительная дешевизна, простота нанесения, хорошая адгезия. Недостатки: ограниченная термостойкость, механическая уязвимость, необходимость тщательной подготовки поверхности. *Неорганические/металлические покрытия*: футеровка, плакирование, напыление (например, керамика, сплавы). Преимущества: высокая термостойкость, химическая стойкость, механическая прочность. Недостатки: высокая стоимость, сложность нанесения, риск повреждения при эксплуатации.

3. Ингибиторы коррозии. Химические вещества, добавляемые в технологическую среду для замедления или предотвращения коррозии. Типы: аминные, фосфатные, азотсодержащие соединения. Принцип действия: образование защитной пленки на поверхности металла, изменение потенциала, связывание коррозионно-активных компонентов. Преимущества: гибкость применения, возможность защиты труднодоступных участков, низкие капитальные затраты. Недостатки: необходимость постоянного дозирования, потенциальное влияние на качество продукта, экологические аспекты, эффективность зависит от состава среды.

4. Электрохимические методы защиты. *Катодная защита* используется продления срока службы подземных трубопроводов, резервуаров. Преимущества: высокая эффективность, возможность защиты больших поверхностей. Недостатки: необходимость внешнего источника тока или жертвенных анодов, контроль потенциала, риск перезащиты. *Анодная защита* используется реже, в основном, для пассивирующихся металлов в определенных средах.

5. Мониторинг коррозии. Это системы для непрерывного или периодического контроля скорости коррозии и состояния оборудования. Методы: коррозионные купоны, электрическое сопротивление, линейная поляризация, ультразвуковой контроль, акустическая эмиссия, эндоскопия. Преимущества: раннее обнаружение проблем, оптимизация режимов защиты, прогнозирование остаточного ресурса. Недостатки: высокая стоимость некоторых систем, необходимость калибровки, интерпретация данных.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ демонстрирует, что проблема коррозии в нефтеперерабатывающей промышленности является разнообразной и требует комплексного подхода. Ни один из рассмотренных методов контроля коррозии не является универсальным и не может обеспечить полную защиту оборудования во всех условиях эксплуатации.

Выбор коррозионностойких материалов является наиболее фундаментальным, но и самым капиталоемким решением. Его применение оправдано для критически важных узлов и оборудования, работающего в наиболее агрессивных средах (например, реакторы гидроочистки, колонны первичной перегонки). Даже наиболее прочные металлические сплавы не застрахованы от специфических форм разрушения, таких как химическая коррозия или износ, особенно при воздействии экстремальных факторов.

В качестве альтернативы, *защитные покрытия* предоставляют более адаптируемое и зачастую экономически целесообразное решение, позволяющее обезопасить обширные площади. Результативность таких покрытий в значительной степени определяется качеством подготовки обрабатываемой поверхности, корректностью выполнения работ по нанесению и

условиями последующей эксплуатации. Серьезными недостатками остаются высокая уязвимость к механическим повреждениям и деградация под воздействием повышенных температур и агрессивных химических веществ. Перспективным направлением является разработка «интеллектуальных» покрытий, обладающих способностью к самовосстановлению или оснащенных индикаторами дефектов.

Ингибиторы коррозии являются оперативным и сравнительно бюджетным методом для защиты внутренних поверхностей труб и технологического оборудования, особенно в условиях непрерывного потока. Их действенность напрямую зависит от верного выбора ингибитора, поддержания оптимальной концентрации и непрерывного контроля состава рабочей среды. Важно учитывать экологические последствия и возможное влияние на характеристики конечного продукта, что требует тщательного отбора и всестороннего тестирования.

Электрохимические методы, и в первую очередь катодная защита, продемонстрировали высокую степень эффективности при охране наружных поверхностей подземных конструкций и емкостей. Тем не менее, спектр их применения ограничен определенными видами оборудования и условиями окружающей среды.

Таким образом, анализ и контроль коррозионных процессов имеет первостепенное значение в современной общей системе предотвращения коррозии. Он не предотвращает коррозию напрямую, но предоставляет ценную информацию о ее скорости и локализации, позволяя своевременно принимать корректирующие меры, оптимизировать режимы защиты и планировать ремонтные работы. Интеграция онлайн-мониторинга с системами управления производством является ключевым элементом для проактивного управления рисками.

Системный подход. Эффективная стратегия контроля коррозии заключается в комбинировании нескольких методов. Например, использование коррозионностойких материалов для основных конструкций в сочетании с ингибиторами для защиты поточных систем, защитными покрытиями для резервуаров и постоянным мониторингом для оценки эффективности всех мер. Такой подход позволяет минимизировать риски, оптимизировать затраты и обеспечить максимальную надежность и безопасность эксплуатации оборудования НПЗ.

Новизна и практическая значимость работы заключаются в обобщении современных подходов и подчеркивании необходимости перехода от разрозненных мер к интегрированным системам управления коррозией. Особое внимание уделено важности непрерывного мониторинга, который позволяет не только оценивать эффективность применяемых методов, но и прогнозировать остаточный ресурс оборудования, предотвращая аварии и оптимизируя затраты на обслуживание. *Ограничения исследования* связаны с его обзорным характером; оно не включает экспериментальных данных, полученных в реальных условиях эксплуатации НПЗ. Оптимальный выбор и настройка методов защиты всегда требуют детального анализа конкретного объекта и среды.

Рекомендации и направления дальнейших исследований:

1) разработка и внедрение интеллектуальных систем мониторинга коррозии на основе искусственного интеллекта и машинного обучения для более точного прогнозирования и оперативного реагирования;

2) применение и исследование новых поколений ингибиторов коррозии с улучшенными экологическими характеристиками и более широким спектром действия;

3) разработка и тестирование инновационных защитных покрытий, обладающих повышенной стойкостью к агрессивным средам, абразивному износу и способностью к самовосстановлению;

4) экономическая оценка эффективности комплексных стратегий защиты от коррозии с учетом жизненного цикла оборудования;

5) изучение влияния новых переработок более тяжелых и высокосернистых сортов нефти на коррозионные процессы и адаптация существующих методов защиты.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что коррозия металлов остается одной из наиболее серьезных проблем в нефтеперерабатывающей промышленности, требующей по-

стоянного внимания и применения комплексных решений. Систематизация и анализ различных методов контроля коррозии показали, что каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, и выбор оптимальной стратегии защиты должен основываться на специфике технологического процесса, составе агрессивной среды, температурных режимах и экономических факторах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Межевич, Ж. В. Коррозия и методы защиты от коррозии / Ж. В. Межевич, А. Ф. Дресвянников. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2024. – 112 с. – ISBN 978-5-7882-3535-6. – EDN EGIJLI.

2. Лестев, А. Е. Защита нефтегазового оборудования ингибиторами коррозии. Методы испытаний эффективности и физико-химических параметров ингибиторов коррозии : Учебно-методическое пособие / А. Е. Лестев, Я. В. Ившин. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. – 92 с. – ISBN 978-5-7882-3192-1. – EDN IYKBOQ.

3. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор) Часть 3. Коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов / А. Б. Лаптев, Л. И. Закирова, О. А. Загорских, М. Р. Павлов // Труды ВИАМ. – 2022. – № 6(112). – С. 138-149. – DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-6-138-149. – EDN GRXFHZ.

4. Бурлов, В. В. Методы защиты от коррозии установок переработки нефти при эксплуатации в различных режимах : специальность 05.17.07 "Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ", 05.17.14 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бурлов Владислав Васильевич. – Санкт-Петербург, 2000. – 601 с. – EDN QDHGLV.

УДК 665.656.2

И Андрей Станиславович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
I Andrey Stanislavovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Проценко Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Protsenko Alexander Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРА ИЗОМЕРИЗАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ
STUDY OF AN IONIC LIQUID-BASED HYDROCARBON ISOMERIZATION CATALYST

Аннотация. В работе приводятся экспериментальные данные исследования изомеризация н-гексана в присутствии ионной жидкости (ИЖ) синтезированной из безводного хлорида алюминия и 3-этиламин гидрохлорида в мольном соотношении 2:1. Исследовано влияние времени, температуры на эффективность изомеризации в присутствии ИЖ. Результативность изомеризации оценивалась по данным анализа изомеризата методом газовой хроматографии.
Abstract. The paper presents experimental data on the isomerization of n-hexane in the presence of ionic liquid (IL) synthesized from anhydrous aluminum chloride and 3-ethylamine hydrochloride in a molar ratio of 2:1. The effect of time and temperature on the efficiency of isomerization in the IL presence was studied. The effectiveness of isomerization was evaluated based on the analysis of the isomerate using gas chromatography.

Ключевые слова: изомеризация, катализатор, ионная жидкость, н-гексан, хлорид алюминия.
Key words: isomerization, catalyst, ionic liquid, n-hexane, aluminum chloride.

Введение

Каталитическая изомеризация н-алканов в изоалканы является важной технологией переработки нефти. Легкая прямогонная нафта с ограниченным количеством разветвленных изомеров С5 и С6 обладает чрезвычайно низким октановым числом (ОЧ). Упомянутые

нефтяные фракции могут быть изомеризованы в компоненты для смешивания бензина. Например, ОЧ н-пентана составляет 61,8, в то время как ОЧ 2-метилбутана составляет 92, а для 2,2-диметилпропана - 85. Высокое ОЧ позволяет снизить интенсивность детонации и улучшить характеристики двигателя.

В настоящее время промышленными катализаторами изомеризации являются бифункциональными катализаторы, представляющие собой твердые кислоты, обогащенные переходными металлами.[3] Преимущества этих катализаторов заключаются в низкой интенсивности побочных реакций и хорошей селективности.[3] Однако у них есть недостатки, такие как высокая стоимость из-за использования ценных металлов, большие капиталовложения из-за необходимого использования водорода и высокая температура для цеолитных катализаторов на основе Pt.

Существует серьезный стимул для разработки новых катализаторов для изомеризации обычных парафинов. Эти катализаторы включают цеолиты с добавлением Pt или Ni, сульфатированный диоксид циркония на основе металлов, диоксид циркония на оксиде вольфрама, гетерополикислоты и др.[1]. Необходимый катализатор изомеризации является экологически чистым и работает при низких температурах реакции. В последние годы ионные жидкости широко исследуются в качестве новых реакционных сред или катализаторов [2]. Изомеризацию обычных парафинов также можно катализировать ионными жидкостями. По сравнению с промышленными бифункциональными катализаторами ионные жидкие катализаторы обладают такими преимуществами, как низкая температура реакции, отсутствие образования кокса и низкие эксплуатационные затраты, поскольку им не требуется водород [2].

Целью данной работы является исследование влияния ионной жидкости на н-гексан в процессе изомеризации.

Материалы и методы

Синтез ионной жидкости. Используемая посуда: бюкс, мешалка, фарфоровая чашка, просушенная в печке 1 час при 100ºС для удаления влаги (в дальнейшем посуда остывала в эксикаторе, чтобы не впитывала влагу). В бюкс добавляли триэтиламин гидрохлорид (0,0218 М, 0,3 г) и ставили на магнитную мешалку с нагревом, после чего постепенно добавляли безводный хлорид алюминия (0,00436 М; 0,5818 г). Смесь перемешивали при комнатной температуре, затем нагревали до 35ºС для растворения оставшихся агломератов. ИЖ готова к использованию, когда смесь становится гомогенной (жидкость желтого цвета).

Эксперименты по изомеризации. Для моделирования процесса изомеризации использовали тефлоновый вкладыш, в который приливали н-гексан и ИЖ. Соотношение катализатора к сырью составило 1:1. Тефлоновый вкладыш помещали в реактор из нержавеющей стали, после чего ставили его в печь. Изомеризацию проводили при 80ºС и различном времени выдержки: 1 ч, 2 ч, 5 ч. По окончанию эксперимента реактор вынимали из печи и охлаждали водой. Пробу жидкого продукта анализировали методом газовой хроматографии.

Аналитическое оборудование. Анализ проводили с помощью газового хроматографа GC-2010 Plus фирмы Shimadzu, снабженного капиллярной колонкой Petrocol DH 100·0,2 [2].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1-3 представлены хроматограммы н-гексана и изомеризатов, полученных в результате обработки в течение 2 ч и 5 ч при 80 ºС.

На рис. 1, пик н-гексана соответствует времени удерживания 16,556 мин. Общее содержание н-гексана в пробе составляет 99%. Концентрации компонентов определяли по площади пика, отнесенного к площади пиков всех веществ.

По данным хроматографического анализа установлено, что в пробах изомеризата также присутствует пик н-гексана. Однако интенсивность и площадь этого пика снижается, что свидетельствует о его расходовании в течение процесса изомеризации. В пробах изомеризата появляются новые пики, соответствующие 2,2-диметилбутану (время удерживания 12,035 мин), а также изобутану (время удерживания 7,5 мин) и изопентану (время удержания 9,5 мин) – продуктам параллельного изомеризации процесса крекинга.

По данным, представленным на хроматограмме (рис. 3), концентрация н-гексана составила 71% при изомеризации в течении 5 ч. Проведение процесса изомеризации в присутствии ИЖ уже в течение меньшего времени способствовало снижению концентрации н-гексана (на 11% за 1 ч и на 12 % за 2 ч).

На рис. 4 представлен график снижения концентрации н-гексана в изомеризате от длительности процесса. Данные эксперимента демонстрируют практически линейное снижение содержания исходного компонента в изомеризате, что может свидетельствовать о полном насыщении всех активных центров катализатора ввиду высокой концентрации реагента (нулевой порядок реакции). Скорость реакции лимитируется не адсорбцией молекулы алкана на поверхности катализатора, а последующей ей стадией изомеризации на поверхности. Такое состояние достигается весьма редко и лишь в узких условиях, более часто реакция изомеризации алканов подчиняется кинетическому уравнению первого порядка (экспоненциальный характер кривой с насыщением).

При существенном снижении концентрации н-гексана скорость изомеризации будет уменьшаться, тогда процесс выйдет на типичный режим работы промышленных реакторов с рециклом. При этом вид аналитической зависимости «концентрация реагента – время» может сильно усложниться ввиду побочных реакций и сложных смесей, и ее описание потребует эмпирических моделей.

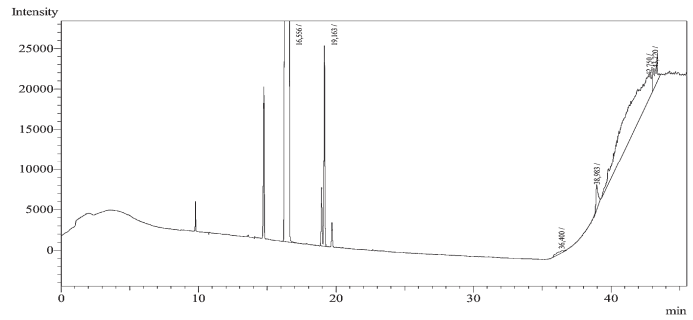


Рис. 1. Хроматограмма н-гексана

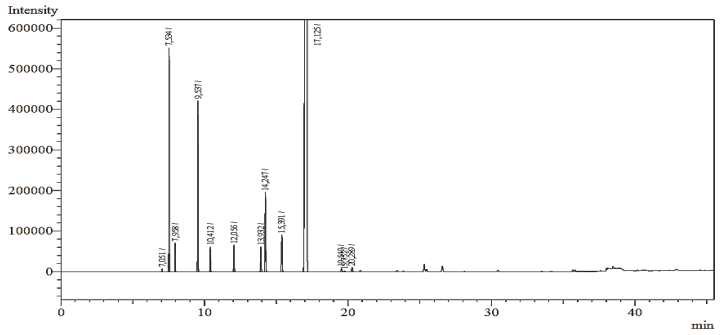


Рис. 2. Хроматограмма изомеризата после 2 ч

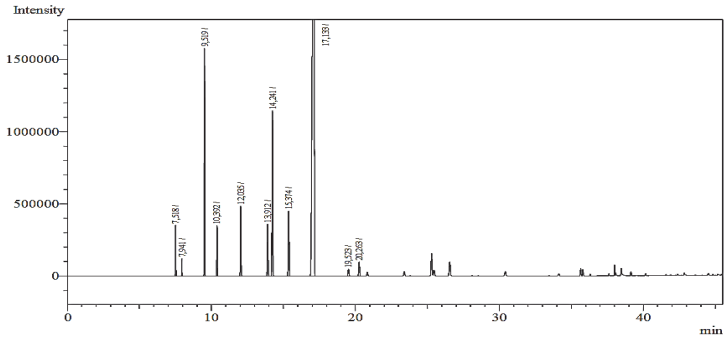


Рис. 3. Хроматограмма изомеризата после 5 ч

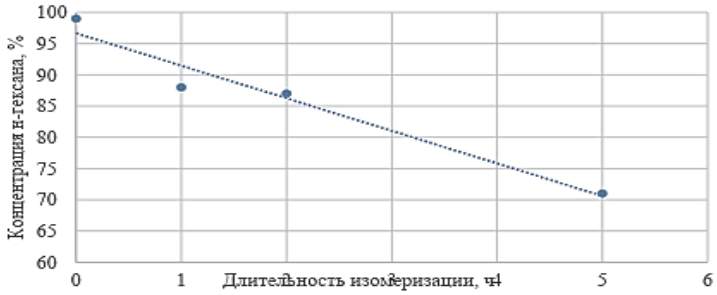


Рис. 4. Зависимость концентрации н-гексана в изомеризате в зависимости от длительности процесса

Заключение

Рассматриваемая ИЖ на основе безводного хлорида алюминия и 3-этиламин гидрохлорида в мольном соотношении 2:1 может быть использована как катализатор для изомеризации н-гексана, так как способствует конверсии н-гексана в изомеризат. Для 5 ч конверсия н-гексана составила 29%. Временной режим 1 ч и 2 ч показали практически одинаковую конверсию.

В дальнейшем может представлять интерес исследование низкотемпературной изомеризации с альтернативными солями ($SnCl_2$, $ZnCl_2$ и др.).

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шакун, А.Н. Эффективность различных типов катализаторов и технологий изомеризации легких бензиновых фракций / А.Н. Шакун, М.Л. Фёдорова // Катализ в промышленности. – 2014 – № 5 – С. 29–37. – EDN: SNJQUX.

2. Бурдакова, Е. С. Каталитическая изомеризация углеводородов в присутствии модифицированных ионных жидкостей : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.17.07 / Бурдакова Екатерина Сергеевна; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. — Уфа, 2017. — 184 с. – EDN UDWALI.

3. Биметаллические катализаторы изомеризации алканов / Y. H. Khalaf, B. Y. Sherhan, Z. M. Shakor, F. Al-Sheikh // Современные молекулярные сита. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 134-149. – DOI 10.53392/27130304_2023_5_2_134. – EDN QBJGEW.

УДК 665.63

Капранчук Эдгард Витальевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kapranchuk Edgard Vitalievich, student, Komsomolsk- na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РЕКОНСТРУКЦИЯ КОЛОННЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ НЕФТИ
RECONSTRUCTION OF THE PRIMARY OIL TREATMENT COLUMN

Аннотация. В представленной статье рассматривается возможности реконструкции колонны первичной обработки нефти, которая является основным элементом нефтеперерабатывающих заводов. В работе проанализированы распространенные проблемы, которые возникают при эксплуатации колонн первичной обработки нефти – это коррозия, износ, снижение сепарационной эффективности. Также в статье предложены современные технологические решения по реконструкции колонн, в том числе замену внутренних устройств, применение новых

материалов, оптимизация технологических режимов. В работе основной акцент идет на экономический аспект реконструкции, таких как оценка затрат, предполагаемый экономический эффект от внедрения предлагаемых мероприятий.

Abstract. The presented article discusses the reconstruction of primary treatment columns, which is the main element of oil refineries. The paper analyzes common problems that arise during the operation of primary oil treatment columns, such as corrosion, wear, and reduced separation efficiency. The article also offers modern technological solutions for the reconstruction of columns, including the replacement of internal devices, the use of new materials, and optimization of technological modes. The work focuses more on the economic aspects of reconstruction, such as cost estimates and the expected economic impact of the proposed measures.

Ключевые слова: колонна, реконструкция, нефтепереработка, сепарационная эффективность, коррозия, насадки, тарелки, экономическая эффективность.

Key words: crude, reconstruction, oil refining, separation efficiency, corrosion, packings, trays, economic efficiency.

Введение

Колонны первичной обработки нефти являются очень важным элементом, а также дорогим для нефтеперерабатывающего завода. Они выполняют главную функцию разделения нефти на фракции, которые в дальнейшем используются в производстве различных нефтепродуктов. С течением времени, в процессе эксплуатации колонны первичной обработки нефти подвергаются воздействию агрессивных сред, высокой температуры, давления, что в свою очередь приводит к коррозии, износу и снижению эффективности колонн. Вовремя проведенная, а также качественная реконструкция колонн необходима для стабилизации и эффективности работы НПЗ, а также для увеличения качества выпускаемой продукции производств [1].

Основная часть

Выделим основные проблемы, которые возникают при эксплуатации колонн первичной обработки нефти (таблица 1).

При очень длительной эксплуатации колонн могут возникать следующие проблемы:

– под воздействием агрессивных сред происходит коррозионное разрушение металла корпуса колонны и ее внутренних устройств, что в свою очередь приводит к уменьшению прочности, а также герметичности;

– под влиянием постоянного потока жидкости и пара может возникать механический износ внутренних устройств колонны, что может привести к пониженной сепарационной эффективности;

– образуются отложения на внутренних поверхностях колонны, а также на внутренних устройствах;

– изношенные конструкции колонн первичной обработки нефти могут не обеспечивать должный уровень разделения нефти, а также не соответствовать текущим современным стандартам в области энергоэффективности, экологической безопасности;

– при увеличении спроса на нефтепродукты может привести к необходимости увеличения пропускной способности колонн.

Таблица 1

Характеристика основных элементов колонн первичной обработки нефти

Характеристика	Значение
Диаметр колонны	4-10 м
Высота колонны	20-50 м
Рабочее давление	0,1-2 МПа
Рабочая температура	350-400 °С (в нижней части), 80-150°С (в верхней части)
Количество тарелок/насадок	20-50 (в зависимости от требований разделения)
Скорость паров в колонне	0,5-2 м/с

Рассмотрим методы и технологии реконструкции колонн первичной обработки нефти [2]:

– замена внутренних устройств, таких как устаревшие тарелки, насадки, а также других внутренних устройств на более современные, более эффективные;

– метод применения новых материалов заключается в использовании коррозионностойких сталей, сплавов, композитных материалов для корпуса колонны и ее внутренних устройств;

– метод применения антикоррозионных покрытий, что позволит защитить корпус и внутренние элементы колонн;

– метод оптимизации технологических режимов через внедрение современных систем управления технологическим процессом,

– позволяющих оптимизировать параметры работы колонн первичной обработки нефти;

– интенсификация массообменных процессов заключается в эксплуатации новых насадок, тарелок для значительного увеличения производительности колонны и эффективности разделения;

– метод внедрения современных систем диагностики через применение современных методов неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния колонн первичной обработки нефти.

При реконструкции колонн акцентировать внимание в первую очередь нужно на выборе внутренних устройств. В современных колоннах довольно широко используются [3]:

1. регулярные насадки, которые обеспечивают низкое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность массообмена. Они обладают более сложной структурой, чем тарелки, но обеспечивают высокие характеристики по разделению фракций;

2. тарелки позволяют обеспечить высокий уровень разделения нефти. Они бывают колпачковые, сетчатые, клапанные. Каждый из этих типов тарелок имеет свои особенности, а также области применения. Клапанные тарелки позволяют достигнуть наибольшей производительности, и они менее чувствительны к неравномерностям нагрузки. Сетчатые тарелки применяются при отсутствии высоких требований к регулированию.

3. распределители жидкости и пара обеспечивают равномерное распределение потоков жидкости, а также пара по сечению колонны. Надлежащее распределение потоков способствует увеличению эффективности разделения.

Выбирая тип внутренних устройств, следует учесть следующие моменты:

– состав нефти влияет на выбор материала и типа внутренних устройств, следовательно, необходимо сперва определить тип перерабатываемой нефти;

– требования к чистоте фракций влияют на тип и количество тарелок или насадок;

– гидравлическое сопротивление и низкие затраты на электроэнергию;

– затраты на оборудование должны соответствовать бюджету планируемого проекта.

Экономическая эффективность реконструкции колонн первичной обработки нефти выражается в следующем:

1. снижаются энергозатраты, а именно модернизация теплообменного оборудования, оптимизация технологических режимов могут существенно снизить потребление энергии;
2. более эффективное разделение нефти приводит к увеличению выхода бензиновых и дизельных фракций;
3. применение более эффективных и долговечных материалов и покрытий значительно уменьшает частоту ремонтов, тем самым уменьшаются затраты на ТО;
4. современные технологии реконструкции обеспечивают снижение выбросов вредных веществ в экологию;
5. при более точном разделение фракций нефти влечет за собой получение наиболее качественного нефтепродукта.

Реконструкция колонн первичной обработки нефти в настоящее время требует больших вложений, но при правильном выборе необходимой технологии, а также при качественной эксплуатации колонн, реконструкция может быть экономически выгодна в длительной

перспективе. Полноценный анализ затрат и будущих перспектив позволит выбрать необходимый метод реконструкции колонн первичной обработки нефти.

Заключение

В настоящее время реконструкция колонн первичной обработки нефти является довольно сложным процессом, что требует комплексного подхода. Нужно применять современные технологии, использовать новые материалы и оптимальные технологические режимы, что в результате приведет к увеличению эффективности работы колонн первичной обработки нефти, тем самым увеличится выход светлых нефтепродуктов, улучшатся экологические показатели, уменьшатся затраты на эксплуатацию колонн.

Профессиональный подход и грамотное управление проектом, а также подбор квалифицированного персонала, выступают залогом успешной реконструкции колонн первичной обработки нефти.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию: учебное пособие для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / [Г. С.Борисов и др.]; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд., стер. Перепечатка с изд. 1991г. – Москва: Альян С, 2008. – 493 с. – ISBN 978-5-903034-35-2. – EDN QNEKWT.

2. Волосов, И. В. Совершенствование установки первичной переработки нефти / И. В. Волосов, С. М. Леденев // Наука, техника и образование. – 2017. – Т. 2, № 5(35). – С. 6-8. – EDN YOYNDL.

3. Медведев, И. С. Повышение эффективности работы колонны атмосферной перегонки нефти за счет контроля избыточного испарения в трубчатой печи / И. С. Медведев, С. Г. Дьячкова // Промышленные процессы и технологии. – 2025. – Т. 5, № 2(16). – С. 95-105. – DOI 10.37816/2713-0789-2025-5-2(16)-95-105. – EDN SBTVEA.

УДК 622.692.4.083:681.2.089

Киценко Владимир Дмитриевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kitsenko Vladimir Dmitrievich, student Komsomolsk-na-Amure State University

Кравченко Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Elena Genadyevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kom-somolsk-na-Amure State University

СИСТЕМЫ КАЛИБРОВКИ РЕЗЕРВУАРОВ В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ
TANK CALIBRATION SYSTEMS IN TANK FARMS OF OIL PUMPING STATIONS

Аннотация. В статье рассмотрены особенности калибровки резервуаров на нефтеперекачивающих станциях, обусловленные отклонениями их реальной геометрии от идеальных форм. Показано, что традиционные методы калибровки не всегда обеспечивают необходимую точность из-за наличия локальных дефектов и деформаций конструкции. В качестве современного решения предложено использование наземного лазерного сканирования (НЛС), позволяющего строить высокоточные трёхмерные модели внутреннего пространства резервуаров. Проанализирована действующая методика применения НЛС, отмечены её преимущества и ограничения по сравнению с традиционными геодезическими методами. Подчёркивается, что для повышения достоверности учёта объёмов нефти необходимо сочетать современные уровнемеры с точной градуировкой резервуаров на основе данных лазерного сканирования.

Abstract. The article discusses the features of calibration of tanks at oil pumping stations due to deviations of their real geometry from ideal shapes. It has been shown that traditional calibration methods do not always provide the necessary accuracy due to the presence of local defects and de-

formations of the structure. As a modern solution, the use of ground-based laser scanning (NLS) has been proposed, which makes it possible to build high-precision three-dimensional models of the internal space of tanks. The current methodology of using NLS is analyzed, its advantages and limitations compared to traditional geodetic methods are noted. It is emphasized that in order to increase the reliability of oil volume accounting, it is necessary to combine modern level gauges with accurate calibration of tanks based on laser scanning data.
Ключевые слова: калибровка, резервуар, наземное лазерное сканирование, уровнемер.
Key words: calibration, tank, ground laser scan, level gauge.

Введение

Резервуарные парки нефтеперекачивающих станций (НПС) – это ключевые объекты транспортной инфраструктуры нефтяной отрасли. От точности учёта объёмов нефти, хранящейся и перекачиваемой через эти парки, зависит эффективность работы всей системы, а также экономическая прозрачность операций. Одним из важнейших элементов обеспечения достоверности учёта является система калибровки резервуаров.

Калибровка резервуара – это процедура определения зависимости объёма жидкости в резервуаре от уровня наполнения. В процессе эксплуатации форма резервуара может изменяться из-за осадки фундамента, температурных деформаций, коррозии или механических воздействий. Даже незначительные отклонения могут привести к существенным ошибкам в учёте объёмов нефти.

В России калибровка резервуаров регламентируется рядом стандартов, в том числе:
- ГОСТ 8.587-2006 «Государственная система обеспечения единства измерений. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика калибровки»;
- РД 153-39.4-075-01 «Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов».

Соблюдение этих норм обязательно для всех предприятий, осуществляющих учёт нефти и нефтепродуктов.

Основная часть

В основе адекватной оценки объемов резервуаров по результатам, полученным при обработке данных, поступающих от применяемых в них уровнемерах, лежит качество и точность калибровки внутреннего объема резервуара. В реальности конструкция действующего резервуара имеет отклонения от номинальной цилиндрической формы. Стенки резервуара помимо локальных геометрических дефектов, имеют отклонение от симметричности и параллельности в вертикальном направлении по всему периметру. Характерными дефектами днища являются отклонения по вертикали и хлопуны, неизбежно возникающие в процессе эксплуатации. Перечисленные несоответствия приводят к нелинейному изменению объема резервуара по высоте. И даже высокоточные измерения уровня нефти не гарантируют совпадение теоретически рассчитанного объемы с действительным при неточной калибровке резервуара.

Для достижения высокой точности калибровки рекомендовано применение современных и эффективных методов контроля геометрических характеристик резервуаров. Анализ показал, что одним из самых прогрессивных методов является наземное лазерное сканирование (НЛС) [1].

В настоящее время существует единственная методика, регламентирующая использование технологии наземного лазерного сканирования в целях калибровки стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов типов РВС, РВСП, РВСПА, РВСПК номинальной вместимостью до 50000 м^3, основные положения которой приведены в МИ 3171-2008 «Порядок метрологического и технического обеспечения промышленной эксплуатации систем измерений количества и показателей качества нефти, трубопоршневых поверочных установок и средств измерений в их составе».

В указанной методике прописаны процедуры проведения наземного лазерного сканирования внешней стенки резервуара и его внутреннего пространства при различных уровнях

налива нефти. Помимо этого, с целью получения достоверных значений геометрических параметров резервуаров, приведены рекомендации по обработке результатов, полученных методом наземного лазерного сканирования.

Анализ методики показал, что результаты лазерного сканирования, как наиболее точного метода, применяются именно для подтверждения данных, полученных традиционными методами измерений посредством геодезических приборов, измерительных реек и линеек. При этом практика наземного сканирования резервуаров [2-3] показала стабильную разницу результатов сканирования от результатов геодезических измерений.

Пример указанного отличия результатов вычисленных объемов резервуаров разными методами приведен в табл. 1. Анализ данных (табл. 1) показал, что использование методики лазерного сканирования лишь с целью подтверждения результатов геодезических исследований, нецелесообразно, поскольку эти результаты имеют стабильные расхождения [4]. Главное назначение методики наземного лазерного сканирования – построение 3D модели внутреннего пространства резервуара.

Таблица 1

Результаты расчетов объемов РВС, м^3

Резервуар	Объем номинального цилиндра	Объем по данным геодезии,	Объем по данным НЛС	Разница
РВСП-7500	8149,4328	8159,4266	8158,5054	-0,9212
РВСП-5000	4879,7027	4872,0033	4874,6325	-2,6292
РВСПА-50000	51929,2021	51927,2557	51923,0772	-4,1785
РВСПК-50000	51929,2021	51909,6823	51901,8053	-7,8770

На рис. 1 приведены результаты сканирования внутреннего пространства для резервуара РВСП-5000.



Рис. 1. Общий вид облака точек внутренней поверхности резервуара РВСП-5000



Рис. 2. Несущие элементы крыши резервуара

Проведение лазерного сканирования внутри резервуара дает возможность для реализации его главной функции – получение точной 3D модели его внутреннего пространства с детализацией всех элементов конструкции. На рис. 2 приведено изображение 3D модели несущих элементов крыши.

Детализация облака точек, получаемых современными лазерными сканерами четвертого поколения, при разрешении сканирования в диапазоне от 10 до 1,5 мм на 10 м позволяет построить полную 3D модель внутреннего пространства резервуара и вычислить его объем с учетом любых конструктивных особенностей с точностью выше, чем требуется для подобных измерений.

Таким образом, метод наземного лазерного сканирования в целях калибровки целесообразно применять для получения трехмерных моделей внутреннего пространства, которые в дальнейшем позволят строить точные градуировочные таблицы вычисления объема на 1 мм высоты налива.

Для проведения точных и эффективных работ по постоянному мониторингу объемов нефти в резервуарах необходимо, с одной стороны, обеспечивать эффективный измерительный контроль высоты уровня налива продукта, а с другой, иметь точные данные градуировки резервуара. Применение высокоэффективных методов измерения уровня налива без обеспечения службы эксплуатации точными градуировочными таблицами будет приводить к тому, что данные по объемам перевалочных операций будут неточны.

Выводы

1. Реальная геометрия резервуаров существенно отличается от идеальной, что приводит к нелинейному изменению объёма на единицу высоты и возможным ошибкам при расчёте объёма нефти по данным уровнемеров.

2. Традиционные методы калибровки, основанные на геодезических измерениях, не всегда обеспечивают требуемую точность из-за локальных дефектов и деформаций конструкции резервуара.

3. Наземное лазерное сканирование (НЛС) позволяет получать детализированные трёхмерные модели внутреннего пространства резервуара, включая все конструктивные элементы, с точностью, превышающей требования к подобным измерениям.

4. Применение НЛС целесообразно не для подтверждения результатов геодезических измерений, а для построения точных градуировочных таблиц, учитывающих реальную геометрию резервуара.

5. Достижение верификации учета объемов нефти обеспечивается интеграцией прогрессивных методов контроля уровня налива и прецизионной градуировкой резервуаров, полученной на базе результатов наземного лазерного сканирования

Заключение

Проведённый анализ указывает на прямую корреляцию между точностью учёта объёмов нефти в резервуарах нефтеперекачивающих станций и качеством калибровки внутреннего объёма резервуара. Существующее отличие реальных действующих конструкций резервуаров от их номинальных геометрических форм неизбежно приводит к изменению его объема на единицу высоты, причем по нелинейному закону. Это влечет за собой риск ошибок в инженерных расчетах по результатам измерений уровнемерами. Таким образом, требуемая точность, воспроизводимая традиционными методами калибровки, не обеспечивается вследствие наличия деформаций и локальных дефектов в конструкции резервуаров.

Применение наземного лазерного сканирования дает возможность производить построение трёхмерных высокоточных моделей внутреннего пространства резервуаров с учетом существующих дефектов и особенностей конструкции. Анализ практических результатов выявил стабильное отличие данных, полученных лазерным сканированием от геодезических измерений. Также стоить отметить, что детализированные модели для построения точных градуировочных таблиц можно получить только путем лазерного сканирования.

Интеграция прогрессивных методов контроля уровня налива с точной градуировкой резервуаров, полученных на основе данных лазерного сканирования, в перспективе обеспечит достоверность учёта объёмов нефти. Это повысит эффективность мониторинга запасов на нефтеперекачивающих станциях при минимальных погрешностях измерения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сукманюк, А. С. Сканирующие технологии. Трёхмерное лазерное сканирование / А. С. Сукманюк, З. А. Малый, Д. А. Дражецкий // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 4. – С. 183-187. – EDN CIVXCL.

2. Привалов, А. В. Применение наземного лазерного сканирования в нефтегазовой отрасли / А. В. Привалов, М. Л. Юрьев // Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 24–28 апреля 2017 года. Том I. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 273-274. – EDN ZHGBKZ.

3. О применении наземного лазерного сканирования в нефтегазовой отрасли / Г. Г. Васильев, М. А. Лежнев, А. П. Сальников [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 4(16). – С. 47-51. – EDN TFBWJN.

4. Яковлев, Р. Р. Снижение затрат при проведении реверс-инжиниринга оборудования в нефтегазовой отрасли с применением технологии наземного лазерного сканирования / Р. Р. Яковлев // Перспективы развития науки в современном мире : Сборник трудов по материалам XI Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ, Уфа, 12 декабря 2022 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2022. – С. 96-99. – EDN UUERIX.

УДК 621.785.369

Кобрусев Леонид Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kobrusev Leonid Yurievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бахматов Павел Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Welding and Metallurgical Production Technologies named after V.I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University

УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЧИН ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ФЛАНЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ АВТОКЛАВА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
DETERMINATION OF THE CAUSES OF EROSIVE DESTRUCTION OF THE FLANGE SEAL OF THE AUTOCLAVE OF THE HYDROMETALLURGICAL COMPLEX

Аннотация. В работе приведен анализ узла уплотнения фланцевых соединений автоклава, входящего в состав технологического оборудования для автоклавно-гидрометаллургического комплекса ОАО «Покровский рудник» и предназначенного для проведения процесса окислительного выщелачивания золотосодержащих пирит-арсенопиритных концентратов при повышенной температуре под давлением кислорода и обеспечивающего окисление пирита до серной кислоты и сульфата железа и вскрытие упорного золота. Установлено, что причиной очагового эрозионного разрушения контактных поверхностей фланцевых соединений в ходе эксплуатации автоклава является фреттинг-изнашивание. Опробован и предложен для реализации в производственных условиях метод лазерного термоупрочнения фланцев из жаропрочного суперсплава на никелевой основе ХН75МБТЮ (Inconel 652) автоклава переработки упорных руд.
Abstract. The paper presents an analysis of the sealing unit for flange connections of an autoclave, which is part of the technological equipment for the Pokrovsky Mine autoclave and hydrometallurgical complex and is designed to carry out the process of oxidative leaching of gold-containing pyrite-arsenopyrite concentrates at elevated temperatures under oxygen pressure and oxidizing pyrite to sulfuric acid and iron sulfate and opening resistant gold. It has been established that the cause of focal erosive destruction of the contact surfaces of the flange joints during operation of the autoclave is fretting wear. A method of laser thermal hardening of flanges from a heat-resistant nickel-based superalloy KHN75MBTU (Inconel 652) autoclave for processing stubborn ores has been tested and proposed for implementation in production conditions.
Ключевые слова: сплав Inconel 652, фреттинг-изнашивание, лазерное термоупрочнение фланцев
Key words: Inconel 652 alloy, fretting wear, laser thermal reinforcement of flanges

Введение

На ОАО «Покровский рудник» в ходе эксплуатации автоклава окислительного выщелачивания золотосодержащих пирит-арсенопиритных концентратов (объем 55,4 м^3) при температуре 230 °С под давлением кислорода 3,5 МПа обеспечивается окисление пирита до серной кислоты и сульфата железа и вскрытие упорного золота.

Конструктивно автоклав снабжен несколькими фланцевыми соединениями для его эксплуатации и ремонта. В качестве элемента узла уплотнения фланцевых соединений, обеспечивающего герметичность соединения, является спирально-навитая прокладка (СНП).

В соединении перемешивающего устройства фланцевыми материалами служат титановый сплав Gr.17 (ВТ1-00) и жаропрочный суперсплав на никелевой основе ХН75МБТЮ (Inconel 652), СНП материал уплотнения Ti Gr.2 (ВТ1-0) + графит; внутреннее кольцо Ti Gr.2 (ВТ1-0) и наружное кольцо SA-240 316L (03Х17Н14М3).

В ходе эксплуатации происходит эрозия контактных поверхностей фланцев, преимущественно со стороны Inconel 652 на глубину до 3 мм (рис. 1), устраняемой аргонодуговой наплавкой в ходе проведения технологического обслуживания автоклава, что увеличивает время и себестоимость ТО.



Рис. 1. Внешний вид эрозионного разрушения фланца

Повышение надежности узла является актуальной задачей, так как от качества его работы зависит безопасная эксплуатация автоклава и качество получаемых химических продуктов. Для этого необходимо установить причины эрозионного изнашивания, исходя из которых, предложить методы повышения износостойкости.

В работе [1] установлено, что причиной нарушения герметичности фланцевых соединений является разрушение уплотнительного элемента за счет чрезмерной удельной нагрузки затяжки резьбового соединения, а в работе [2] показано, что причиной процесса изнашивания уплотнительной прокладки во фланцевом соединении является фреттинг, характеризуемый минимальными амплитудами перемещений, часто измеряемыми в микрометрах. Повышение износостойкости в термически неупрочняемых сплавах, не имеющих закалочных структурных составляющих, возможно лазерным оплавлением в различных средах [3, 4].

Материалы и методы

Исследовался образец сплава ХН75МБТЮ (Inconel 652), вырезанный непосредственно из контактной плоскости фланцевого соединения автоклава, с характерными очагами поверхностной эрозии. Кроме того, для исследования предоставлен сегментарный участок СНП, находящийся в контактной плоскости фланца.

Химический анализ образца прижимной поверхности проводили на оптико-эмиссионном спектрометре BRUKER Q4 TASMAN.

Для исследования химического состава компонентов очаговой эрозии и изучения пораженной поверхности ХН75МБТЮ (Inconel 652), а также поверхности титановых лент СНП использовался сканирующий электронный микроскоп SEM S-3400N. Образцы предварительно очищались в ультразвуковой спиртовой ванне от грязи, масла и прочих загрязнений.

Оплавление поверхности производили на лазерной технологической установке BULAT LRS-300 на режимах: напряжение 430 В, время импульса 16 мс, частота импульсов 5 Гц, форма импульса – колокол, скорость перемещения образца 1,39 мм/с, фокусное расстояние 125 мм. Перед оплавлением рабочая поверхность образца выравнивалась по плоскости шлифованием. В момент оплавления использовались следующие среды и слои: в воздушной среде, в аргоне (20 л/мин), в азоте (20 л/мин), по слою нанесенного на поверхность термо-

расширенного графита. Число проходов в каждой среде не менее 4 с перекрытием валиков не менее 30% и перекрытием точек не менее 70 %.

Измерение твердости оплавленной поверхности проводили на твердомер HR – 150 по Роквеллу со следующими характеристиками - предварительная нагрузка 10 Кгс; общая нагрузка 150 Кгс; диапазон измерений: 20-90 HRC.

Определение изменения микротвердости вглубь обработанной лазером поверхности выполнялось в поперечном сечении образца через каждые 2 мм с помощью микротвердомера HMV-2 по методу Виккерса при нагрузке 1.961 Н в течение 10 сек.

Для анализа изменения микроструктуры металла после лазерного оплавления на металлографическом микроскопе Nikon MA200 образец изготавливался на шлифовально-полировальном станке EcoMet 250 Pro. Образец полировали и травили в реагенте состава 10 мл HNO_3 и 30 мл HCl.

Результаты

На рис. 2 (x9) приведен внешний вид поверхности прижимной плиты из сплава Inconel 625, где обнаружены характерные признаки фреттинг-коррозии, вызванной циклическими микроперемещениями контактирующей титановой ленты. Наблюдается обширная зона трибологического воздействия, форма которой соответствует отпечатку витка уплотнительной ленты, выглаживание поверхности, наличие темных продуктов износа по краям зоны контакта.

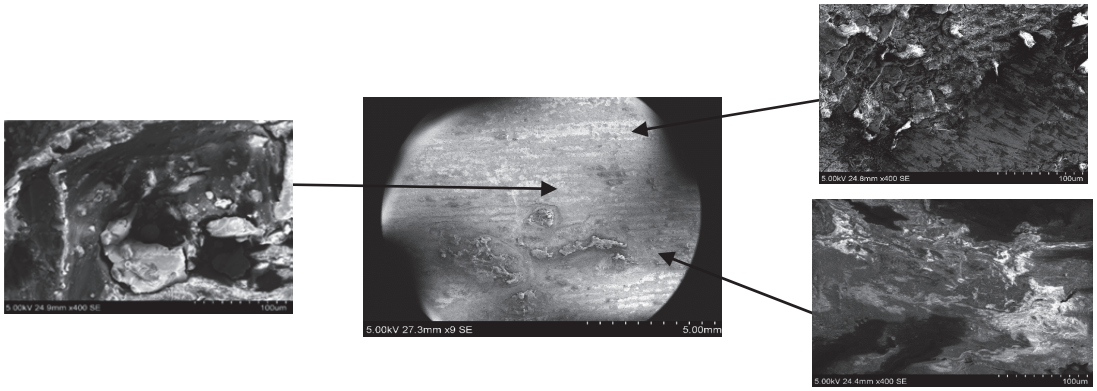


Рис. 2. Контактная поверхность фланца из Inconel 652

На рис. 2 (x400) видны протяженные риски и бороздки (абразивный износ), сетка микротрещин (фреттинг-усталость), слой пластической деформации, рыхлый "трибослой" – смесь измельченных частиц металла и оксидов. При химическом анализе таких зон установлено, что в них преобладают углерод и фтор. Фториды могут, как ускорять коррозионные процессы, так и выступать в роли твердой смазки, снижая коэффициент трения.

Вывод по микроструктуре: Поверхность подверглась интенсивному механическому и коррозионному воздействию. Доминирующие механизмы – фреттинг-усталость и абразивный износ.

На рис. 3 представлена контактная поверхность титановой ленты СНП. Поверхность ленты имеет технологический микрорельеф, сформированный при прокатке/волочении.

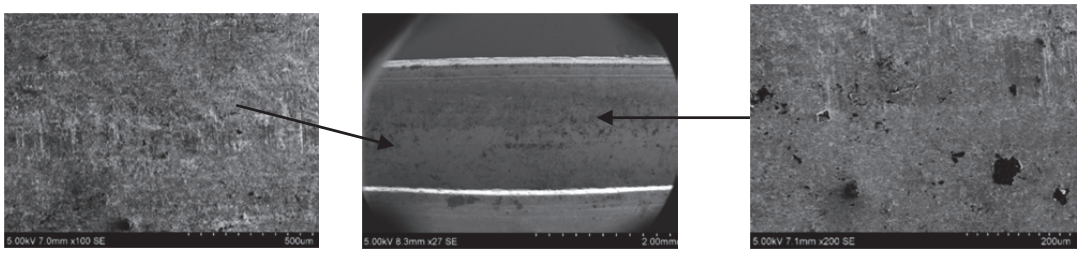


Рис. 3. Контактная поверхность титановой ленты СНП

При рассмотрении снимков (х100 и х200) наблюдается направленный микрорельеф в виде параллельных рисок с незначительными следами окисления. Профиль ленты (V-образный) обеспечивает упругие свойства прокладки.

Вывод по микроструктуре титановой ленты: признаков интенсивного износа или переноса материала с контртела не обнаружено.

При проведении химического оптико-эмиссионного анализа исследуемого образца на соответствие сплаву Inconel 625 установлено расхождение по содержанию железа ~ 0,33 %, в то время как в стандартном Inconel 625 его содержание обычно допускается до 5 % (а фактически бывает около 2 – 4 %). Низкое содержание Fe может указывать на особо чистую марку Inconel 625LCF или специальный переплав.

На рис. 4 представлен внешний вид поверхности образца из сплава Inconel 625, подвергнутой лазерному импульсному оплавлению в различных средах. Слева-направо: участок, оплавленный в воздушной среде, 2-участок, оплавленный в среде аргона, 3- участок, оплавленный в среде особо чистого азота, 4 – участок, оплавленный по слою терморасширенного графита (материал СНП).

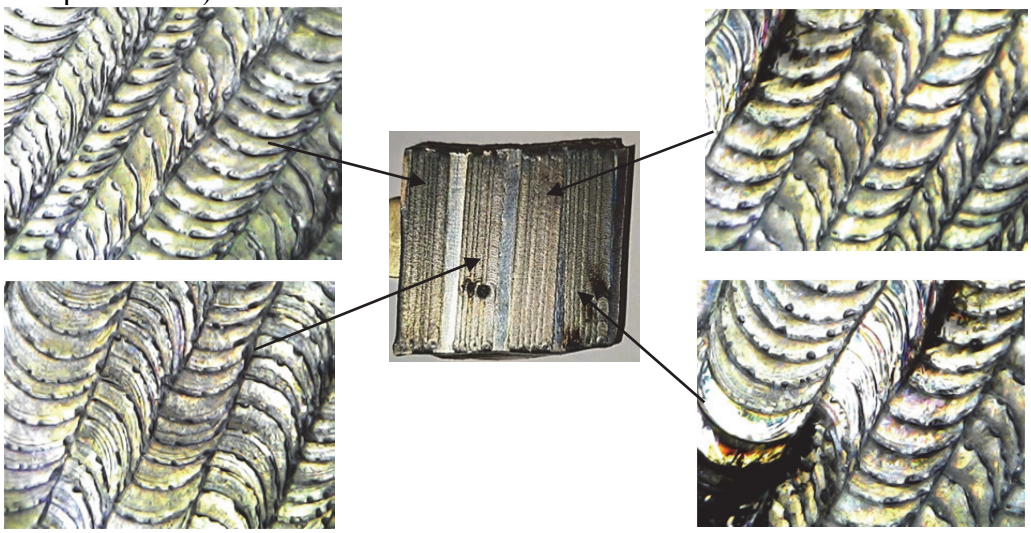


Рис. 4. Общий вид поверхности образца после лазерного оплавления

Влияние защитной среды при наплавке:

- Газовая защита в среде азота, показала лучшие результаты по повышению твердости. Полученная твердость верхнего слоя 323 HV, что составляет 117 % от твердости основного металла.

- Газовая защита в среде аргона, показала меньший результат в 115% от твердости основного материала, чем азот и большее падение твердости по мере отдаления от наплавленной поверхности.

- Наплавка на воздухе приводит к формированию зоны с наименьшими показателями твердости, что может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках изделия (износостойкость, сопротивление малоцикловой усталости).

- Графит показал хорошую твердость на поверхности, но по мере отдаления от наплавленной поверхности глубину, наблюдается резкое падение твердости до 270 HV.

Анализ изменения структуры поверхностного слоя от лазерного оплавления не увенчался успехом по причине слабой травимости металла.

Обсуждение результатов

В процессе эксплуатации в узле «СНП – прижимная поверхность Inconel 625» возникают циклические микроперемещения (вибрации, термоциклирование), приводящие к развитию фреттинг-коррозии.

Таким образом, можно предположить механизм эрозионного износа на поверхности Inconel 625 в ходе эксплуатации автоклава: разрушение пассивной оксидной пленки

(Cr_2O_3, NiO) → образование твердых абразивных частиц оксидов → зарождение усталостных микротрещин → накопление продуктов износа в виде «трибослоя» → абразивный износ гранулами серы.

На поверхности титановой ленты в процессе работы автоклава формируется устойчивый слой TiO□, имеющий твердость ниже, чем у оксидов хрома, что снижает абразивное воздействие на контртело.

Заключение

1. Микроструктурный анализ подтвердил наличие фреттинг-коррозии на поверхности Inconel 625: зафиксированы следы абразивного износа, микротрещины и слой пластической деформации. Поверхность титановой ленты имеет технологический рельеф и не несет следов интенсивного износа.

2. Элементный анализ выявил:

- значительную неоднородность состава поверхности Inconel 625: от сильно окисленных и загрязненных фтором участков до практически чистой металлической поверхности.
- наличие на титановой ленте оксидного слоя (TiO□) различной толщины.
- отсутствие взаимного переноса основных легирующих элементов между контактирующими поверхностями.

3. Основные механизмы повреждения прижимной поверхности: фреттинг-усталость (зарождение трещин); абразивный износ (оксидными частицами); коррозионное воздействие (окисление, фторирование).

4. Увеличение твердости, а соответственно и износостойкости фреттинг-коррозии, поверхности Inconel 625 возможно путем лазерного оплавления, причем наилучший результат (117 % от исходного состояния) достигнут при ведении этого процесса в среде азота.

5. Внедрение предложенной технологии по лазерному термоупрочнению фланцевого соединения в практику ремонтных служб АО «Покровский рудник» позволит существенно повысить надежность и долговечность оборудования, сократить простои, связанные с разгерметизацией, и минимизировать риски аварийных ситуаций на опасном производственном объекте.

Благодарности

Результаты исследования, изложенные в материале, проводились в рамках гранта № ВН001/2023 при содействии сотрудников ЦКП «Новые материалы и технологии»: Афанасьевой А.А. и Зиновьева О.А. и плана выполнения проектов СКБ «Машиностроение» на 2026 год, согласно приказа 35-р от 03.03.2026 г.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Божко, Г. В. Причины нарушения герметичности разъемного соединения / Г. В. Божко, В. Д. Продан, Н. С. Полякова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов, 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 134 – 141.

2. Елагина О.Ю. Моделирование процесса изнашивания уплотнительной прокладки во фланцевом соединении при фреттинге / О.Ю. Елагина, О.Б. Дубинова // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103. – №3. – С. 217-221.

3. Ким В. А., Катунцева Н. Л. Упрочнение коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т лазерной цементацией // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 9(141) – С. 3-8.

4. Ким В. А., Башков О. В., Сатаева И. В. Локальное лазерное легирование нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т. 1, № 2(26). С. 64-70

УДК 66.071.51
Костецкая Екатерина Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kostetskaya Ekaterina Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Проценко Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Protsenko Aleksander Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОЧИСТКА ТОПЛИВНОГО ГАЗА МЕТИЛДИЭТАНОЛАМИНОМ ОТ СЕРОВОДОРОДА
PURIFICATION OF FUEL GAS WITH METHYLDIETHANOLAMINE FROM HYDROGEN SULFIDE

Аннотация. В статье обосновано применение метилдиэтаноламина (МДЭА) для очистки топливного газа от сероводорода на установках нефтеперерабатывающих заводов . На основе отчёта НПК «Кедр-89» выполнен анализ реконфигурации колонны К-5 в абсорбер с 40 % раствором МДЭА. При расходах газа 15,4 т/ч и МДЭА 8 т/ч требуемая очистка (H_2S ≤0,3 %) достигается при охлаждении газа до 40 °С. Предложена двухстадийная схема, при которой используется реконфигурация К-5 для газов ЭЛОУ-АВТ и строительство второй колонны для газов риформинга и изомеризации.
Abstract. The article substantiates the use of methyldiethanolamine (MDEA) to purify fuel gas from hydrogen sulfide at oil refineries. Based on the report of NPC «Kedr-89», the reconfiguration of the K-5 column into an absorber with 40% MDEA solution was analyzed. With gas flow rates of 15.4 t/h and MDEA of 8 t/h, the required purification (H_2S <0.3%) is achieved by cooling the gas to 40 °C. A two-stage scheme is proposed, which uses the reconfiguration of K-5 for ELOU-AVT gases and the construction of a second column for reforming and isomerization gases.
Ключевые слова: метилдиэтаноламин, МДЭА, сероводород, аминовая очистка, топливный газ.
Key words: methyldiethanolamine, MDEA, hydrogen sulfide, amine purification, fuel gas.

Введение

В структуре ООО «РН-Комсомольский НПЗ» важную роль играют две установки первичной (ЭЛОУ-АВТ-2 и ЭЛОУ-АВТ-3) и две установки вторичной переработки нефти (каталитического риформинга и изомеризации). Именно эти технологические объекты являются основными генераторами топливного газа, содержащего сероводород. Как показывает анализ существующей схемы, централизованная очистка газа от сероводорода на данных установках отсутствует.

С 2015 года на заводе была внедрена технологическая схема, согласно которой углеводородные газы с технологических установок поступают на блок газофракционирования, где проходят очистку и разделение на топливный газ и узкие фракции. Часть сероводородсодержащих газов, особенно с установок первичной переработки и риформинга, по-прежнему направляется в топливную сеть без предварительной очистки или сжигается на факеле. Такая практика приводит к повышенным выбросам диоксида серы при сжигании неочищенного топливного газа, коррозии оборудования топливной сети и печей и потере ценного углеводородного сырья.

В составе блока получения сжиженного газа установки ЭЛОУ-АВТ-2 имеется колонна К-5, которая первоначально была спроектирована для ректификационных процессов. В 2021 году по договору между ООО «РН-Комсомольский НПЗ» и научно-производственной компанией «Кедр-89» были выполнены технологические расчёты возможности использования этой колонны в качестве аминового абсорбера для очистки топливного газа. Для очистки предлагается метилдиэтаноламин (МДЭА) – третичный амин, обладающий высокой селек-

тивностью к сероводороду в присутствии диоксида углерода. Именно МДЭА, а не традиционные МЭА или ДЭА, выбран для данной технологии, благодаря его низкой теплоте реакции с H_2S (≈50 кДж/моль против 85 кДж/моль у МЭА), минимальной коррозионной активности и высокой термической стабильности [1].

Целью настоящей работы является обоснование (на основе расчётов, а также анализа материальных балансов всех установок первого блока) применения МДЭА в реконфигурированной колонне К-5 для газов ЭЛОУ-АВТ-2, и строительство второй колонны для газов риформинга и изомеризации.

Основная часть

Согласно отчёту НПК «Кедр-89», в качестве исходных данных были приняты следующие параметры: расчётный состав топливного газа (содержание H_2S) 2,0 $\%_{об.}$, раствор амина 40 $\%_{масс}$. МДЭА, остаточный H_2S ≤0,02 $\%_{масс.}$, температура раствора амина 40–60 °С, давление топливного газа 0,35 МПа (изб.), температура топливного газа 40–60 °С, требуемое содержание H_2S в очищенном газе не более 0,3 % масс. Промышленный опыт системы обнаружения утечек Газлинской группы месторождений показал, что после замены ДЭА на МДЭА остаточное содержание H_2S в очищенном газе снизилось до 1,2 мг/м³ при норме 5,7 мг/м³, а производительность установки удалось сохранить без дополнительных капиталовложений. Полный компонентный состав топливного газа включает 2,0 $\%_{об}$ сероводорода, 8,34 % этана, 12,08 % метана, 17 % водорода, 21,78 % пропана, около 24 % бутана (изо- и нормальный), а также пентаны, гексан и примеси азота, кислорода и углекислого газа.

Согласно материальному балансу установки ЭЛОУ-АВТ-2, перерабатывающей смесь сжиженной западно-сибирской нефти и ВСТО, получаемые газовые потоки имеют 0,52 % углеводородного газа на сырьё. Блок получения сжиженного газа даёт дополнительно 32,82 % УВГ на сырьё блока. Это один из основных источников топливного газа, требующего очистки. Материальный баланс установки ЭЛОУ-АВТ-3 (с вакуумным блоком) показывает выход 1,39 $\%_{масс.}$ углеводородного газа (на сырьё), а также 0,51 $\%_{масс}$ газовой «головки». Потенциально этот газ также может быть направлен на очистку, однако в существующей схеме он частично сжигается на факеле. В блоке гидроочистки установки каталитического риформинга очищается 3,39 $\%_{масс.}$ (2732 кг/ч) углеводородного газа из Е-2 и 0,06 $\%_{масс.}$ (51 кг/ч) отдува ВСГ из С-1. В блоке риформинга перерабатывается 2,51 $\%_{масс.}$ (1139,5 кг/ч) углеводородного газа и 9,19 $\%_{масс.}$ (4172 кг/ч) ВСГ. Таким образом, суммарный поток углеводородных газов с установки риформинга составляет около 4–5 т/ч, а с учётом ВСГ, который также содержит примеси H_2S, до 8 т/ч. В узле подготовки сырья установки изомеризации имеется 0,81 $\%_{масс.}$ (158 кг/ч) углеводородного газа, а в узле изомеризации 3,27 $\%_{масс.}$ (481 кг/ч) отдувочного углеводородного газа. Суммарный газовый поток с изомеризации составляет около 0,64 т/ч.

НПК «Кедр-89» выполнила гидравлические расчёты существующих контактных устройств колонны К-5. Было установлено, что максимальная пропускная способность зависит от места подачи раствора МДЭА на верхнюю тарелку (штуцер «Е», Ø100 мм). При этом расход газа составляет 20 т/ч и расход амина 15 т/ч. На распределительную тарелку (штуцер «А», Ø150 мм) приходится расход газа 33 т/ч и расход амина 24 т/ч. Центробежные тарелки, расположенные в отгонной части колонны, имеют более высокие предельно допустимые нагрузки по пару, по сравнению с клапанными трапециевидными тарелками в укрепляющей части. При фактических расходах топливного газа (9700 нм³/ч, что соответствует 15,4 т/ч) и раствора МДЭА (8 т/ч) были выполнены технологические расчёты для различных температур. Требуемая степень очистки (остаточный H_2S ≤0,3 % масс.) достигается только при снижении температуры газа до 40 °С. При температуре газа 60 °С для достижения норматива необходимо либо снизить содержание H_2S во входном газе до 1,5 $\%_{об.}$, либо уменьшить расход газа до 11 т/ч. При температуре топливного газа 60 °С и температуре МДЭА 60 °С и менее возможна конденсация лёгких углеводородов из газовой фазы в раствор амина. Это приводит к обогащению амина углеводородами и, как следствие, к повышенному пенообразованию на тарелках. Особенно чувствительны к этому клапанные тарелки, в то время как центробежные та-

релки менее подвержены вспениванию. Следовательно, температура амина должна превышать температуру очищаемого газа не менее чем на 5 °C [2]. Расчёт показал, что при производительности колонны 15,4 т/ч скорость очищенного газа в выводящем штуцере «Б» диаметром 150 мм достигает 60 м/с, что в 4 раза превышает рекомендуемые значения. Это создаёт избыточное гидравлическое сопротивление (фактор 121 $Па^{0,5}$). Рекомендуется увеличить диаметр штуцера «Б» до 250 мм.

На основе анализа материальных балансов и расчётов колонны К-5 предлагается следующая схема. Используем колонну № 1 (существующая К-5) для очистки газов с установок ЭЛОУ-АВТ-2 и ЭЛОУ-АВТ-3. Расчётный расход газа прогнозируем ~ 12–15 т/ч. Это позволит работать в щадящем режиме, с запасом по производительности. Колонна № 2 (новая) предназначена для очистки газов с установки каталитического риформинга и изомеризации. Суммарный расход очищаемых газов около 5–6 т/ч, при этом они имеют более высокое давление (до 1,5–1,6 МПа на риформинге) и отличаются по составу (высокое содержание водорода). Новая колонна может быть спроектирована с учётом этих особенностей. Подачу регенерированного амина будет организована на верхнюю тарелку через штуцер «Е» (диаметр 100 мм), чтобы задействовать клапанные тарелки в укрепляющей части колонны К-5. Центробежные тарелки в отгонной части при малых расходах амина (8 т/ч) работают неэффективно. Подачу топливного газа следует осуществлять под первую тарелку, либо под 13-ю тарелку через штуцер «А», кроме того, необходимо увеличить диаметр линии вывода очищенного газа (штуцер «Б») со 150 до 250 мм для снижения гидравлического сопротивления, подвергнуть корпус колонны объёмной термообработке и настроить систему блокировок и предупредительной сигнализации.

Заключение

Метилдиэтаноламин (МДЭА) является оптимальным абсорбентом для очистки топливного газа от сероводорода на Комсомольском НПЗ благодаря высокой селективности, низкой теплоте реакции, минимальной коррозионной активности и термической стабильности. Существующая колонна К-5 после реконфигурации может быть использована как абсорбер с 40%-ным водным раствором МДЭА при расчётной производительности 20–33 т/ч газа в зависимости от схемы подачи абсорбента. При фактических расходах (15,4 т/ч газа, 8 т/ч раствора МДЭА) требуемая степень очистки достигается при охлаждении газа до 40 °C.

Рекомендуется двухстадийная схема, состоящая из первоочередной реконфигурации К-5 под МДЭА для газов ЭЛОУ-АВТ, а затем строительство второй колонны для газов риформинга и изомеризации. Внедрение аминовой очистки топливного газа с использованием метилдиэтаноламина позволит Комсомольскому НПЗ кардинально сократить негативное воздействие на окружающую среду. В настоящее время сероводородсодержащие газы, образующиеся на установках первичной переработки и вторичных процессов, частично сжигаются на факеле, что приводит к выбросам диоксида серы, вызывающего кислотные дожди, закисление почв и повреждение растительности [3].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Башаров, М. М. Повышение эффективности очистки газов от сероводорода в нефтепереработке / М. М. Башаров, А. Г. Лаптев // Энергетика Татарстана. – 2014. – № 1(33). – С. 21-24. – EDN SCDNUX

2. Лаврентьев, И. А. Применение метилдиэтаноламина на установках очистки газов / И. А. Лаврентьев // Научный журнал Российского газового общества. – 2017. – № 1. – С. 59-64. – EDN YJMPJP

3. Баранова, Е. И. Методический подход к снижению выбросов в атмосферу / Е. И. Баранова, Н. В. Солонникова // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2015. – № 9. – С. 397-406. – EDN UNDWFB

УДК 658.512.22
Кравченко Виктория Валерьевна, студентка, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kravchenko Victoria Valerievna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Серебренникова Анжела Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serebrennikova Anzhela Gennadievna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ 10ХН3МФА (АК25ПК) ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
STUDY OF THE DEPENDENCE OF OUTPUT PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM WHEN TURNING HIGH-STRENGTH SHIPBUILDING STEEL 10KHN3MFA (AK25PK) ON CHANGES IN THE GEOMETRY OF THE CUTTING TOOL

Аннотация. Проведено экспериментальное определение влияния главного заднего угла α упорного проходного резца (ГОСТ 18879-73, твёрдый сплав ВК8) в диапазоне от 8° до 13° при фиксированном переднем угле γ = 2° и различных значениях подачи S (0,09; 0,11; 0,15; 0,21 мм/об) на шероховатость обработанной поверхности Ra и общую силу резания F при точении высокопрочной судостроительной стали марки 10ХН3МФА. Режимы резания (глубина t = 0,5 мм, скорость V = 72 м/мин) выбраны постоянными. Обработка выполнялась на токарно-винторезном станке 1К625. Измерение Ra проводилось портативным профилометром TR200 с выполнением четырёх замеров для каждого значения заднего угла α. Измерение силы резания F осуществлялось с помощью динамометра. Построены зависимости Ra(α) и F(α) для всех исследуемых значений подачи. Полученные результаты могут быть применены при выборе геометрии режущего инструмента для чистового точения высокопрочных судостроительных сталей.
Abstract. An experimental study has been conducted to determine the influence of the main clearance angle α of a thrust turning tool (GOST 18879-73, carbide grade VK8) in the range from 8° to 13° with a fixed rake angle γ = 2° and various feed rates S (0.09, 0.11, 0.15, 0.21 mm/rev) on the surface roughness Ra and total cutting force F when turning high-strength shipbuilding steel grade 10KhN3MFA. Cutting conditions (depth t = 0.5 mm, speed V = 72 m/min) were kept constant. Machining was performed on a 1K625 screw-cutting lathe. Ra was measured using a TR200 portable profilometer with four measurements taken for each clearance angle α. The cutting force F was measured using a dynamometer. Dependences Ra(α) and F(α) were plotted for all feed values used. The obtained results can be applied when selecting the geometry of the cutting tool for finish turning of high-strength shipbuilding steels.
Ключевые слова: Точение, задний угол, шероховатость поверхности, сила резания.
Key words: Turning, clearance angle, surface roughness, cutting force/

Введение

Высокопрочные судостроительные стали, в том числе марка 10ХН3МФА, широко применяются при изготовлении корпусов морских судов, подводных аппаратов и ответственных элементов судовых энергетических установок благодаря высокому пределу текучести, сопротивлению коррозии и усталостной прочности. Однако обработка таких материалов резанием сопряжена со значительными трудностями: повышенные силы резания, интенсивное теплообразование, склонность к наклёпу и низкая обрабатываемость по сравнению с конструкционными сталями обычной прочности.

Одним из наиболее эффективных и доступных способов управления процессом точения высокопрочных сталей является оптимизация геометрии режущего инструмента. Среди геометрических параметров резца главный задний угол α оказывает непосредственное влияние на трение по задней поверхности, теплоотвод, жёсткость режущего клина и, как следствие, на качество обработанной поверхности и энергосиловые характеристики процесса резания.

Для упорных проходных резцов, применяемых при чистовой обработке, рекомендуемые значения заднего угла в справочной литературе обычно находятся в диапазоне 8–12°. Однако эти рекомендации носят обобщённый характер и не учитывают специфику конкретных труднообрабатываемых материалов, таких как судостроительная сталь 10ХН3МФА. Кроме того, в доступной литературе недостаточно данных о совместном влиянии заднего угла и подачи на шероховатость поверхности и силу резания при точении высокопрочных судостроительных сталей с малыми глубинами резания (чистовые проходы).

Цель настоящей работы — экспериментальное определение влияния главного заднего угла α упорного проходного резца (ГОСТ 18879-73, твёрдый сплав ВК8) в диапазоне 8–13° при фиксированном переднем угле γ = 2° и различных значениях подачи S = 0,09…0,21 мм/об на шероховатость обработанной поверхности Ra и общую силу резания F при точении высокопрочной судостроительной стали 10ХН3МФА в условиях чистового точения (t = 0,5 мм, V = 72 м/мин) [1-3].

Задачи исследования:

1 Экспериментально получить зависимости Ra(α) и F(α) для четырёх значений подачи.

2 Выявить характер влияния заднего угла на каждый из выходных параметров.

3 Определить рациональные диапазоны заднего угла для обеспечения низкой шероховатости и умеренной силы резания.

Основная часть

В ходе эксперимента получены зависимости шероховатости Ra и общей силы резания F от главного заднего угла α (8–13°) при четырёх значениях подачи S = 0,09; 0,11; 0,15; 0,21 мм/об. Режимы резания: t = 0,5 мм, V = 72 м/мин — постоянны. Результаты измерений представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Влияние заднего угла и подачи на шероховатость поверхности Ra

α, град	S = 0,09	S = 0,11	S = 0,15	S = 0,21
8	4,1	5,4	7,2	12,5
9	1,4	5,6	7,4	11,0
10	3,2	4,8	4,6	7,2
11	1,7	7,3	11,0	11,0
12	1,1	6,3	9,7	9,0
13	2,6	5,7	9,1	8,0

Как видно из таблицы 1, наименьшие значения Ra достигнуты при малых подачах. При S = 0,09 мм/об минимальная шероховатость зафиксирована при α = 12° (1,1 мкм) и α = 9° (1,4 мкм). При увеличении подачи до 0,21 мм/об шероховатость возрастает для всех задних углов; максимальное значение (12,5 мкм) получено при α = 8°, минимальное при этой подаче (8,0 мкм) – при α = 13° .

Из таблицы 2 следует, что в большинстве случаев увеличение подачи приводит к росту силы резания, однако наблюдаются отклонения от этой закономерности. Наименьшее значение F (40,8 Н) зафиксировано при α = 8° и S = 0,11 мм/об. Наибольшие значения получены при α = 11° и S = 0,09 (792,2 Н), а также при α = 9° и S = 0,09 (693,5 Н). При подаче S = 0,21 мм/об максимальная сила (606,5 Н) соответствует α = 13°.

Таблица 2

Влияние заднего угла и подачи на силу резания F

α, град	S = 0,09	S = 0,11	S = 0,15	S = 0,21
8	300,8	40,8	412,7	533,5
9	693,5	314,7	409,4	506,6
10	406,6	319,5	414,5	414,5
11	792,2	309,4	385,3	475,9
12	511,4	291,4	407,3	497,3
13	630,0	354,2	422,5	606,5

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют выделить несколько закономерностей, а также отметить нестандартные точки, требующие дополнительного анализа.

1. Влияние заднего угла и подачи на шероховатость

Для большинства сочетаний параметров увеличение подачи закономерно приводит к росту шероховатости Ra, что согласуется с классическими представлениями о влиянии подачи на высоту неровностей при точении. Однако характер зависимости Ra(α) не является монотонным.

Наименьшие значения Ra при малых подачах (S = 0,09 мм/об) достигнуты при α = 9° и 12°, тогда как при α = 8° и 10° шероховатость оказалась выше. Это может свидетельствовать о наличии оптимальной зоны заднего угла, при которой трение по задней поверхности минимально, а жёсткость режущего клина ещё достаточна для подавления вибраций. При S = 0,21 мм/об наилучший результат показал α = 13°, что, возможно, связано с улучшением теплоотвода при больших задних углах в условиях интенсивного тепловыделения.

2. Влияние заднего угла и подачи на силу резания

В отличие от шероховатости, зависимость силы резания F от заднего угла α не обнаруживает явной систематической закономерности. В большинстве случаев с ростом подачи сила увеличивается, однако наблюдаются ярко выраженные аномалии.

Особого внимания заслуживают:

Экстремально низкое значение F = 40,8 Н при α = 8°, S = 0,11 мм/об. Такое снижение силы не может быть объяснено только изменением геометрии или режимов резания. Возможные причины: локальное изменение условий контакта (например, налипание материала на переднюю поверхность с изменением фактического переднего угла), вибрации, приведшие к прерывистому резанию, либо кратковременный выход из зоны резания.

Высокие значения F = 792,2 Н (α = 11°, S = 0,09) и F = 693,5 Н (α = 9°, S = 0,09), превышающие силы при больших подачах для тех же углов. Это может указывать на нестабильность процесса резания при малых подачах и определённых задних углах, связанную, например, с наростом на передней поверхности или неоднородностью свойств обрабатываемого материала [4, 5].

Отсутствие монотонной зависимости F(α) говорит о том, что в исследуемом диапазоне изменение заднего угла не является доминирующим фактором, определяющим силовую нагрузку. На первый план, вероятно, выходят другие явления: трение на задней поверхности, деформационное упрочнение, тепловые процессы и динамика системы.

Выводы

1) Шероховатость поверхности Ra возрастает с увеличением подачи для всех значений заднего угла, что соответствует классическим закономерностям процесса точения.

2) Наименьшая шероховатость (Ra = 1,1 мкм) достигнута при α = 12° и подаче S = 0,09 мм/об. При этой же подаче (S = 0,09 мм/об) низкие значения Ra получены также при α = 9° (1,4 мкм) и α = 11° (1,7 мкм).

3) При максимальной подаче S = 0,21 мм/об минимальная шероховатость (8,0 мкм) зафиксирована при α = 13°, максимальная (12,5 мкм) — при α = 8°.

4) Сила резания F не обнаруживает монотонной зависимости от заднего угла. Зафиксированы значительные колебания значений, включая аномально низкое (40,8 Н при α = 8°, S = 0,11) и аномально высокие (792,2 Н при α = 11°, S = 0,09 и 693,5 Н при α = 9°, S = 0,09).

5) В исследуемом диапазоне α = 8–13° не выявлено универсального оптимального заднего угла, обеспечивающего одновременно минимальные Ra и F. Выбор геометрии инструмента должен определяться приоритетным критерием (качество поверхности или энергосиловая нагрузка).

6) Полученные аномалии указывают на наличие нестационарных процессов в зоне резания (вибрации, нарост, неоднородность свойств материала), что требует осторожного подхода к экстраполяции результатов и подтверждает необходимость экспериментальной настройки режимов для каждой конкретной партии материала.

Заключение

В ходе выполнения работы экспериментально исследовано влияние главного заднего угла α упорного проходного резца в диапазоне 8–13° на шероховатость обработанной поверхности Ra и общую силу резания F при точении высокопрочной судостроительной стали 10ХН3МФА с постоянными режимами резания (t = 0,5 мм, V = 72 м/мин) и варьируемой подачей S = 0,09…0,21 мм/об. Установлено, что шероховатость ожидаемо растёт с увеличением подачи, а наилучшее качество поверхности достигнуто при α = 12° и подаче S = 0,09 мм/об (Ra = 1,1 мкм). Влияние заднего угла на силу резания оказалось немонотонным и сопровождалось аномальными выбросами значений, что свидетельствует о сложном многофакторном характере процесса резания высокопрочной легированной стали.

Полученные экспериментальные данные могут быть непосредственно использованы технологами судостроительных предприятий при разработке технологических процессов чистовой обработки деталей из стали 10ХН3МФА. В частности, при необходимости достижения минимальной шероховатости (Ra ≤ 1,5 мкм) рекомендуется применение резца с задним углом α = 12° и подачей S = 0,09 мм/об. Приоритетом в таком режиме является качество поверхности, а не производительность обработки. Выполненное исследование подтверждает, что для высокопрочной судостроительной стали 10ХН3МФА даже в узком диапазоне изменения заднего угла (8–13°) и при фиксированных режимах резания выходные параметры (особенно сила резания) могут демонстрировать немонотонное поведение и аномальные выбросы.

Благодарности

Выражаем благодарность работникам Центра коллективного пользования при ФГБОУ ВО «КнАГУ» за предоставление оборудования ЦКП и оказание помощи при проведении научных экспериментов на тему статьи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хабибуллаев, М.А. Влияние геометрии режущего инструмента на шероховатость обработанной поверхности / М.А. Хабибуллаев // Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – С. 45–49.

2. Косачев, К.Д. Информационные критерии оценки шероховатости обработанной поверхности при резании / К.Д. Косачев, П.А. Саблин // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2025. – С. 373–375.

3. Pitrmuc, Z. Tool Geometry Influence on Surface Integrity of Machined Austenite Stainless Steel / Z. Pitrmuc, J. Čapek, K. Kolařík, L. Beránek, J. Urban // Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 16, No. 2. – P. 425–431. – DOI: 10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/2/425.

4. Crăciun, C. Surface Quality Optimization in Micromachining with Cutting Tool Having Regular Constructive Geometry / C. Crăciun, M. Bănică, C.I. Chira, M.I. Vornicu // Micromachines. – 2022. – Vol. 13, No. 3. – P. 422. – DOI: 10.3390/mi13030422.

5. Zurawski, M. Comprehensive Analysis of Ball End Mill Geometrical Modification with Statistical Validation / M. Zurawski, D. Kuc, L. Ślusarczyk, S. Legutko // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2026. – Vol. 10, No. 1. – P. 7. – DOI: 10.3390/jmmp10010007.

УДК 620.183.256.2
Липатов Иван Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Lipatov Ivan Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бахматов Павел Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department Welding and Metallurgical Production Technologies named after V.I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАТУННОГО ОБРАЗЦА ПО ЕГО СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАМ
DETERMINATION OF THE METHOD OF MANUFACTURING A BRASS SAMPLE BY ITS STRUCTURE AND PROPERTIES

Аннотация. В работе, на основе проведенных исследований структуры и свойств металлического образца, включающих оптическую спектрометрию, дюрометрию, оптическую и электронную микроскопию поверхности, установлено его соответствие конкретной марке латуни и способа его изготовления. Установлено, что в качестве исследуемого образца оказалась латунь марки Л90, полученная путем волочения.
Abstract. Based on studies of the structure and properties of a metal sample, including optical spectrometry, durometry, optical and electron microscopy of the surface, its compliance with a specific brand of brass and the method of its manufacture has been established. It was found that the brass of the L90 brand, obtained by drawing, turned out to be the test sample.
Ключевые слова: цветной металл, исследование поверхности, химический состав, структура, свойства
Key words: non-ferrous metal, surface study, chemical composition, structure, properties

Введение

Сотрудникам ЦКП «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ» зачастую приходится делать полный химический, микроструктурный, фазовый анализ материалов для установления причин эксплуатационных разрушений или выхода из строя изделий из различных материалов. Проведение такого рода исследований способствую определению соответствия химического состава изучаемых образцов марке материала, установленного сертификатом на изделие, определить очаги зарождения трещины и ее окончания для установления причин разрушения и тп [1, 2].

Целью данной работы являлось по характеристикам и свойствам представленного на исследование образца, применяя оборудование ЦКП «НМиТ», выяснить его марку, способ изготовления.

Материалы и методы

Химический состав исследуемого образца проводился на спектроанализаторе оптико-эмиссионном Q4 TASMAN 170 Bruker.

Анализ микроструктуры сварного соединения осуществлялся на шлифе с помощью металлографического микроскопа Nikon MA200 на увеличениях 100 и 400 крат, проведена пробоподготовка включающая в себя шлифование на шлифовально-полировочном станке «BUEHLER AutoMet 250», полирование алмазными пастами ЗАО «КристАл Лтд» ГОСТ 25593-83 и травление поверхности 10% раствором азотной кислоты в течении 10 мин.

Измерение микротвердости поверхности образца выполнялось с помощью микротвердомера HMV-2 по методу Виккерса при нагрузке 0,05 Н в течение 10 сек.

Для изучения распределение легирующих элементов на растровом электронном микроскопе SEM S-3400N, провели отчистку 96% этиловым спиртом в ультразвуковой ванне.

Результаты

Для исследования предоставлен цилиндрический образец, являющийся отрезком прутка, диаметром 25 мм. Цвет образца золотисто-медный.

При оптико-эмиссионном химическом анализе, содержание легирующих элементов определялось в двух точках и вычислено среднее арифметическое значение по каждому элементу (№ изм. 3). Результаты проведения оптико-эмиссионного анализ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оптико-эмиссионного анализа

№ изм.	Zn, %	Pb, %	Sn, %	Cu, %	Cd, %	Fe, %	Ni, %	Sb, %	Al, %	S, %
1	12	0,031	0,001	87,89	0,002	0,03	0,026	0,002	0,0005	0,0019
2	12	0,02	0,001	87,92	0,002	0,021	0,018	0,002	0,0005	0,0017
3	12	0,026	0,001	87,91	0,002	0,026	0,022	0,002	0,0005	0,0018

продолжение таблицы 1

№ изм.	As, %	Be, %	Ag, %	Bi, %	Mn, %	Si, %	P, %
1	0,0005	0,0002	0,0005	0,011	0,0017	0,0051	0,00072
2	0,0005	0,0002	0,0005	0,0078	0,0013	0,0031	0,00074
3	0,0005	0,0002	0,0005	0,0094	0,0015	0,0041	0,00073

Усредненные значения легирующих элементов, полученных в ходе химического анализа были введены в расчетных калькулятор [4] для определения конкретной марки материала образца, соответствующей марки Л90 - марка двойной медно-цинкового сплава (томпака). Расшифровка маркировки: «Л» указывает на принадлежность материала к категории латуней, «90» - обозначает среднее процентное содержание меди в сплаве (90%). Некоторые физические и механические (в зависимости от состояния поставки) свойства латуни Л90 приведены в табл. 2. Способы производства прутков из Л90: тянутые (холодное волочение), прессованные, литые. Стандарты производства: ГОСТ 2060-2006 - «Прутки латунные» (круглые, квадратные, шестигранные); ГОСТ Р 52597-2006 - прутки для обработки резанием на автоматах; ГОСТ 15527-2004 - «Латунь. Марки» (химический состав).

Для определения состояния поставки исследуемого образца необходимо провести сравнение его структуры и микротвердости со стандартными.

На оптическом электронном микроскопе были получены снимки поверхности исследуемого образца при увеличении в x100, x400, представлены на рис. 1.

Таблица 2

Некоторые физические и механические свойства латуни Л90

Физические свойства		Механические свойства (в зависимости от состояния поставки)			
Плотность, г/см³	8,8–8,9		в мягком (отожжённом) состоянии	в полутвёрдом состоянии	в твёрдом состоянии
Температура плавления, °С	1030–1050	Предел прочности ($\sigma_в$), МПа	260–280	320–350	370–390
Температура горячей обработки, °С	700–850	Предел текучести ($\sigma_т$), МПа	50–60	180–220	300–330
Теплопроводность, Вт/(м·К)	170–180	Относительное удлинение (δ), %	75–85	25–35	8–15
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м	0,035–0,040	Твёрдость по Бринеллю (НВ)	35–45	65–85	95–115
Коэффициент линейного расширения	$(17,5–18,0)\cdot10^{-6}$				
Модуль упругости, ГПа	115–120				

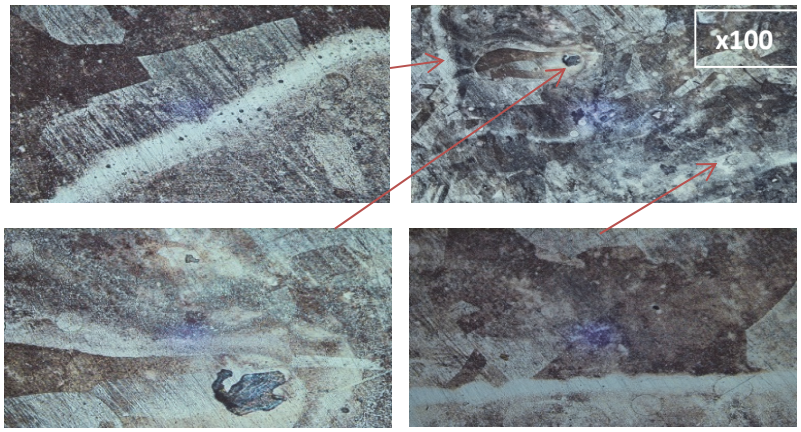


Рис. 1. Микроструктура поверхности исследуемого образца, Х400

Из рис. 1 видно, что структура образца не является литой, о чем свидетельствует отсутствие дендритных кристаллитов. При определении величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур ГОСТ 21073. 1-75 установлена размерность по контрольной шкале II и наблюдаемому номеру микроструктуры №4. Представленную структуру можно определить как однофазную латунь - твердый раствор цинка в решетке меди. После травления, вследствие анизотропии кристаллов, зерна проявились в различной цветовой окраске. Характерные двойники в однородной структуре латуни свидетельствуют о ее состоянии после холодной пластической деформации и рекристаллизационного отжига. Латунь однофазная пластична как в горячем состоянии, так и в холодном.

На растровом электронном микроскопе были получены данные по распределению основных легирующих элементов в поверхностном слое образца, которые представлены на рис. 2.

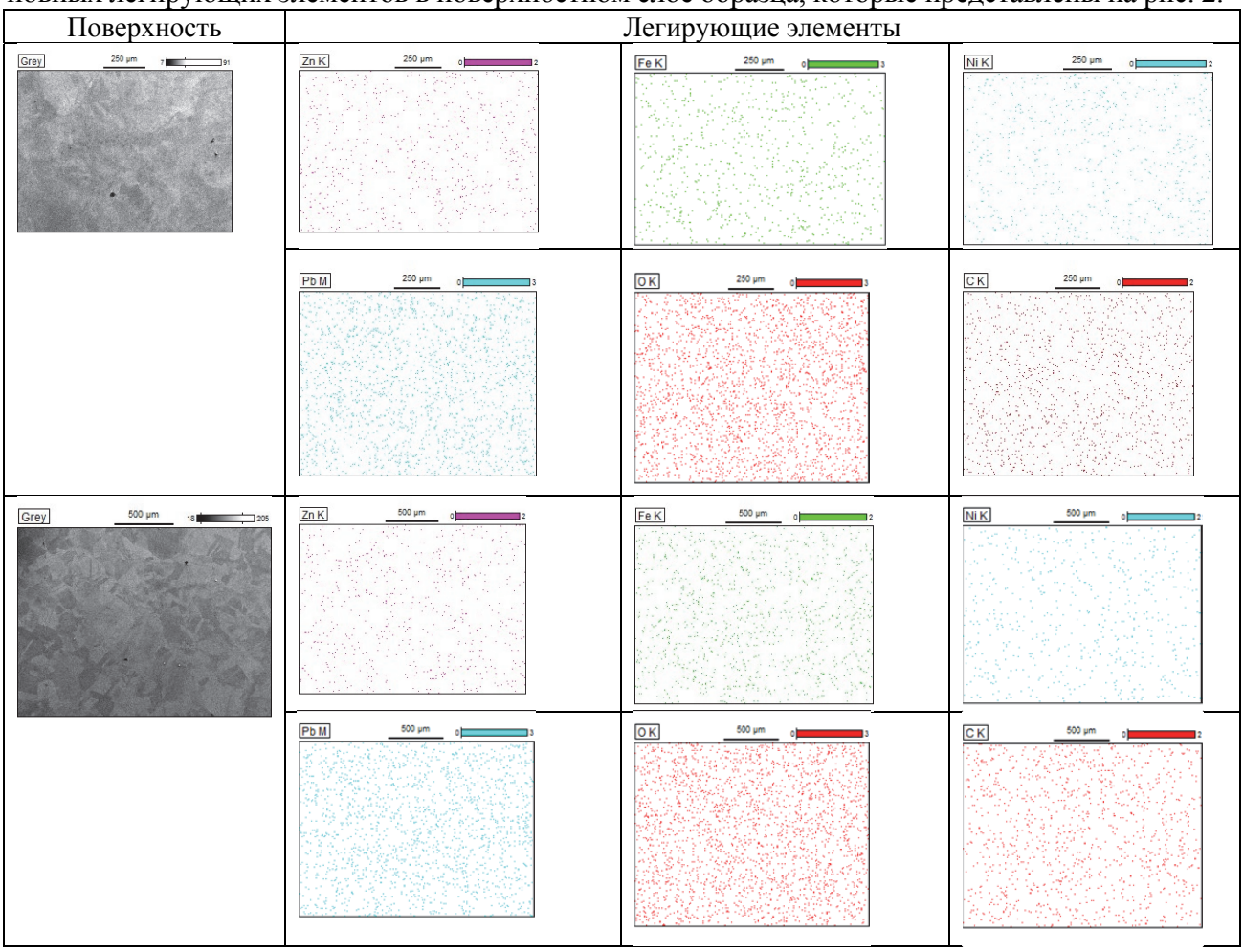


Рис. 2. Распределение легирующих элементов по поверхности образца

Из рис. 2 видно, что в двух исследуемых зонах поверхности образца цинк распределен по границам зерен. Однако остальные легирующие элементы, такие как железо, никель и свинец распределены равномерно по площади поверхности.

Цинк по границам зёрен такое распределение может указывать на: сегрегацию при кристаллизации. В процессе остывания расплава цинк может скапливаться на границах зёрен - там, где структура менее упорядочена. Это типично для неравновесной кристаллизации. Последствия термообработки. Отжиг или другие виды термической обработки могут спровоцировать диффузию цинка к границам зёрен.

Равномерное распределение железа, никеля и свинца говорит о том, что данные элементы: растворяются в медной матрице. Железо и никель хорошо растворяются в меди, формируя твёрдый раствор замещения. Это укрепляет сплав без резкого снижения пластичности. Свинец практически не растворяется в меди, но если он распределён равномерно, значит, образует очень мелкие включения (глобулы).

Результаты измерения микротвердости занесены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения микротвердости

Участок измерения	Прилагаемое усилие	Время, с	Результат измерения, кгс/мм^2
Центр	0,05N	10	98,4
Светлый участок			96
Вкрапление			105

Полученные данные по микротвердости поверхности исследуемого образца из таб. 2 показывают его соответствие твердому состоянию.

Обсуждение результатов

По полученным данным с оптико-эмиссионного анализа можно сделать вывод о том, что исследуемый образец представляет собой сплав латуни марки Л90.

Сравнивая полученные данные с ГОСТ 2208-2007 можно заключить, что образец находится в «полутвердом» или переходном к нему состоянии. Небольшой разброс значений микротвердости (от 96 до 105 кгс/мм^2) вполне допустим и может объясняться локальной неоднородностью микроструктуры, возникшей в результате, например, неравномерной наклепки при холодной обработке или особенностей термообработки образца.

Анализируя полученные данные с рис. 2 видно, что легирующие элементы распределены равномерно по зернам. Это может говорить о том, что образец обладает: высокой пластичностью, отсутствием склонности к горячей хрупкости, высокой коррозионной стойкостью и хорошей обрабатываемостью резанием.

Заключение

В результате проведенных исследований и испытаний установлено, что маркой данного исследуемого образца является латунь марки Л90, пруток был получен холодной пластической деформацией (волочением) с последующим рекристаллизационным отжигом.

Благодарности

Результаты исследования, изложенные в материале, проводились в рамках гранта № ВН001/2023 и при содействии сотрудников ЦКП «Новые материалы и технологии»: Афанасьевой А.А. и Зиновьева О.А.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов, М. В. Особенности технологической подготовки производства при обработке цветных металлов : учебное пособие / М. В. Соколов. – Тамбов : ТГТУ, 2021. – 84 с.

2. Орелкина Т. А., Лопатина Е. С., Меркулова Г. А. и др. Материаловедение. Методы анализа структуры и свойств металлов и сплавов : учеб. пособие / под ред. Т. А. Орелкиной. – Москва : МИСиС, 2020. – 184 с.

3. Латунь: характеристики металла, свойства различных сплавов. – Москва : Металлургия, 2018. – 240 с.

4. Определение сплавов [Электронный ресурс]. – URL: https://scraptraffic.com/opredelenie-splavov?ysclid=mno1vmyfmd957262895 (дата обращения: 2026-04-15).

УДК 62-799
Мамадалиев Махсуд Анвар Угли, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Mamadaliev Makhsud Anvar Ugli, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРАКТИКУ РЕМОНТНЫХ РАБОТ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
IMPLEMENTATION OF NEW TECHNOLOGIES IN THE PRACTICE OF REPAIR WORKS OF PUMPING EQUIPMENT

Аннотация. Предложено внедрение новых технологий ремонтных работ нефтяных и газовых компаний, и их заводов насосного оборудования. Акцент принят на российские технологии, а не на зарубежные производства. Эти технологии активно применяются ведущими нефтяными и газовыми компаниями в условиях добычи месторождения и переработки на НПЗ. Безотказность работы определяет срок технической работы насосного оборудования до его ремонта в интегральном виде. Выполнен расчет оценки насосного оборудования новыми технологиями ремонта алгоритмом вычисления многокритериального метода оценок по пяти показателям, которым должны соответствовать насосно-компрессорные трубы.
Abstract. The introduction of new technologies for the repair of oil and gas companies and their pumping equipment plants is proposed. The focus is on Russian technologies rather than foreign production. These technologies are actively used by leading oil and gas companies in the extraction and processing of oil at refineries. The reliability of operation determines the technical service life of pumping equipment before it needs to be repaired. The calculation of the assessment of pumping equipment using new repair technologies is based on a multi-criteria evaluation method using five indicators that the tubing must meet.
Ключевые слова: безотказность работы, насосы, новые технологии, нефтяные и газовые компании, нефтеперерабатывающие заводы, насосно-компрессорные трубы, многокритериальный метод оценки.
Keywords: reliability, pumps, new technologies, oil and gas companies, refineries, tubing, multi-criteria evaluation method.

Введение

Традиционные методы ремонта насосного оборудования нефтяных и газовых добывающих и перерабатывающих компаний относятся к трудоемким и малоэффективным технологическим воздействиям на них. Большинство единиц насосного оборудования не подлежит ремонту или имеет высокую стоимость для компаний. Здесь можно прибегнуть к реновации, но многие гиганты нефтяных и газовых компаний не имеют таких возможностей. Поэтому в условиях ремонтных отделений этих компаний трудоемко и затратно полностью отремонтировать имеющимися технологиями и методами ремонта насосного оборудования. Новые (инновационные) технологии ремонта полностью не внедрены и не применяются массово в структуре этих предприятий. Для их обеспечения требуется современное технологическое диагностическое и ремонтное оборудование, современные материалы, инструменты и приспособления, высококвалифицированные работники разных специальностей. Насосное оборудование является по себестоимости для таких компаний очень дорогостоящим, поэтому требуется внедрять в работу ремонтных отделений технологии, методы и технологическое оборудование, чтобы избегать ремонта в специализированных сервисах, а выполнять работы до полной исправности собственными силами.

Руководство компаний в расходы на новые технологии обязано выделять материальные средства, чтобы оснастить ремонтные бригады всем необходимым для исправности насосного оборудования, избегая обращения в массовом порядке в сервисные компании по ремонту.

Основная часть

Новые технологии ремонта насосного оборудования нефтяных и газовых компаний имеют цель в исправности, продолжительности технической эксплуатации, уменьшении материальных средств, увеличении эффективности и безотказности, наличии запасных частей в ремонт без обращения в сервисные центы и импортных запасных частей к нему [1].

Новые технологии ремонта тесно соприкасаются с методами ремонта, технологическим оборудованием, материалом, и персоналом [2].

Новыми технологиями ремонта в практике нефтяных и газовых компаний относятся:

- роботизированный ремонт. Применяет в себе первый российский комплекс насосно-компрессорных труб (НКТ). Эта технология ремонта имеет полную автоматизацию и управляет технологическими процессами. В этой технологии задействованы две автоматизированные линии, которые не только проводят ремонт НКТ, но наносят напыление на детали, узлы и агрегаты;

- реновация НКТ, которые утратили исправность, и подлежат ремонту с восстановлением. В этой реновации применяется технология лейнирования. По такой технологии наносится герметик с заполнением дефектов, коррозионных отверстий, «язв» во внутренней поверхности, не соприкасаясь внешней;

- рециклинг насосных штанг использует технологию нанесения горячей радиальной сдвиговой деформации «тела» штанги большого диаметра на малый диаметр.





Рис. 1. Линии нового поколения по диагностике и ремонту НКТ «TMC-Hightech» и насосных штанг «TMC-SRLine» производства компании «TMC групп»

Безотказность работы характеризует свойство надежности насосного оборудования до его отказа. В интегральном виде безотказность работы имеет вид [3]:

$$P(t) = P(T \succ t) = \int_{t}^{\infty} f(t)dt \quad , \qquad (1)$$

где T –время на наработку отказа; f(t) – плотность распределения времени до отказа.

Выбор насосного оборудования новыми технологиями ремонта определяем алгоритмом вычисления многокритериального метода оценок по трехбалльной системе по собственной объективной оценке и технической информации из интернет-источников.

В каждом варианте суммируем оценки по критериям и умножаем на весовые коэффициенты (из таблицы 1):

- Центробежные насосы:

$$3 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}3 + 2 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}1 = 0{,}6 + 0{,}4 + 0{,}9 + 0{,}4 + 0{,}1 = 2{,}4.$$

- Шестеренные насосы:

$$2 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}3 + 1 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}1 = 0{,}4 + 0{,}4 + 0{,}9 + 0{,}2 + 0{,}2 = 2{,}1.$$

- Поршневые насосы:

$$2 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}3 + 2 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}1 = 0{,}4 + 0{,}2 + 0{,}9 + 0{,}4 + 0{,}2 = 2{,}1.$$

- Винтовые насосы:

$$1 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 3 \cdot 0{,}3 + 2 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}1 = 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}9 + 0{,}4 + 0{,}2 = 1{,}9.$$

Таблица 1

Оценка насосного оборудования новыми технологиями ремонта

Тип насоса	Стоимость оборудования (0,2)	Мощность (0,2)	Надежность оборудования (0,3)	Конструктивные параметры (0,2)	Безопасность (0,1)	Итого
Центробежные	3	2	3	2	1	2,4
Шестеренные	2	2	3	1	2	2,1
Поршневые	2	1	3	2	2	2,1
Винтовые	1	1	3	2	2	1,9

Предпочтительным выбором среди насосов для подачи нефти и газа являются центробежные насосы. Но остальные виды насосного оборудования применять так же необходимо, если это определяется функциональностью и потребностью в них.

Заключение

Новые технологии в практике ремонта насосного оборудования достигаются за счет капитальных материальных вложений в фонды, приобретения требуемого технологического оборудования и инструментов, снижения себестоимости производства углеводородов с отчислением на эффективность инноваций.

Новые технологии внедрены в ремонтные работы насосного оборудования у «игроков» российского углеводородного бизнеса. Среди них такие нефтегазовые компании как Роснефть, Татнефть, Сургутнефтегаз, Новатэк.

Сегодня Очерский Машиностроительный Завод работает с новой технологией ремонта насосов с устранением дефектов штанг насосов технологией рециклинга. Такой положительный производственный опыт могут перенимать большинство российских нефтяных и газовых компаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юшин, Е. С. Насосное оборудование системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: конструкция, эксплуатация и расчет : учебное пособие / Е. С. Юшин. – Вологда : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Инфра-Инженерия", 2022. – 212 с. – ISBN 978-5-9729-0957-5. – EDN GRAAZR.

2. Двинин, А. А. Типовые центробежные насосы в нефтяной промышленности : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130602 "Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов" направления подготовки специалистов 130600 "Оборудование и агрегаты нефтегазового производства" / А. А. Двинин, А. А. Безус ; А. А. Двинин, А. А. Безус ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Тюменский гос. нефтегазовый ун-т". – Тюмень : ТюмГНГУ, 2010. – 231 с. – ISBN 978-5-9961-0237-2. – EDN QMZACJ.

3. Сошников, Е. В. Проектирование и эксплуатация нефтеперекачивающих станций : учебно-методическое пособие по выполнению практических работ / Е. В. Сошников. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2020. – 51 с. – EDN KAOFPC.

УДК 621.785.369
Марцелев Кирилл Денисович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Marcelev Kirill Denisovich , student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бахматов Павел Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Welding and Metallurgical Production Technologies named after V.I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ОТПУСКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE TYPE OF TEMPERING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE WELDED JOINT

Аннотация. В работе приведен сравнительный анализ влияния высоко- и низкотемпературного отпуска (ВТО и НТО) металла шва двухсторонних сварных стыковых соединений тонколистовой низкоуглеродистой стали, выполненных автоматической сваркой под слоем флюса на их структуру и свойства.
Abstract. The paper presents a comparative analysis of the effect of high- and low-temperature tempering of the seam metal of double-sided welded butt joints of thin-sheet low-carbon steel made by automatic welding under a layer of flux on their structure and properties.
Ключевые слова: автоматическая сварка под флюсом, низкоуглеродистая сталь, высоко – и низкотемпературный отпуск, структура и свойства металла.
Key words: automatic submerged arc welding, low carbon steel, high and low temperature tempering, metal structure and properties.

Введение

Известно [1, 2], что структура металла шва и свойства сварных соединений низкоуглеродистых сталей при автоматической сварке под слоем флюса определяются значительным количеством как технологических факторов (состав флюса и проволоки, режимы сварки, температура предварительного и сопутствующего подогрева, межваликовая температура и др), так и свойствами свариваемого металла (теплопроводность, химический состав, определяющий диапазон начала и конца фазовых превращений в металле при расплавлении, кристаллизации и охлаждении и др).

Скорости охлаждения играют ключевую роль в создании структуры металла шва при дуговой сварке. Практически невозможно дуговым воздействием при формировании сварочного валика обеспечить такие скорость охлаждения, чтобы получить в металле ферритно-перлитной стали аналогичную структуру сварного шва, которая будет содержать структурные составляющие перлита, такие как бейнит, сорбит. Вместе с тем критические скорости охлаждения вызывают рост дендридов (столбчатых кристаллитов) от линии сплавления в центр шва, делая ее наиболее уязвимой зоной разрушения сварного соединения при растяжении. Для исправления структурной неоднородности, гомогенизации структурных составляющих металла шва и основного металла проводят термообработку сварных конструкций, преимущественно отпуск.

Наилучшим средством выбора режима отпуска являются диаграммы изотермического распада аустенита [3]. Для низкоуглеродистой стали получение перлитной структуры сварных швов возможно как высокотемпературным отпуском (нагрев до температуры аустенизации AC_1 с дальнейшим плавным охлаждением), так и низкотемпературным (нагрев до 500-600 °С, значительной выдержкой и резким охлаждением). При этом, пребывание металла длительное время при высокой температуре приводит к росту аустенитного зерна и снижению механических свойств сварного соединения. Поэтому установление вида отпуска и па-

раметров термической обработки для конкретного типа сварных соединений является актуальной задачей.

Материалы и методы

Стыковое сварное соединение С7 двух листовых заготовок 500х100х3,85 мм из низкоуглеродистой стали Ст20 выполнялось автоматической сваркой под слоем флюса на весу с помощью сварочного автомата АДФ-1000 с использованием сварочной проволоки Св-08А и флюса АН-42.

Из сварной пластины нарезаны 3 испытательных образца, первый исследовался без термообработки, второй подвергнут высокотемпературному отпуску (нагрев с печью до 800°С, остывание в печи до температуры 450°С со скоростью 150°С/ч, далее на воздухе), третий низкотемпературному отпуску (нагрев с печь до 550°С, выдержка 30 мин, остывание с печью).

Термообработка образцов сварных соединений производилась в камерной лабораторной электропечи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И1М, предназначенной для аналитических работ и термической обработки изделий и материалов при температуре до 1100 °С.

Из каждого испытательного образца изготовлены 2 образца на растяжение, 2 на ударную вязкость, 2 на угол загиба, 2 на микроструктурные исследования. Образцы для испытаний отбирались из проб, вырезанных из сваренных пластин согласно ГОСТ 6996-66. Образцы вырезались и шлифовались с помощью УШМ отрезным и лепестковым дисками.

Испытание металла различных участков сварного соединения на ударный изгиб проводилось на 2-х образцах тип XI при помощи маятникового копра JB-W300. Концентратор наносился на одном образце по середине сварного шва, на другом по линии сплавления при помощи станка для нанесения U- или V-образного концентратора. Испытание сварного соединения на статическое растяжение выполнялось на 2-х образцах тип XII с помощью испытательной машины INSTRON 3382 при скорости нагружения 10 мм/с. Испытание сварного соединения на статический изгиб проводилось на 2-х образцах тип XXVII до стола приспособления при помощи испытательной машины INSTRON 3382, расстояние между опорами 75 мм. Угол изгиба измерялся с помощью транспортира.

Анализ микроструктуры сварного соединения осуществлялся на шлифе с помощью металлографического микроскопа Nikon MA200 на увеличениях 100 и 400 крат. Шлиф изготавливался путем заливки эпоксидной смолы в форму с вырезанным образцом сварного соединения. После затвердения смолы (спустя 24 ч) образец шлифовался на шлифовально-полировальном станке EcoMet 250 Pro при нагрузке на образец 20Н и скорости вращения основания 80 об/мин наждачной бумагой Р1000, Р800, Р600, Р400, Р320, Р180, Р100. Затем образец полировался на канцелярской бумаге и ткани с помощью алмазных паст АСМ 14/10, 7/5, 5/3, 3/2, 2/1 и травились в 5% спиртовом растворе азотной кислоты до проявления структуры.

Фрактография изломов осуществлялась на образцах после испытания на ударный изгиб с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM S-3400N. Образцы предварительно очищались в ультразвуковой ванне от грязи, масла и прочих загрязнений.

Измерение микротвердости сварного соединения выполнялось по центру образца через каждые 2 мм с помощью микротвердомера HMV-2 по методу Виккерса при нагрузке 0,2452 Н в течение 10 сек.

Результаты

Результаты проведения механических испытаний сведены в табл. 1. Наилучшими показателями испытаний на ударный изгиб, статическое растяжение и изгиб обладают образцы не подвергнутые термообработке. Это объясняется наличием дефектов сварного соединения в виде непровара и частичного несплавления кромок в образцах, прошедших термообработку. Наихудшие результаты в этих испытаниях в образцах после НТО, но по показателям микротвердости они отличаются минимальным разбегом: 130-185 HV, что свидетельствует о наибольшей пластичности и гомогенности металла шва с основным металлом.

Таблица 1

Результаты механических испытаний

Вид ТО	KCV, Дж/см^2	Статическое растяжение				Угол загиба, град	Микротвердость, HV	
		$\sigma_в$, МПа	ψ, %	δ, %	Разрушение		min	max
После сварки	95,4 83,3	307,7 345,5	16,7 15,3	46,2 45,3	Основной металл Основной металл	130 127	110	270
ВТО	81,0 83,3	210,7 324,4	3,1 7,6	50,5 47,3	Линия сплавления Линия сплавления	127 125	120	200
НТО	77,9 21,6	234,9 232,2	1,99 0,6	12,5 13,2	Металл шва Линия сплавления	117 102	130	185

Результаты фрактографии представлены на рис. 1. Характер разрушения – вязкий, так как поверхность с выраженными шероховатостью, неровностями и ямками. Вязкое разрушение начинается с образования пор, которые при дальнейшем увеличении нагрузки соединяются, образуя характерный ямочный микрорельеф. Вязкое разрушение относится к энергоемкому разрушению, так как большая часть энергии затрачивается на пластическую деформацию материала. Поэтому вязкий излом свидетельствует о высоком уровне нагрузки, предшествующей разрушению, и о хорошем сопротивлении материала развитию трещины. Наименьшей размерностью ямок обладают образцы после НТО.

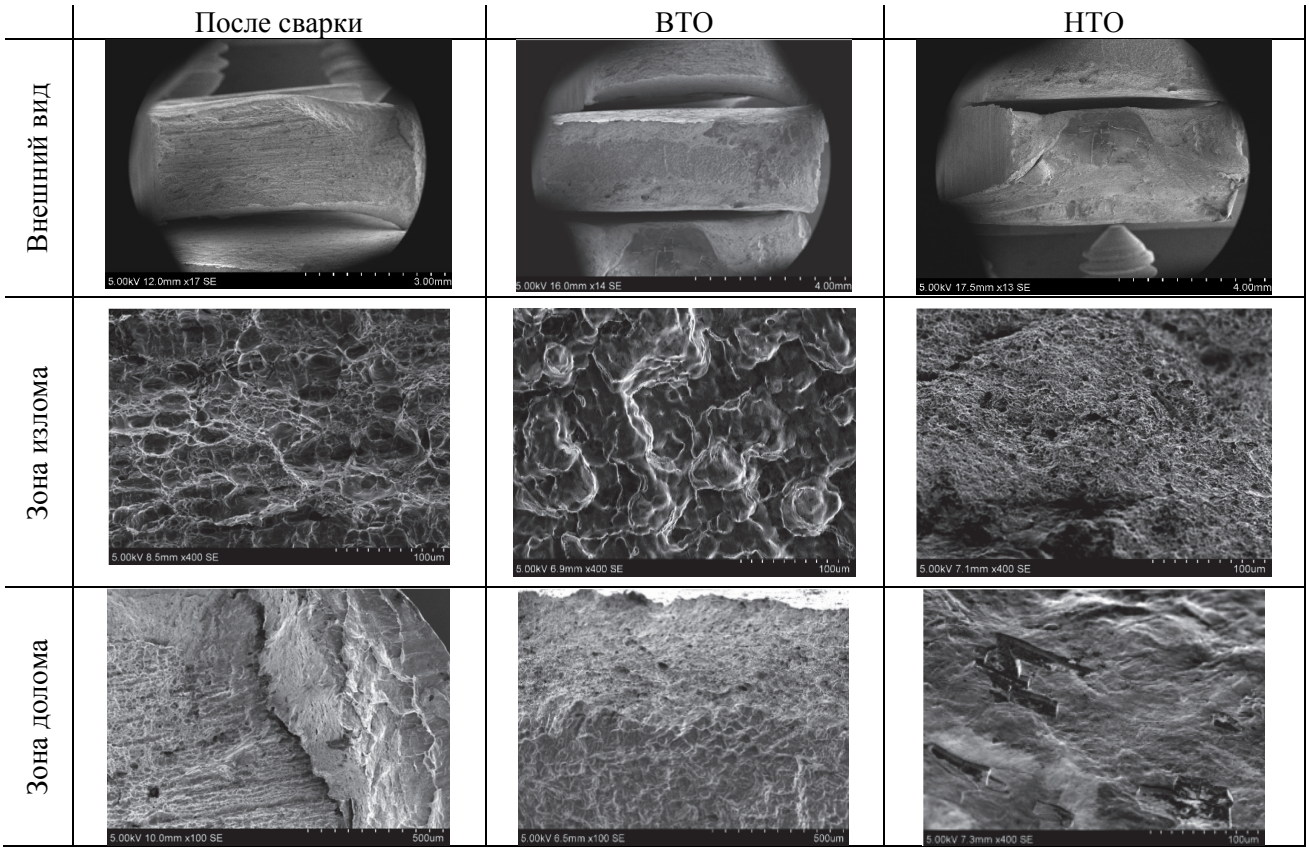


Рис. 1. Фрактография сварных образцов после испытаний на ударный изгиб

Результаты исследований микроструктуры приведены на рис. 2. Для сварного соединения без термообработки характер микроструктуры следующий: основной металл – феррито-перлитная структура ряд Б балл 2 – однадве сплошные и несколько разорванных полос из равноосных зерен феррита согласно ГОСТ 5640-2020; сварной шов – видманштеттова структура ряд А балл 3 – видманштеттова структура с тонкими иглами, отходящими от ферритной сетки и расположенными внутри зерен согласно ГОСТ 5640-2020. Бальность структуры у образцов, подвергнутых ВТО и НТО выше и близок к основному металлу, особенно у образцов после НТО.

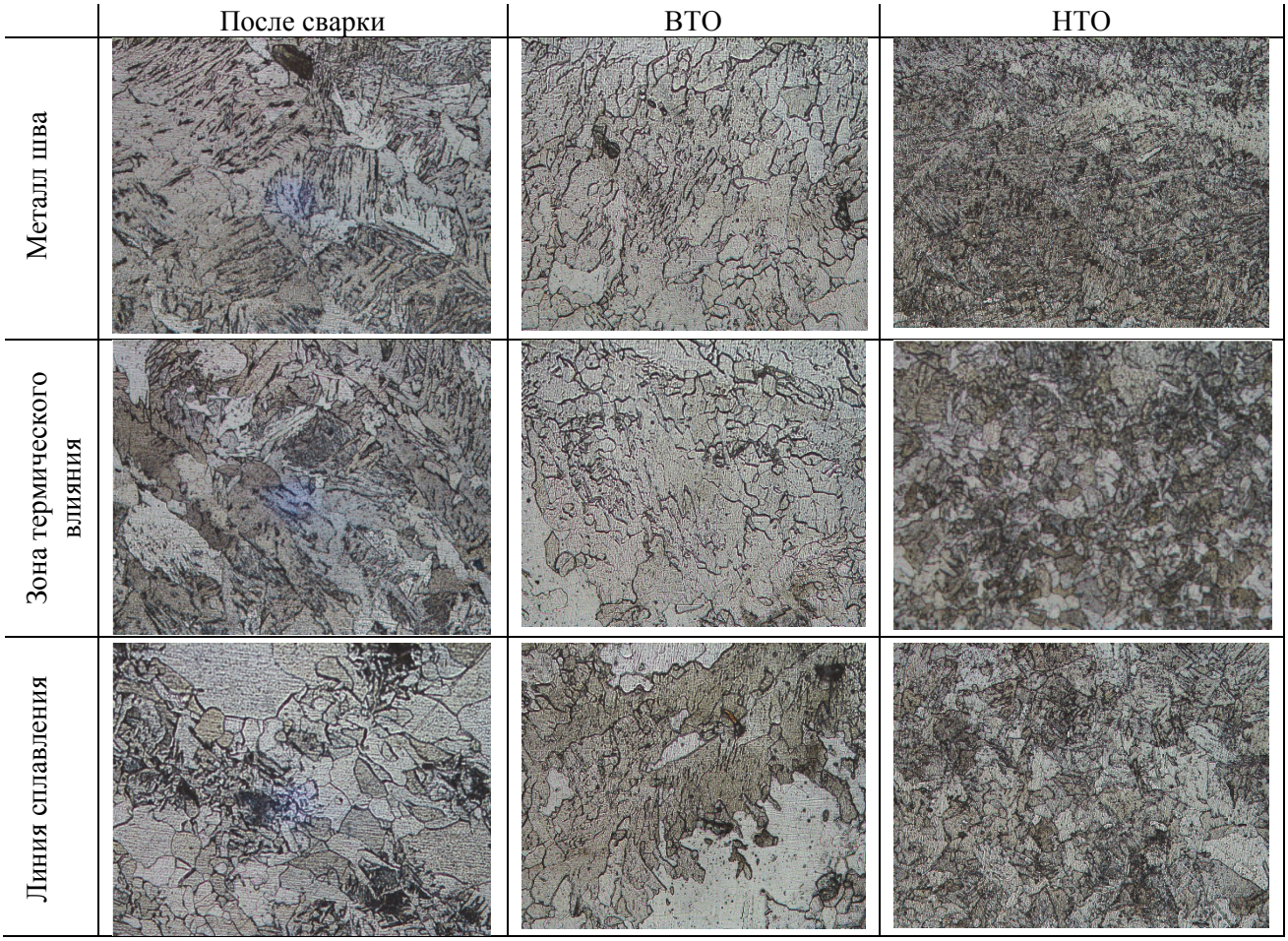


Рис. 2. Микроструктура сварных образцов после различных видов ТО, х400

Обсуждение результатов

Таким образом, структура между 3-мя образцами вполне одинакова, по фрактографии изломов видно, что 3-й образец самый удачный, не смотря на смешанный характер разрушения, а график на микротвердость указывает, например в сравнении с 1-м образцом, на более близкое значение к норме, но все-же он имеет неравномерный, скачкообразный характер, обусловленный двухфазной структурой стали (феррит + перлит). Минимальное значение 121 HV характеризует твердость феррита, а максимальное 185 HV — твердость перлитных участков.

Заключение

ВТО и НТО действительно способствуют изменению структуры сварного шва в отношении уменьшения количества закалочных структурных составляющих (исчезновению видманштеттной структуры), глобуляции зерен и кратного уменьшения их размерности. При этом наилучший результат характерен для НТО.

Механические свойства сварных соединений в данной работе оказались в прямой зависимости от исходного качества сварного соединения. Наличие непровара и частичного несплавления кромок в образцах, предназначенных для термообработки, привело к снижению их показателей прочности и пластичности, рассчитываемых программным обеспечением испытательной машины, исходя из условий целостности образца.

Благодарности

Результаты исследования, изложенные в материале, проводились в рамках гранта № ВН001/2023 и при содействии сотрудников ЦКП «Новые материалы и технологии»: Афанасьевой А.А. и Зиновьева О.А.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Старцев Е. А., Григорьев В. В., Бахматов П. В. «Структура и свойства сварного соединения при дуговой сварке низкоуглеродистой стали под слоем флюса, полученного из металлургического шлака электросталеплавильного производства» // «Вопросы материаловедения», 2024, № 2 (118), с. 104–121

2. Грабин В. Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. - Киев : Наукова думка, 1978. - 271 с.

3. Попов А. А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлаждённого аустенита : справочник термиста / А. А. Попов, Л. Е. Попова. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Металлургия, 1965. - 495 с..

УДК 620.192.6

Миргородская Анастасия Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Mirgorodskaya Anastasiya Nikolaevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Калугина Анна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kalugina Anna Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ВИДЫ И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ПРИВОДА МЕХАНИЗМА УБОРКИ ШАССИ САМОЛЁТА
TYPES AND CAUSES OF DESTRUCTION OF THE GEAR WHEEL OF THE AIRCRAFT LANDING GEAR RETRACT MECHANISM

Аннотация. В работе рассмотрены основные виды разрушения зубчатых колёс привода механизма уборки шасси самолёта, а также проанализированы ключевые причины их возникновения. На основе изучения эксплуатационных данных и результатов технического осмотра выявлены наиболее распространённые типы повреждений: усталостное выкрашивание, абразивный износ, заедание, излом зуба, питтинг и задир поверхности.

Abstract. This paper examines the main types of failure of aircraft landing gear drive gears and analyzes their key causes. Based on a study of operational data and technical inspection results, the most common types of damage were identified: fatigue spalling, abrasive wear, seizure, tooth fracture, pitting, and surface scuffing.

Ключевые слова: зубчатое колесо, редуктор, дефекты зубчатого колеса, причины разрушения зубчатого колеса, виды разрушений зубчатого колеса.

Key words: gear wheel, gearbox, gear wheel defects, causes of gear wheel failure, types of gear wheel failure.

Введение

Привод механизма уборки шасси — критически важный элемент конструкции самолёта, от надёжности которого напрямую зависит безопасность полётов. Зубчатые колёса в составе этого привода испытывают значительные циклические нагрузки: динамические удары при выпуске и уборке шасси, вибрационные воздействия, контактное напряжение в зоне зацепления [1]. В условиях эксплуатации авиационной техники даже незначительные дефекты зубчатых колёс могут привести к серьёзным последствиям — вплоть до отказа системы и аварийной ситуации.

Безаварийная работа любого ответственного механизма обеспечивается соблюдением целого комплекса различных мероприятий от этапов проектирования до мер по периодическому контролю и своевременному обнаружению дефектов [2].

Цель работы – систематизировать виды разрушения зубчатых колёс привода механизма уборки шасси самолёта и выявить основные причины их появления.

Материалы и методы

Основными методами по контролю за дефектами зубчатых колёс и предупреждению аварийных ситуаций носят методы макроскопического анализа, включающие в себя визуальный осмотр, с целью обнаружения износа зубьев шестерни. Наряду с методами макроскопического анализа применяются так же методики неразрушающего контроля, регулируемыми ГОСТ Р 56542-2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов». Наиболее широкое распространение получили такие методы неразрушающего контроля как магнитопорошковый, капиллярный, ультразвуковой, вихретоковый и визуально-оптический. Выбор метода зависит от материала детали, типа предполагаемых дефектов, геометрии зубчатых колёс и требований к чувствительности контроля. Зачастую при анализе применяется сразу несколько методов, что позволяет повысить достоверность получаемых результатов. Например, капиллярный метод может быть дополнен ультразвуковым или вихретоковым при контроле особо ответственных деталей.

В случаях, если разрушения механизма избежать не удалось, в таком случае проводятся исследования для определения причин разрушения. Анализ причин усталостного разрушения материала зубьев помогает выявлять начальные стадии зарождения микротрещин и предупреждать в дальнейшем развитие дефектов в аналогичных механизмах.

Результаты и обсуждение

Визуальный осмотр характера износа поверхности зуба позволяет определить правильность пятна контакта, или же его нарушение. Если нагрузка на колесо соответствует номинальной, то профиль зуба не будет деформирован, на поверхности зуба не будет значительных следов местного трения (рис. 1).

При ошибках при проектировании и изготовлении пятно контакта на поверхности зубьев неравномерное, соответственно воздействию подвергается только какая-то часть поверхности зуба, что приводит к превышению рабочей нагрузки на эту часть и неравномерному распределению нагрузки на все колесо.

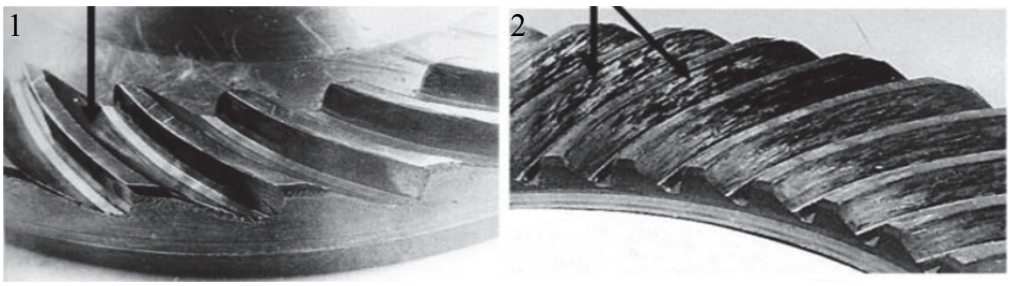


Рис. 1. Примеры износа зубьев:
1 – правильное пятно контакта; 2 – задиры на поверхности трения

Используя такой метод визуального контроля как цветовая индикация, проводится визуальный осмотр и установление правильности износа зубчатого колеса (рис. 2).



Рис. 2. Определение пятна контакта методом цветовой идентификации

Основными причинами поломки цилиндрических зубчатых передач является абразивный износ зубьев, и как следствие заедание механизма, потеря кинематической точности,

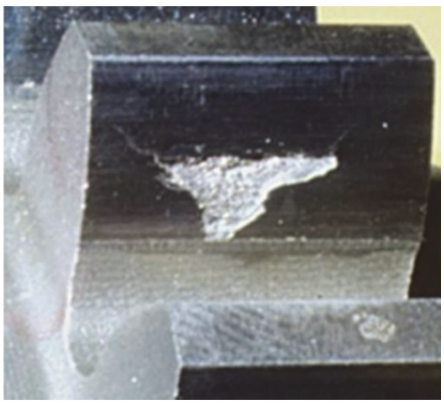
возникновение риска излома зубьев. Идентифицировать данный дефект можно при визуальном осмотре зон основания зубьев, нерабочих сторон профиля, а в случаях сильного загрязнения смазки износ может произойти по всей длине рабочей поверхности (рис. 3).



Рис. 3. Абразивный износ зубчатого колеса

Усталостное выкрашивание (питтинг) представляет собой небольшие ямки и раковины, образующиеся на рабочей поверхности зуба, преимущественно в зоне полюса зацепления, на расстоянии 2-5 мм от делительной окружности (рис. 4). Такой тип дефектов образуется в случае воздействия повторно-переменных контактных напряжений, вследствие чего образуются микротрещины на поверхности зубьев в зоне максимальной нагрузки и трения. В образовавшиеся микротрещины, в процессе эксплуатации зубчатого колеса, начинает затекать смазочный материал и создает расклинивающий эффект.

Выделяют две разновидности усталостного выкрашивания: ограниченное выкрашивание и прогрессирующее выкрашивание. Первый вид не столь опасен, так как локализуется в зонах концентрации напряжений и как правило прекращается после приработки рабочей поверхности. Второй вид распространяется на всю рабочую поверхность ножки зуба и ведёт к быстрому износу и задиру.

1 

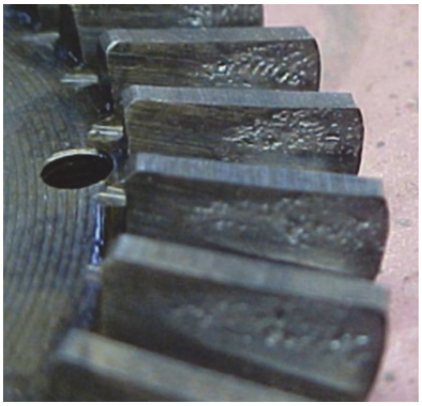
2 

Рис. 4. Усталостное выкрашивание (питтинг):
1 - выкрашивание; 2 - мелкие ямки и раковины на рабочей поверхности зубьев

В ряде случаев может наступить аварийная ситуация, в результате полного или частичного отделения зуба от тела колеса – излом (рис. 5). Изломы так же принято делить на два типа: усталостный и возникший вследствие перегрузки. Изломы от перегрузки возникают мгновенно, как правило, под воздействием ударных нагрузок. Особое внимание стоит уделить усталостному разрушению зубчатых колес и шестерней. С точки зрения материаловедения оно представляет наибольшую проблему. Любое зубчатое колесо работает в условиях знакопеременных механических нагрузок, постепенно накапливаясь, усталостные напряжения приводят к разрушению детали.

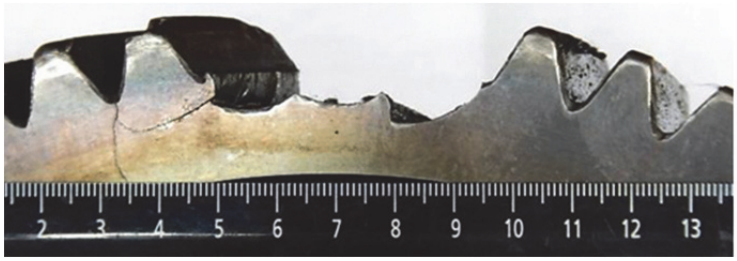


Рис. 5. Излом зуба с полным отделением от поверхности тела колеса

Усталостный излом начинается с трещины у основания зуба на стороне растяжения и развивается постепенно (рис. 6). Такой вид разрушения можно вовремя обнаружить при осуществлении регулярного контроля за качеством поверхности материала зубчатых колёс, и предупредить аварийную ситуацию.



Рис. 6. Усталостная трещина на зубчатом колесе

Часто зарождение трещин происходит в местах концентрации напряжений: это могут быть риски после механической обработки или резкие переходы в сечении. Чтобы снизить вероятность усталостного разрушения рекомендуется не превышать нагрузку на зубья выше, чем проектная; проводить тонкую механическую обработку рабочих поверхностей, избегать перегревов передачи, соблюдать точность монтажа [3].

Заключение

Проведённый анализ позволил систематизировать основные виды разрушения зубчатых колёс, эксплуатируемых в составе привода механизма уборки шасси самолёта, и охарактеризовать их ключевые особенности. Понимание типологии и механизмов разрушения зубчатых колёс является основой для повышения надёжности авиационных механизмов. Систематизация видов повреждений позволяет разрабатывать адресные меры защиты, оптимизировать графики технического обслуживания и снижать риски отказов, напрямую влияющие на безопасность полётов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плеханов, В. И. Анализ и установление причин разрушения тяжелонагруженных зубчатых передач / В. И. Плеханов, Н. Ф. Коленчин, В. В. Китаев // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1(107). – С. 106-115. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-106-115. – EDN QWZIPL.

2. Махамбетов Э.М., Балыбин Е.В. Дефекты и неисправности зубчатых передач // Россия молодая : Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 073302.1-3.– EDN BVBTBE.

3. Морозова, Л. В. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации / Л. В. Морозова, М. Р. Орлов // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1(38). – С. 37-48. – DOI 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48. – EDN VKAIOL.

УДК 621.791.794
Михайлов Александр Юрьевич, аспирант, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»; ассистент, Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова.
Mikhailov Aleksandr Yurevich, Post-graduate student, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS – a separate subdivision of the Yakut Scientific Centre SB RAS; assistant, North-Eastern Federal University in Yakutsk.
Сидоров Михаил Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН».
Sidorov Mikhail Mikhailovich, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS – a separate subdivision of the Yakut Scientific Centre SB RAS.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ В СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 10ХСНД
EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL WELDING STRESSES BY X-RAY DIFFRACTOMETRY IN LOW-ALLOY STEEL 10KHSND JOINTS

Аннотация. Работа направлена на исследование особенностей формирования остаточных сварочных напряжений (ОСН) в сварных соединениях из низколегированной стали 10ХСНД, выполненных при комнатной и отрицательной температурах. Экспериментально показано, что при снижении температуры сварки существенно усиливаются растягивающие остаточные напряжения, достигающие значений 160 МПа (поперечные) и 197 МПа (продольные) при -35°С. Полученные результаты подтверждают важность учёта температурных условий сварки при проектировании и производстве сварных конструкций, рассчитанных на эксплуатацию в суровых климатических условиях.
Abstract. This work focuses on investigating the formation features of residual welding stresses (RWS) in welded joints made from low-alloy steel grade 10HCHD under both ambient and negative temperature conditions. Experimental studies demonstrate that reducing the welding temperature significantly intensifies tensile residual stresses, reaching values up to 160 MPa (transverse) and 197 MPa (longitudinal) at −35°C. These findings highlight the importance of considering welding temperature conditions when designing and manufacturing welded structures intended for operation in harsh climatic environments.
Ключевые слова: сварные соединения, низколегированная сталь, остаточные сварочные напряжения, рентгеновская дифрактометрия, холодостойкие стали.
Key words: welded joints, low-alloy steel, residual welding stresses, X-ray diffractometry, cold-resistant steels.

Введение

Несмотря на многолетнюю историю сварочного производства, проблема остаточных сварочных напряжений (ОСН) продолжает оставаться одной из центральных как в фундаментальной науке, так и в инженерной практике. ОСН возникают вследствие сложного сочетания тепловых, структурных и деформационно-прочностных процессов, протекающих в зоне сварного соединения. Эти напряжения негативно сказываются на эксплуатационных характеристиках сварных конструкций, снижая их выносливость и сопротивляемость хрупкому разрушению, особенно в условиях низких температур [1-3].

За последние десятилетия опубликовано значительное число работ, посвящённых изучению ОСН в сварных соединениях различных материалов. Однако большинство исследований выполнено для углеродистых и высоколегированных сталей, тогда как сварные соединения из низколегированных сталей, таких как 10ХСНД, остаются сравнительно слабо изученными, несмотря на широкую область их применения в конструкциях, эксплуатируемых в суровых климатических условиях.

Одной из ключевых особенностей сварных соединений из низколегированных сталей является их повышенная чувствительность к температурным условиям сварки. Известно, что при понижении температуры сварки существенно изменяется тепловой цикл, что отражается на уровне и характере распределения ОСН [4–5]. Вместе с тем, систематических исследований, раскрывающих механизм формирования ОСН в сварных соединениях из стали 10ХСНД при отрицательных температурах, практически не проводилось.

Исходя из вышесказанного, существует недостаток сведений о том, каким образом температурные условия сварки влияют на формирование ОСН в сварных соединениях из низколегированных сталей, эксплуатируемых в условиях низких температур. Данное обстоятельство подчеркивает актуальность и своевременность настоящего исследования.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния температурных условий сварки (комнатная и отрицательная температуры) на величину и характер распределения остаточных напряжений в сварных соединениях из стали 10ХСНД.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить механизмы формирования ОСН в сварных соединениях из низколегированной стали 10ХСНД при различных температурных условиях сварки.

2. Экспериментально исследовать распределение ОСН в сварных соединениях, выполненных при комнатной и отрицательной температурах, с использованием рентгеновской дифрактометрии.

3. Проанализировать причины усиления уровня ОСН при сварке в условиях отрицательных температур.

4. Сделать обоснованные выводы о необходимости учёта температурных условий сварки при проектировании и производстве сварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в суровых климатических условиях.

Методика и проведение эксперимента

Материалом исследования выбрана низколегированная хладостойкая сталь 10ХСНД-3, химический состав которой характеризуется наличием легирующих компонентов, обеспечивающих сочетание прочности и пластичности при низких температурах.

Перед сваркой вырезались из листового проката пластины размерами 350х170х14 мм, с предварительной подготовкой кромок по типу С17 (V-образная разделка без подкладки) согласно ГОСТ 5264-80.

Сварка проводилась в 5 проходов без принудительного охлаждения между ними в условиях комнатной температуры +20°С и отрицательных температур окружающего воздуха (-35°С), имитирующей реальные производственные условия Севера. Применялись электроды марки WN 62U, прошедшие предварительную прокалку при 380°С в течение 1 часа.

В процессе сварки выполнялись остановки для зачистки шва от шлака, брызг металла и других загрязнений. Образцы фиксировались в специальном кондукторе для предотвращения деформаций. Источником питания служил аппарат постоянного тока НЕОН-315 с обратной полярностью и нижним расположением электрода.

ОСН определяли рентгеновским методом с помощью портативной рентгеновской аппаратуры (ПРОН), основанного на измерении межплоскостных расстояний в кристаллической решетке. Метод позволяет определять как продольные (σ_x), так и поперечные (σ_y) компоненты напряжённого состояния.

Методика определения ОСН состоит в следующем:

1. Подготовка поверхности образца: механическая зачистка, шлифовка и травление для обеспечения чистоты и шероховатости, необходимой для качественной рентгеновской съёмки.

2. Настройка рентгеновской трубки, состоящая из калибровки прибора, установка необходимого диапазона энергий излучения, определение угла падения луча, времени съемки.

3. Съёмка рентгенограммы: получение дифракционной картины, характеризующей внутреннее напряжённое состояние материала.

4. Расчёт напряжений: обработка рентгенограмм с определением смещения линий дифракции, соответствующее величине остаточных напряжений.

5. Интерпретация результатов: построение эпюр или гистограмм распределения напряжений по длине сварного соединения и оценка их влияния на эксплуатационные характеристики.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования показали, что после сварки при комнатной температуре в сварном соединении формируются заметные растягивающие остаточные напряжения (рис. 1, а). Их максимальное значение составило:

- Поперечные напряжения σ_y – до 60 МПа.
- Продольные напряжения σ_x – до 148 МПа.

Более высокие значения растягивающих ОСН наблюдается при сварке в условиях отрицательных температур (рис. 1, б):

- Поперечные напряжения σ_y – до 160 МПа.
- Продольные напряжения σ_x – до 197 МПа.

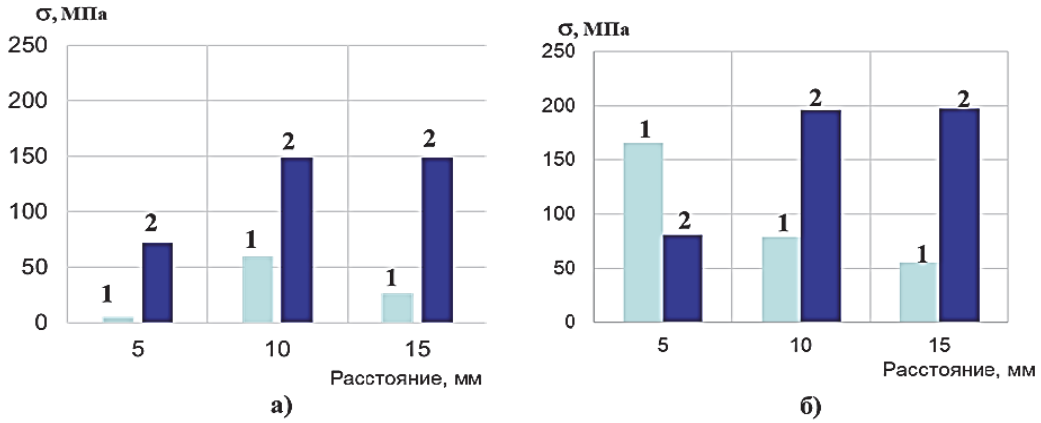


Рис. 1. Распределение ОСН в сварных соединениях пластин из стали 10ХСНД, выполненных сваркой при комнатной +20°С (а) и отрицательной температуре -35°С (б): 1. Поперечные напряжения, 2. Продольные напряжения

Повышенный уровень ОСН при отрицательных температурах обусловлен следующими причинами:

1. Ускоренное охлаждение – при низких температурах теплообмен с окружающей средой интенсифицируется, что приводит к увеличению скоростей охлаждения и росту градиентов температур.

2. При отрицательной температуре окружающей среды скорость остывания металла возрастает, а время нахождения в высокотемпературной области (где возможна релаксация напряжений за счет ползучести) сокращается. В результате напряжения не успевают частично релаксировать и формируются в ЗТВ на более высоком уровне.

3. Изменение механизма пластической деформации – при низких температурах пластичность материала снижается, что затрудняет снятие напряжений и способствует их накоплению.

Таким образом, полученные результаты однозначно демонстрируют зависимость уровня остаточных напряжений от температурных условий сварки: чем ниже температура, тем выше уровень ОСН. Экспериментально установленные закономерности указывают на необходимость особого внимания к температурным условиям сварки при проектировании и производстве сварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в северных регионах.

Рекомендуется осуществлять дополнительный контроль качества сварных соединений, выполненных при отрицательных температурах, с обязательным измерением остаточных напряжений. Также, целесообразно дальнейшее исследование методов послесварочной обработки, направленных на снижение уровня ОСН, например, такой как ультразвуковая ударная обработка.

Заключение

Показано, что сварка стали 10ХСНД при отрицательных температурах приводит к повышению остаточных напряжений в 1,3–2,5 раза по сравнению с комнатными условиями. Это может способствовать снижению сопротивления хрупкому разрушению сварной конструкции, особенно при последующей эксплуатации в условиях низких температур (от -40 до -60 °С).

Метод рентгеновской дифрактометрии позволяет надежно количественно оценивать остаточные сварочные напряжения. Полученные данные подтверждают необходимость учета температурных условий сварки при проектировании и эксплуатации сварных конструкций из стали 10ХСНД в холодном климате, а также целесообразность применения послесварочных способов снижения напряжений при сварке в зимних условиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта FWRS-2024-0034 и с использованием материально-технической базы ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Авторы выражают благодарность своей группе «Прочность сварных конструкций» отдела №10 ИФТПС СО РАН за помощь в выполнении экспериментальной сварки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голиков Н.И. Влияние остаточных напряжений на работоспособность сварных соединений конструкций, эксплуатирующихся в условиях холодного климата // EURASTRENCOLD-2023 : Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова, Якутск, 11–15 сентября 2023 года. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2023. С. 167-171. EDN CCWQSD.

2. Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А. Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46, № 1(82). С. 72-83. DOI 10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83. EDN RURZYH.

3. Ситников В.А., Баранов А.С. Влияние остаточных сварочных напряжений на усталостную прочность металла // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 1(109). С. 141-147. EDN YBYWEF.

4. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М. [и др.] Влияние энергетических параметров режимов сварки на распределение остаточных напряжений в зоне неразъемного соединения // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5, № 3-4. С. 30-35. EDN LBHQNV.

5. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Сидоров М.М. Технологические способы повышения надежности сварных соединений трубопроводов Севера // Надежность материалов, техники и конструкций в условиях экстремально холодного климата : Монография. Новосибирск : Сибирское отделение РАН, ФИЦ "Якутский научный центр СО РАН", 2025. С. 240-273. EDN EREFAA.

УДК 661.183.2; 669.213

Морозова Татьяна Дмитриевна, студент, Комсомольский-на Амуре государственный университет

Morozova Tatiana Dmitrievna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет

Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ WSC 207 ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ
ANALYSIS OF ACTIVATED CARBON WSC 207 AFTER THE DESORPTION PROCESS

Аннотация. Статья посвящена физико-химическому анализу активированного кокосового угля WSC 207 после процесса десорбции на золотоперерабатывающем предприятии. Исследование проведено с использованием рентгенофлуоресцентного и синхронного термического

анализа. Результаты показали, что уголь содержит около 80% основного материала, ~4% влаги, ~7,6% соединений кальция и другие примеси. Высокое содержание углерода указывает на возможность повторного использования угля после активации. Соединения кальция могут снижать сорбционную емкость, поэтому рекомендуется применение кислотной обработки для их удаления. Степень десорбции золота составила ~92%, что указывает на возможность оптимизации параметров процесса. Сделано обоснование способов повышения средней концентрации золота в элюатах.

Abstract. This article examines the physicochemical analysis of activated coconut carbon WSC 207 after desorption at a gold processing enterprise. Study was conducted using X-ray fluorescence and thermal analysis. The results showed that the carbon contains approximately 80% base material, ~4% moisture, ~7.6% calcium compounds, and other impurities. The high carbon content suggests the carbon can be reused after activation. Calcium compounds can reduce sorption capacity, so acid treatment is recommended for their removal. The gold desorption rate was ~92%, indicating the potential for process optimization. Methods for increasing the average gold concentration in the eluates are proposed.

Ключевые слова: золотопереработка, CIL, активированный кокосовый уголь, десорбция, оптимизация параметров процесса.

Key words: gold processing, CIL, activated coconut carbon, desorption, optimization of process parameters.

Введение

Согласно прогнозу Fitch Solutions (BMI), добыча золота в России будет расти в ближайшие годы – с 11,3 млн унций в 2020 году до 15,5 млн унций в 2029 году. Это соответствует среднегодовому приросту в 3,7 % и может позволить России обогнать Китай в будущем. Увеличение спроса на золото заставляет вовлекать в переработку труднообогатимые золотосодержащие руды и требует применения высокоэффективных методов извлечения. Наиболее широко используется угольно-сорбционная технология извлечения драгметаллов, что связано с низкой стоимостью углеродных сорбентов, их высокой селективности к золоту (до 98 %) и имеет простое технологическое оформление.

Извлечение золота активированными углями позволяет сократить экономические затраты на концентрирование, снизить количество примесей в итоговом элюате, а также создать цикл использования сорбента. Внедрение процессов сорбционного извлечения должно сопровождаться внедрением эффективных способов десорбции. Процесс десорбции активированного угля не менее важен в добывающей и перерабатывающей промышленности, так как позволяет извлекать золото из цианистых растворов и пульп [1, 2].

Активированный кокосовый уголь используется как эффективный сорбент для золота, благодаря таким преимуществам как высокая селективность по отношению к золоту и цветным металлам, простота элюирования и большой размер частиц.

В данной работе представлено физико-химическое исследование партии кокосового угля WSC 207, отобранного после процесса десорбции на золотоперерабатывающем предприятии ООО «АГМК» (гидрометалургический цех №2).

Материалы и методы

Для анализа использовали активированный кокосовый уголь WSC 207, имеющий высокую избирательность к золоту (95 %), среднюю скорость адсорбции и эффективность против процесса прег-роббинга, низкую стоимость. Недостатком данной марки является низкая устойчивость к истиранию.

Для анализа состава элементов, оставшихся на поверхности угля после процесса десорбции, использовали рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный анализатор с поляризацией Rigaku NEX CG (производитель: Applied Rigaku Technologies, Inc. (США)), обеспечивающий быстрое количественное и качественное определение главных и следовых элементов от третьего до седьмого периодов таблицы Д.И. Менделеева.

Для изучения термического поведения материала применяли синхронный термический анализатор STA 409 PC Luxx (производитель: NETZCH (Германия)) в диапазоне температур от 30 до 1000 °C. Исследование образцов проводили в воздушной среде при скорости потока воздуха 50 мл/мин при нагревании со скоростью 10 °C/мин в керамических тиглях с крышкой.

Результаты

Пробоотбор выполнен самостоятельно на ООО «АГМК» (гидрометалургический цех №2) во время прохождения производственной практики согласно ГОСТ Р 55959-2014 «Уголь активированный. Стандартный метод определения насыпной плотности». Образец представляет собой дроблёные частицы черного цвета с размерами гранул 0,6-3,0 мм, насыпной плотностью 0.76 г/см^3.

На присутствие сорбированной воды в составе пробы указывает ступень потери 3,78 % массы на термограмме (рис. 1) в интервале температур 70-200 °C. Изменение массы образцов от 200 °C до 625 °C с синхронным выделением теплоты соответствует процессам горения угля с образованием углекислого газа. При дальнейшем нагревании от 625 до 705 °C наблюдается ступень потери 1,89 % массы, по-видимому, связанная с разложением карбоната кальция. В интервале 705-1000 °C наблюдается плато массы, составляющее 15 % от начальной, которое соответствует оксидам металлов/металлоидов (Fe_2O_3, NiO, CuO, ZnO, As_2O_3, CaO, ZrO_2, SrO, Al_2O_3, SiO_2) и благородным металлам (Ag, Pt, Au), присутствующим в пробе.

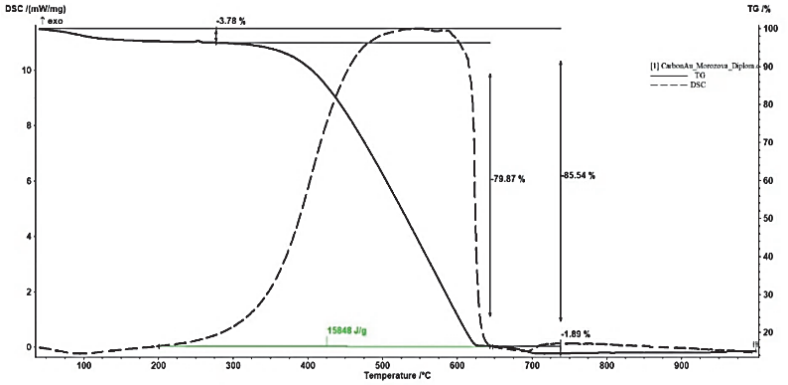


Рис. 1. Термогравиграмма (ТГ) и кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) образца угля WSC 207 после десорбции

По данным рентгенофлуоресцентного анализа рассчитан количественный состав угля, один из спектров представлен на рис. 2, результаты представлены в таблице 1.

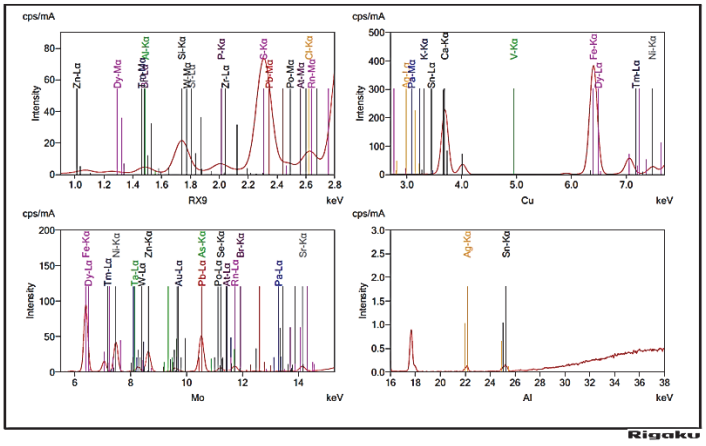


Рис. 2. Спектр (РФА) образца угля WSC 207 после десорбции

Таблица 1

Среднее значение химического состава активированного угля WSC 207 после десорбции

Элемент	Масса, г/1 г пробы	Содержание, %	Химическая форма	Элемент	Масса, г/1 г пробы	Содержание, %	Химическая форма
Al	0,00208	0,208	$[Al(OH)_4]^-$	Ag	0,00002	0,002	$[Ag(CN)_2]^-$
Si	0,00377	0,377	SiO_3^{2-}	Pt	0,00034	0,034	$[Pt(CN)_4]^{2-}$
S	0,00377	0,377	SO_4^{2-}	Au	0,00078	0,078	$[Au(CN)_2]^-$
Fe	0,00337	0,337	$Fe(OH)_3$, $[Fe(CN)_6]^{3-}$	Ca	0,07632	7,632	$CaSO_4$, $CaSiO_3$, $CaCO_3$
Ni	0,00948	0,948	$[Ni(CN)_4]^{2-}$	Cl	0,00048	0,048	$CaCl_2$
Cu	0,00038	0,038	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $[Cu(CN)_4]^{2-}$	Zr	0,00085	0,085	ZrO_2*nH_2O, $ZrSiO_4$
Zn	0,00379	0,379	$[Zn(OH)_4]^{2-}$	Sr	0,00037	0,037	$SrSO_4$, $SrSiO_3$, $Sr(OH)_2$
As	0,00485	0,485	AsO_4^{3-}	Вода	0,03780	3,780	
Связанный CO_2	0,01890	1,890	$CaCO_3$	Уголь	0,79870	79,870	
Связанный кислород	0,03394	3,394		ИТОГО	1,00000	100	

Обсуждение результатов

Основными компонентами анализируемой пробы являются активированный кокосовый уголь (~80 %), остаточная влажность которого типична для активных улей (~4 % H_2O), соединения кальция (~7,6 %), кислорода (~3,4 %) и связанный углекислый газ (~1,9 %). Высокое содержание углерода указывает на сохранность сорбента и его пригодность к повторному использованию, однако, для восстановления свойств требуется его активация в печи с целью снижения кислородсодержащих групп на поверхности угля. Соединения кальция, особенно карбонаты, вызывают забивание пор угля, что снижает его сорбционную емкость. Для удаления соединений кальция перед десорбцией насыщенный уголь промывали водой, затем раствором сульфаминовой кислоты и снова водой, после чего процесс десорбции проводили по циклу Задра при повышенной температуре (135 °C). Однако анализ показывает, что остаточное содержание кальция всё еще велико, необходимо применять дополнительные методы. Например, для удаления $CaCO_3$ можно использовать кислотную обработку с использованием 5-10 % HCl.

В исследуемом угле присутствуют часто сопутствующие золоту в рудах микроэлементы (никель, мышьяк, цинк, серебро), а также примеси песков (кремний, алюминий, железо, стронций, цирконий). Хлор может быть привнесенным элементом (из извести, из цианидов или как зольный компонент кокосового угля).

Наличие платины (редкого спутника золота) может указывать на специфику месторождения руды. Хабаровский край богат полезными ископаемыми, так, минералы платиновой группы обнаружены на Малмыжском золото-медно-порфировом месторождении. ООО «АГМК» пока не занимается переработкой платины, но есть планы [3].

Поскольку серебро сорбируется хуже золота, то его десорбция прошла практически количественно, а данные по остаточному золоту указывают на его неполное извлечение. Каждая тонна исследуемого активированного кокосового угля содержит 780 г золота, а ориентировочная максимальная ёмкость кокосового угля WSC 207 по золоту достигает 10 кг/т в оптимальных условиях. Следовательно, степень десорбции составила ~92 % (средняя эффективность). Неполное извлечение – это обычное явление, с которым нужно бороться, оптимизируя параметры десорбции (поднять температуру, увеличить концентрацию NaCN или/и NaOH, вводить реагенты-восстановители в элюентный раствор [4]). По регламенту разрешено проводить цикл Задра при температуре 150 °C.

Наличие в угле (и, следовательно, в промывных водах) токсичных соединений мышьяка и никеля потребует соблюдения правил экологической безопасности. Так, необходимо внедрить мониторинг остаточного содержания токсичных элементов на всех этапах регенерации, контролировать эмиссии при термической обработке и утилизировать отработанные материалы по нормам для токсичных отходов.

Заключение

Таким образом, проведённый анализ состава активированного кокосового угля WSC 207 после десорбции цианистых растворов золота позволяет сделать следующее заключение: сорбент сохранен и пригоден к повторному использованию после активации. Выявлена проблема блокировки пор угля нерастворимыми соединениями кальция, что свидетельствует о недостаточно эффективной пред-десорбционной промывки сульфаминовой кислотой, рекомендована дополнительная кислотная обработка. Эффективность десорбции золота оценена как средняя (~92 %), предложены меры по усовершенствованию процесса, реализация которых позволит повысить минимизировать потери золота и обеспечить соответствие технологического процесса экологическим стандартам. Рекомендовано рассмотреть возможность извлечения ценных сопутствующих металлов (Pt) при дальнейшей переработке руд Хабаровского края.

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Овсюков, А. Е. Повышение эффективности процесса высокотемпературной десорбции золота из активных углей : специальность 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Овсюков Александр Евгеньевич, 2021. – 213 с. – EDN WXTWWI.
2. Елшин, В. В. Разработка и внедрение автоматизированной системы управления установкой непрерывной десорбции золота из активных углей / В. В. Елшин, А. А. Колодин, С. А. Мельник // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5(124). – С. 79-86. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-5-79-86. – EDN YPLMRP.
3. Чжан, Ч. Анализ и прогнозирование производства золота в Российской Федерации / Ч. Чжан, В. М. Заернюк // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2021. – Т. 17, № 7(400). – С. 1326-1343. – DOI 10.24891/ni.17.7.1326. – EDN AFHJTZ.
4. Патент № 2131938 C1 Российская Федерация, МПК C22B 3/24, C22B 11/00, C22B 11/08. Способ элюирования драгоценных металлов, адсорбированных на активном угле : № 96107756/02 : заявл. 15.09.1994 : опубл. 20.06.1999 / С. Харвей, Л. А. Ван, П. Э. Луи ; заявитель Ю Эм Инжиниринг С.А.. – EDN IPBIOC.

УДК 541.49

Назаренко Софья Андреевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Nazarenko Sofia Andreevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Проценко Александра Николаевна, кандидат химических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Protsenko Alexandra Nikolaevna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

БРОМИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОБАЛЬТА(II) С ИЗОМЕРНЫМИ 2-АМИНО-5(3)-БРОМ-3(5)-МЕТИЛПИРИДИНАМИ: СИНТЕЗ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ
COBALT(II) BROMIDE COMPLEXES WITH ISOMERIC 2-AMINO-5(3)-BROMO-3(5)-METHYLPYRIDINES: SYNTHESIS AND IDENTIFICATION

Аннотация. Получены новые тетрабромидные комплексы кобальта(II) с изомерными основаниями L^1 - 2-амино-5-бром-3-метилпиридин и L^2 - 2-амино-3-бром-5-метилпиридин состава $(HL^1)_2[CoBr_4]$ (**I**) и $(HL^2)_2[CoBr_4]$ (**II**). Соединения синтезированы в кислой среде и охарактеризованы методом ИК-спектроскопии. Установлено, что в процессе комплексообразования происходит протонирование пиридинового атома азота с образованием катиона пиридиния, что подтверждается появлением широкой полосы валентных колебаний NH^+ в области 3450-2800 $см^{-1}$.

Abstract. New cobalt(II) tetrabromide complexes with isomeric bases L^1 - 2-amino-5-bromo-3-methylpyridine and L^2 - 2-amino-3-bromo-5-methylpyridine, of compositions $(HL^1)_2[CoBr_4]$ (I) and $(HL^2)_2[CoBr_4]$ (II) were obtained. The compounds were synthesized in an acidic medium and characterized by IR spectroscopy. It was found that during complex formation, protonation of the pyridine nitrogen atom occurs, forming a pyridinium cation, which is confirmed by the appearance of a broad band of NH^+ stretching vibrations in the region of 3450-2800 cm^{-1}.
Ключевые слова: комплексообразование, кобальт, 2-амино-5-бром-3-метилпиридин, 2-амино-3-бром-5-метилпиридин, ИК-спектроскопия, тетрабромокобальтат.
Key words: complexation, cobalt, 2-amino-5-bromo-3-methylpyridine, 2-amino-3-bromo-5-methylpyridine, IR spectroscopy, tetrabromocobaltate.

Введение

Кобальт относится к переходным 3d-элементам VIII группы периодической системы и проявляет выраженную склонность к образованию координационных соединений с лигандами различной природы. Наиболее устойчивыми степенями окисления являются +2 и +3, что обеспечивает разнообразие комплексных соединений. Интерес к таким соединениям обусловлен их синтетическим потенциалом, каталитической и биологической активностью, а также возможностью их применения в преобразовании солнечной энергии [1].

Важное место в идентификации координационных соединений занимает ИК-спектроскопия. Данный метод позволяет зафиксировать изменения в частотах колебаний функциональных групп (например, аминогруппы, пиридиновых колец) в результате комплексообразования. Сравнение спектральных характеристик синтезированных соединений и исходных органических оснований дает возможность установить центр протонирования (атома азота пиридинового кольца или аминогруппы), оценить характер взаимодействия лиганда с металлом и сделать заключение о типе строения комплекса [2].

Целью данной работы является синтез новых тетрабромидных комплексов кобальта(II) с изомерными органическими основаниями 2-амино-5(3)-бром-3(5)-метилпиридином и идентификация полученных соединений методом ИК-спектроскопии.

Материалы и методы

Синтез новых комплексов **I** и **II** осуществляли смешиванием ацетонитрильных растворов органических оснований L^1 и L^2 (рис.1, 2) с бромидом кобальта(II) в кислой среде в соотношении металл : основание 1 : 2. [3] В результате образовывались растворы синего (рис. 3) и изумрудного (рис. 4) цветов соответственно.

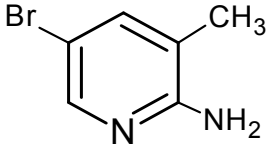


Рис. 1. Основание 2-амино-5-бром-3-метилпиридин (L^1)

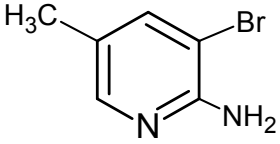


Рис. 2. Основание 2-амино-3-бром-5-метилпиридин (L^2)

По истечении времени из обоих растворов выпадали кристаллические осадки соединений синего цвета:

$$2L^n + 2H^+ + Co^{2+} + 4Br^- \rightarrow (HL^n)_2[CoBr_4] \downarrow \text{(синий)}\ (n=1, 2).$$



Рис. 3. Раствор комплекса $(HL^1)_2[CoBr_4]$



Рис. 4. Раствор комплекса $(HL^2)_2[CoBr_4]$

Идентификацию полученных соединений проводили методом ИК-спектроскопии (табл. 1, рис. 5-8).

Таблица 1

Данные ИК-спектроскопии соединений L^1, L^2, I и II

Отнесение	L^1	L^2	I	II
$\nu(NH_2)$	3466 3296 3223	3457 3278 3235	3432 3334 3198	3432 3398 3303 3216
$\nu(C_{arene}\text{-}H)$	3142	3139 2917	3077 3020	3174 3031
$\nu(C_{sp}{}^3\text{-}H)$	2919 2856	2948 2918	2937 2889	2921 2891 2855
R(кольца)	1636 1575 1471 1438	1625 1595 1541 1478	1649 1615 1560 1451	1652 1622 1596 1534 1455
δ(C-N)	1398 1193	1392 1203	1389 1189	1399 1200
δ(C-C)	1060 1046	1047	1042	1053 1001
$\delta(C_{arene}\text{-}H)$	1003 901 886 756	891 788	1009 929 910 813 769	943 897 806 790

Результаты и их обсуждение

В ИК-спектрах оснований L^1 и L^2 наблюдаются полосы валентных колебаний аминогруппы ν(N–H) при 3466 $см^{-1}$, 3296 $см^{-1}$ (для L^1) и 3457 $см^{-1}$, 3278 $см^{-1}$ (для L^2) соответственно (рис. 5, 6). В спектрах комплексов **I** и **II** в области 3450-2800 $см^{-1}$ (рис. 7, 8) наблюдается появление широких полос валентных колебаний $\nu(N\text{–}H^+)$, что объясняется процессом протонирования атома азота пиридинового кольца, а также образованием разветвленной сети водородных связей между органическим катионом и неорганическим анионом. В спектрах комплексов также присутствует сдвиг полос валентных колебаний пиридинового кольца в высокочастотную область (1649 $см^{-1}$, 1615 $см^{-1}$, 1560 $см^{-1}$, 1451 $см^{-1}$ для **I**; 1652 $см^{-1}$, 1622 $см^{-1}$, 1596 $см^{-1}$, 1534 $см^{-1}$ для **II**) по сравнению со спектрами L^1 (1636 $см^{-1}$, 1575, 1471 $см^{-1}$) и L^2 (1625 $см^{-1}$, 1595 $см^{-1}$, 1541 $см^{-1}$). Полосы поглощения в области 1200-1000 $см^{-1}$ относятся к деформационным колебаниям связей C–C, C–N, а в области 1000-750 $см^{-1}$ к деформационным колебаниям C–H пиридинового кольца.

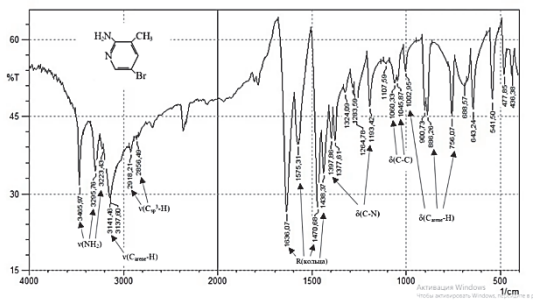


Рис. 5. ИК-спектр L^1

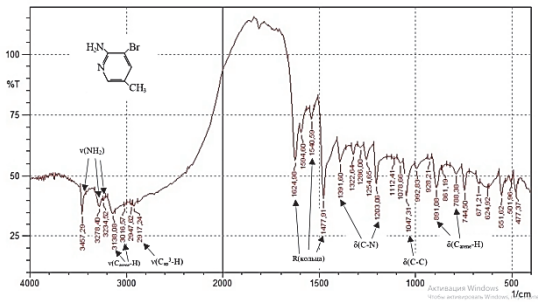


Рис. 6. ИК-спектр L^2

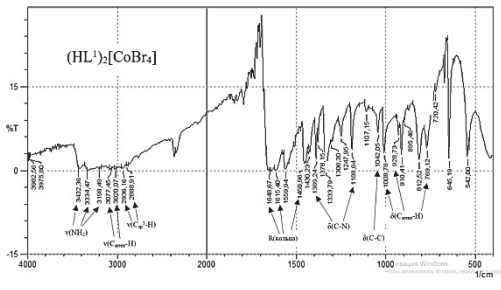


Рис. 7. ИК-спектр комплекса I

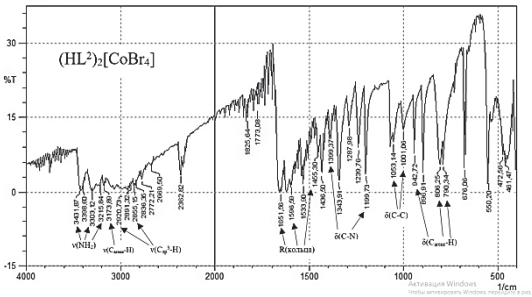


Рис. 8. ИК-спектр комплекса II

Заключение

Были синтезированы два новых координационных соединения кобальта(II) с изомерными органическими основаниями - 2-амино-5-бром-3-метилпиридином (L^1) и 2-амино-3-бром-5-метилпиридином (L^2) состава $(HL^1)_2[CoBr_4]$ (**I**) и $(HL^2)_2[CoBr_4]$ (**II**). Методом ИК-спектроскопии установлено, что в кислой среде происходит протонирование атома азота пиридинового кольца, что подтверждается появлением широких полос валентных колебаний $\nu(N–H^+)$ в области 3450-280 $см^{-1}$, а также сдвигом полос валентных колебаний пиридинового кольца в высокочастотную область по сравнению со спектрами исходных оснований.

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Complexes of copper(II) and cobalt(II) halides with 4-(3,5-dimethyl-1H- pyrazol-1-yl)-6-methyl-2-phenylpyrimidine: Synthesis, structures, and properties / M. B. Bushuev, E. V. Peresypkina, A. V. Virovets [et al.] // Russian Journal of Coordination Chemistry. – 2009. – Vol. 35, No. 8. – P. 597-608. – DOI 10.1134/S1070328409080077. – EDN MWUKEB.

2. Тарасевич, Б.Н. Основы ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК спектроскопии: пособие к спец.практикуму по физико-химическим методам для студентов-дипломников кафедры органической химии. М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, 2012. 120 с.

3. Исследование новых галогенидных комплексов меди(II) и кобальта(II) с 2-амино-5-бром-3-метилпиридином: синтез, структура, свойства / А. Н. Проценко, Д. А. Шуляк, А. Е. Проценко, О. Г. Шакирова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 1(155). – С. 62-70. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-1-62-70. – EDN UHLOAK.

УДК 539.2

Ненашев Григорий Васильевич, молодой ученый, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Nenashev Grigorii Vasilievich, Junior Researcher, Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences

Алешин Андрей Николаевич, доктор физико-математич еских наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Aleshin Andrey Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory, Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ БАРИЕМ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК ОРГАНИЧЕСКО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ
EFFECT OF BARIUM DOPING ON THE BEHAVIOR OF CONDUCTIVITY OF ORGANIC-INORGANIC PEROVSKITE FILMS

Аннотация. Исследовано влияние легирования барием на морфологию, проводимость и импеданс тонких пленок органическо-неорганического перовскита $CH_3NH_3PbI_3$ для примене-

ния в фотовольтаике методом вольт-амперной характеризации (ВАХ). Установлено, что в интервале 77–295 K светозависимый транспорт приводит к десятикратному снижению энергии активации проводимости (с 165 мэВ до 10 мэВ). При низких температурах освещение повышает энергию активации с 10 мэВ (темнота) до 15 мэВ (свет). Показано фотопроводящее поведение обоих образцов и заметные изменения характеристик проводимости под действием света. Легирование барием улучшает параметры, критичные для повышения эффективности солнечных элементов.

Abstract. The effect of barium doping on morphology, conductivity and impedance of $CH_3NH_3PbI_3$ organic-inorganic perovskite thin films for photovoltaic applications is studied by the voltammetry (I-Vs). In the 77–295 K range light-dependent transport causes a tenfold decrease in activation energy (from 165 meV to 10 meV). At low temperatures illumination increases activation energy from 10 meV (dark) to 15 meV (light). Photoconductive behavior of both samples and significant changes under illumination are demonstrated. Barium doping improves parameters critical for solar-cell efficiency enhancement.

Ключевые слова: металлоорганические перовскиты, легирование барием, электрическая проводимость, спектроскопия импеданса, энергия активации, фотовольтаические устройства
Key words: organic-inorganic perovskites, barium doping, electrical conductivity, impedance spectroscopy, activation energy, photovoltaic devices

Введение

Металлоорганические перовскиты на основе свинца и органических катионов в последние полтора десятилетия заняли лидирующее положение среди материалов для перспективной оптоэлектроники. Их рекордная эффективность солнечных элементов уже превысила 26 %, они демонстрируют высокую квантовую эффективность в светодиодах, рекордную чувствительность фотодетекторов и способность к резистивному переключению в мемристорах [1–2]. Столь широкое применение обусловлено уникальным сочетанием высокой подвижности носителей заряда, большой длины диффузии, низкой энергии связи экситонов и возможности низкотемпературного синтеза.

Однако практическое использование этих материалов сдерживается целым рядом фундаментальных проблем, главная из которых — высокая подвижность заряженных дефектов и ионная миграция под действием электрического поля и света [3]. Даже в высокоупорядоченных кристаллах перовскиты содержат вакансии галогенидов и междоузельные ионы. Эти дефекты определяют механизмы проводимости в разных температурных диапазонах: при низких температурах (ниже ~150 K) преобладает вклад внешних (структурных) дефектов, а при повышении температуры активируются внутренние (термически генерируемые) дефекты, что приводит к переходу в «собственную» область проводимости. Кроме того, миграция ионов вызывает гистерезис, деградацию и снижение стабильности устройств.

Одним из наиболее перспективных путей решения указанных проблем является целенаправленное допирование перовскитной матрицы. Это позволяет эффективно регулировать соотношение галогенидов в фотоактивном слое, существенно снижать скорость безызлучательной рекомбинации, повышать напряжение холостого хода и внешнюю квантовую эффективность.

В предыдущих работах авторов было показано, что введение графеноксидных зерен заметно модифицирует электрические и мемристорные свойства пленок $CH_3NH_3PbI_3$ [4]. Тем не менее, несмотря на успехи в области барий-допированных перовскитов, до настоящего времени отсутствует систематическое сравнительное исследование влияния малых концентраций бария (1–3 ат. %) на температурную зависимость проводимости и энергию активации классического металлоорганического перовскита $CH_3NH_3PbI_3$.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью глубокого понимания механизмов транспорта носителей в Ba-легированных пленках для дальнейшей оптимизации эффективности и долговременной стабильности перовскитных солнечных элементов.

Цель исследования заключается в проведении сравнительного анализа влияния легирования барием на электрические характеристики тонких пленок $CH_3NH_3PbI_3$, выявлении механизмов изменения энергии активации проводимости и фотопроводимости, а также оценке перспективы применения полученных материалов в фотовольтаических устройствах.

Материалы и методы

Пленки $CH_3NH_3PbI_3$(1) (без Ba) и $CH_3NH_3PbI_3$(2) (с Ba) получены растворным синтезом [5] и нанесены методом центрифугирования (2000 об/мин, 10 мин отжига) на керамические подложки BI2 с золотыми межэлектродными структурами (зазор 25 мкм). Вольт-амперные характеристики измерены автоматической системой измерения Keithley6487 в двухзондовой геометрии в оптическом криостате optCRYO198 в диапазоне температур 77–295 K в темноте и под действием имитатора солнечного света.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 (а-д) и рис. 2 (а-д) показаны вольт-амперные характеристики образцов $CH_3NH_3PbI_3$(1) и $CH_3NH_3PbI_3$(2), а также рассчитанные значения электрического поля. Эти характеристики наблюдались в различных условиях: при прямом и обратном смещении, в темноте и при освещении имитатором солнечного света, при различных температурах. Все исследованные образцы, освещенные имитатором солнечного света, демонстрируют превосходную линейность в различных диапазонах напряжений. Однако эта линейность исчезает при отсутствии света. Из этих двух образцов образец $CH_3NH_3PbI_3$(1) значительно превосходит $CH_3NH_3PbI_3$(2) по электропроводности.

Для обоих образцов снижение электропроводности происходит параллельно снижению температуры. И, наоборот, при облучении имитатором солнечного света с длиной волны в диапазоне 300-700 нм отмечается увеличение электропроводности. Это подтверждает, что все образцы действительно обладают выраженной фотопроводимостью в видимом спектральном диапазоне.

Для образца $CH_3NH_3PbI_3$(1) удельное сопротивление составило ~10^5 Ом*см при 293 K и ~10^6 Ом*см при 77 K на свету, а также ~10^8 Ом*см и ~10^{10} Ом*см при 293 K и 77 K в темноте. Для сравнения, у образца $CH_3NH_3PbI_3$(2) удельное сопротивление составило ~10^7 Ом*см при 293 K и ~10^9 Ом*см при 77 K при освещении. В темноте удельное сопротивление составляло около ~10^9 Ом*см при 293 K и ~10^{10} Ом*см при 77 K. Эти изменения подтверждают температурно-зависимое поведение и фотопроводимость образцов.

Зависимость удельного электрического сопротивления от обратной температуры для образца $CH_3NH_3PbI_3$(1) показана на рис. 1д, в то время как аналогичную зависимость для образца $CH_3NH_3PbI_3$(2) можно найти на рис. 2д. Зависимость между температурой и удельным сопротивлением, обозначаемая как ρ(T), описывается уравнением:

$$\rho(T) = \rho_0 exp(E_a/k_B T) \quad (1),$$

где E_a представляет собой энергию активации. Энергия активации проводимости, обозначаемая как E_a, может быть вычислена на основе значения ρ(T), зависящего от температуры:

$$E_a(meV) = (200\Delta \log \rho)/(\Delta 1000/T) \quad (2).$$

Для образца $CH_3NH_3PbI_3$(2) достигнутые значения E_a составили 9,5 мэВ и 160 мэВ в темноте, достигая 20,81 мэВ и 282,17 мэВ при освещении (рис. 2д). Для того же образца в условиях темноты были зафиксированы значения E_a, равные 10,83 мэВ и 165,13 мэВ, при освещении, приводящем к значению 15 мэВ (рис. 1д). Наблюдается значительное снижение энергии активации, что коррелирует с понижением температуры как при освещении, так и в темноте. Под воздействием света энергия активации постоянно повышается во всех темпера-

турных диапазонах по сравнению с аналогичными показателями в темноте. Этот признак указывает на потенциальную пригодность исследуемого материала для использования в фотоэлектрических системах, таких как солнечные панели, где эффективность переноса электронов имеет решающее значение при воздействии света.

Заключение

Легирование барием существенно улучшает электрические свойства пленок $CH_3NH_3PbI_3$, что открывает перспективы для повышения эффективности и стабильности перовскитных солнечных элементов. Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейших исследований Ba-допированных перовскитов в составе полноценных фотовольтаических устройств.

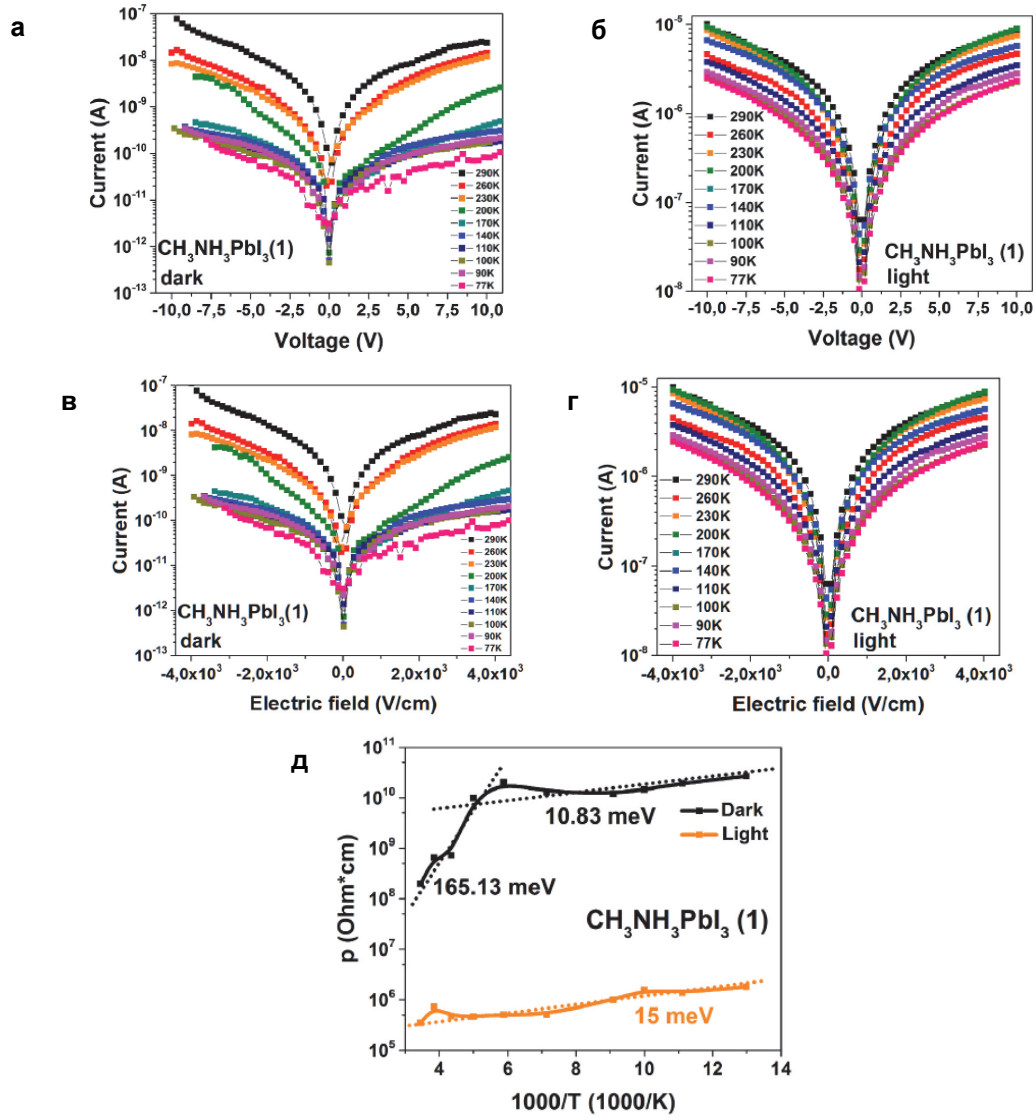


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики образца $CH_3NH_3PbI_3$(1) при прямом и обратном смещении в темноте (а) и освещении имитатором солнечного света (б) при различной температуре; пересчитанные на электрическое поле в темноте (в) и освещении имитатором солнечного света (г); зависимости удельного сопротивления от обратной температуры (д)

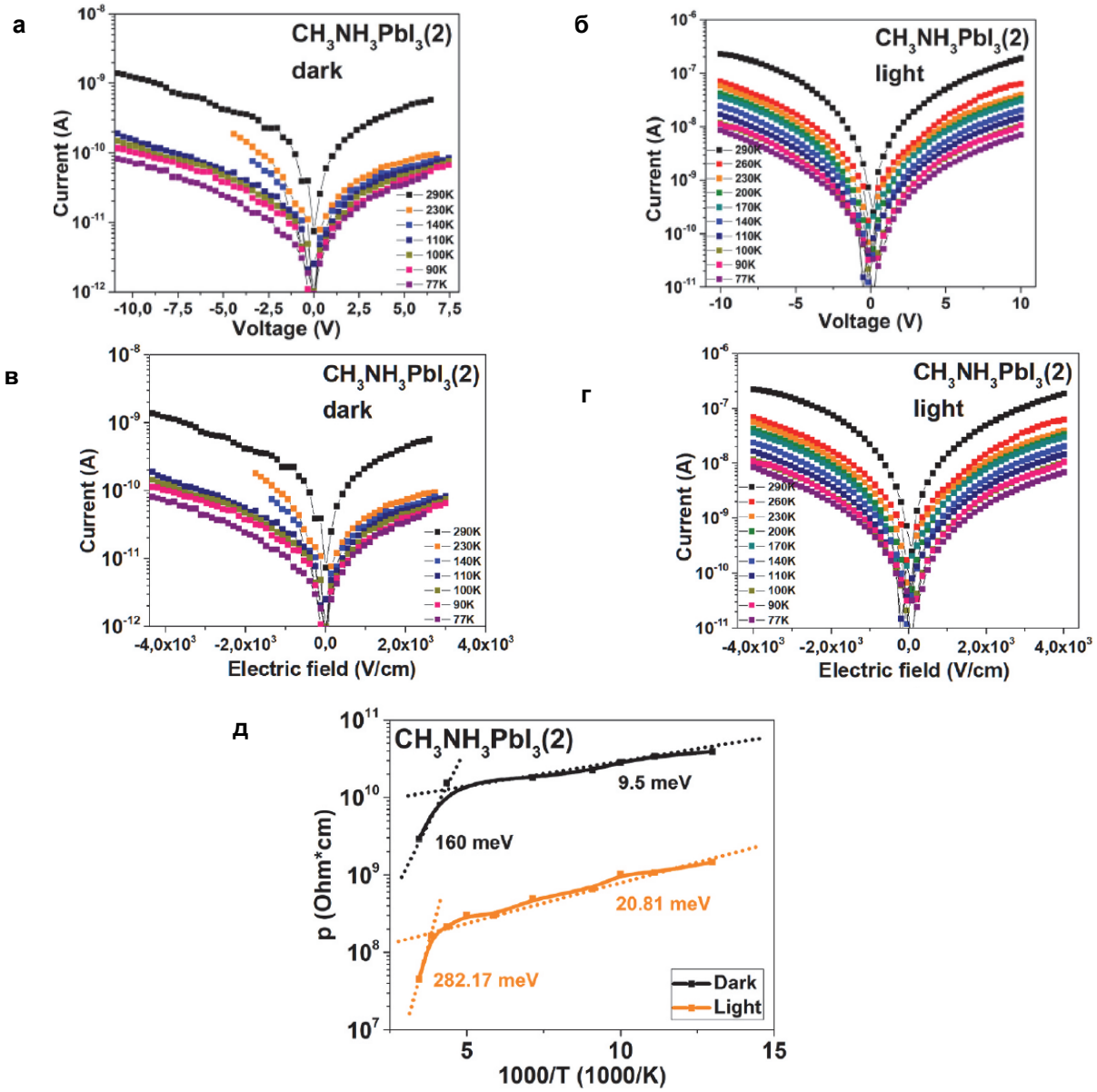


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образца $CH_3NH_3PbI_3(2)$ при прямом и обратном смещении в темноте (а) и освещении имитатором солнечного света (б) при различной температуре; пересчитанные на электрическое поле в темноте (в) и освещении имитатором солнечного света (г); зависимости удельного сопротивления от обратной температуры (д)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kim H.-S., Lee C.-R., Im J.-H. et al. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9 % // Sci. Rep. – 2012. – Vol. 2. – Art. 591. – DOI: 10.1038/srep00591.

2. Simulation of perovskite solar cell employing ZnO as electron transport layer (ETL) for improved efficiency / A. Kumar, U. Gupta, Tanya [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 46. – P. 1684-1687. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.07.267. – EDN KRVRMP.

3. Eames C., Frost J., Barnes P. et al. Ionic transport in hybrid lead iodide perovskite solar cells // Nat. Commun. – 2015. – Vol. 6. – Art. 7497. – DOI: 10.1038/ncomms8497.

4. Effect of temperature variations on the behavior of a two-terminal organic–inorganic halide perovskite rewritable memristor for neuromorphic operations / G. V. Nenashev, A. N. Aleshin, I. P. Shcherbakov, V. N. Petrov // Solid State Communications. – 2022. – Vol. 348-349. – P. 114768. – DOI 10.1016/j.ssc.2022.114768. – EDN SEZHYC.

5. Морфологические и электрические параметры модифицированных пленок структуры перовскита / Г. В. Ненашев, А. А. Рябко, А. Н. Алешин [и др.] // Нанофизика и наноматериалы : Сборник научных трудов Международного семинара посвященного 250-летию со дня основания Санкт-

Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и 20-летию работы международного симпозиума, Санкт-Петербург, 22–23 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2023. – С. 146-152. – EDN FPMSKW.

УДК 681.5
Никитин Данил Евгеньевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Nikitin Danil Evgenyevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ПРИМЕНЕНИЕ DATA-DRIVEN ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
APPLICATION OF A DATA-DRIVEN APPROACH FOR THE MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Аннотация. В статье рассмотрены возможности, которые предлагает data-driven подход применительно к модернизации технологического оборудования газопереработки. Актуальность статьи обусловлена перспективностью data-driven подхода при принятии управленческих решений, обоснованных аналитикой собранных данных, а не предположениями. Сделан вывод о том, что data-driven подход в ближайшие годы получит развитие в России, и позволит применять его для целей модернизацию технологического оборудования предприятий газопереработки.
Abstract. This article explores the potential of applying a data-driven approach to the modernization of technological equipment in the gas processing industry. The relevance of this study stems from the growing promise of data-driven methods for making managerial decisions based on the analysis of collected data, as opposed to relying on assumptions. The article concludes that the data-driven approach is poised for development in Russia in the coming years and can be effectively utilized for the purpose of modernizing technological equipment at gas processing enterprises.
Ключевые слова: модернизация оборудования, data-driven подход, газопереработка.
Key words: equipment modernization, data-driven approach, gas processing.

Введение

В российской газопереработке по состоянию на 2026 год в России эксплуатируются 30 газоперерабатывающих заводов. Большинство из них построены в прошлом веке [1]. Актуальным направлением модернизации на таких объектах остается продление срока службы оборудования, при котором производится замена отработавшего свой срок службы аппарата или его части на вновь изготовленное изделие. Предпосылками к модернизации оборудования могут быть снижение эффективности технологических процессов, которое может сопровождаться увеличением потребления энергии и сырья при сохранении параметров выпускаемой продукции, увеличение времени вынужденного простоя оборудования, вызванного отказами или выходами из строя, несоответствие оборудования современным требованиям, что препятствует возможности применения новых технологий и содержит высокий уровень ручного труда и низкую автоматизацию процессов. Эксплуатируемое оборудование может утратить соответствие современным стандартам безопасности и экологичности. В настоящее время, с переходом к использованию в бизнес- процессах предприятий современных высокотехнологичных методов, меняется подход к модернизации технологического оборудования.

Основная часть

На смену индустриальному наследию приходят современные высокотехнологичные проекты. Газоперерабатывающие и газохимические заводы, реализованные за последние два десятилетия, имеют конкурентное преимущество, связанное с возможностью использования data-driven цифровых подходов в своих бизнес-процессах. Это подходы, при которых управленческие решения принимаются на основе аналитики больших баз данных. В основе таких подходов заложен массив информации, который в современных условиях предприятие накапливает во внутренней информационной системе, начиная с этапов строительства и ввода в эксплуатацию объектов основных средств. Информационная база предприятия состоит из проектной документации, документации заводов изготовителей оборудования, электронной модели предприятия, информации, которая накапливается постоянно в режиме реального времени (например: тренды работы оборудования, параметры проходящих технологических процессов), данные, вносимые различными службами предприятия записи о ремонте, обслуживании и произведенных затратах на работы и услуги. В основе работы с данными используется принцип цифрового следа, при котором любое информационное событие регистрируется и может в последствии быть проанализировано.

Накопленная информация позволяет анализировать отказы оборудования, аварийные остановки, обстоятельства и причины событий, позволяет оценивать эффективность проведенных технических обслуживаний и ремонтов. Информация может быть обработана имеющимися у компании программными решениями. Это могут быть такие системы как ERP (enterprise resourse planning), SQL **(**Structured Query Language), специализированные системы такие как 1С ТОиР (техническое обслуживание и ремонт). На крупных промышленных предприятиях используется группа программных продуктов, обращающихся к общим базам. Рассмотренные программные продукты, имеют самостоятельные решения для формирования аналитических отчетов, к примеру Отчеты предоставляют пользователю возможность обрабатывать и анализировать данные в любом временном промежутке.

Преимущества применения data-driven подхода обусловлены высокой эффективностью принимаемых решений их объективностью, основанной на свершившихся фактах. А недостатки определяются высокими затратами на внедрение подхода, включающие в себя расходы на приобретение программных продуктов, физическое оборудование для сбора данных о работе технологического оборудования, и обучение персонала. Подход зависит от качества собираемых данных и необходимости выборки ключевой информации, для исключения анализа тенденций, не приводящих к полезным выводам.

На основании проведенных исследований в России в 2020 году 8,9 % предприятий используют в своей деятельности анализ данных, а в 2022 году этот показатель составил 8,2 %. Эти показатели свидетельствуют о том, что данное направление в стране ещё недостаточно развито и находится на начальной стадии внедрения [2]. Развитие data-driven подходов в российской газопереработке сопровождается устойчивым трендом на переход от использования импортного программного продукта к отечественному. Таким образом, обе индустрии IT и газопереработка способствуют взаимному устойчивому развитию.

Заключение

Применение data-driven подхода позволит в будущем подойти к вопросам модернизации оборудования газопереработки на основе аналитики данных, накопленных за годы работы оборудования, информации о неисправностях и отказах, проведенных ремонтах и обслуживания, произведенных затратах, а не с позиции предпосылок или предположений. Data-driven подход обеспечит предприятию конкурентное преимущество в будущем и позволит проводить модернизацию технологического оборудования с достижением именно тех задач, необходимость которых обоснована данными, а также повысит инвестиционную привлекательность предприятия и увеличит его прибыль [3]. В настоящее время необходимо интенсифицировать развитие цифровых подходов на предприятиях газопереработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голубева, И. А. Состояние газопереработки в России: сегодня и в перспективе / И. А. Голубева, А. Ю. Шуюпова, С. С. Иманова // Нефтегазохимия. – 2022. – № 3. – С. 9-13. – DOI 10.24412/2310-8266-2022-3-9-13. – EDN HVKJSC.

2. Кротов, Д. П. Перспектива развития data driven подхода в российской экономике / Д. П. Кротов // Вестник университета. – 2025. – № 2. – С. 127-134. – DOI 10.26425/1816-4277-2025-2-127-134. – EDN JUONOV.

3. Кетоева, Н. Л. Дорожная карта для внедрения подхода Data-Driven в систему управления обслуживанием и износом электроэнергетического оборудования при принятии управленческих решений / Н. Л. Кетоева, М. А. Знаменская, И. О. Борзых // Вестник Сургутского государственного университета. – 2024. – Т. 12, № 4. – С. 44-60. – DOI 10.35266/2949-3455-2024-4-4. – EDN DGUUQE.

УДК 620.3: 621.762: 539.92

Павлов Александр Александрович, студент, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

Pavlov Alexander Alexandrovich, student, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova

Акимова Мария Панфиловна, к.т.н., младший научный сотрудник, ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Akimova Maria Panfilovna, Ph.D., junior researcher, Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

Шарин Петр Петрович, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН при ФИЦ «ЯНЦ СО РАН»

Sharin Petr Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences at the Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ Cu-Sn С НАНОАЛМАЗНЫМИ ДОБАВКАМИ
TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A Cu-Sn COMPOSITE MATERIAL WITH NANODIAMOND ADDITIVES

Аннотация. Исследована возможность повышения износостойкости и прочности оловянной бронзы за счёт введения наноалмазов детонационного синтеза. Композиты на основе системы 80 % Cu – 20 % Sn получены методом ультразвукового диспергирования с последующим горячим прессованием. Установлено, что фазовый состав материалов остаётся стабильным независимо от содержания добавки, однако с ростом концентрации наноалмазов увеличивается склонность к их агломерации. Трибологические испытания показали, что наилучшие характеристики достигаются при содержании 1,5 %мас.: фиксируются минимальные значения коэффициента трения, износа и шероховатости поверхности. Результаты подтверждают, что наноалмазы могут эффективно улучшать свойства бронзы при оптимальной дозировке и равномерном распределении в матрице.

Abstract. The possibility of increasing the wear resistance and strength of tin bronze by introducing detonation synthesis nanodiamonds is being investigated. Composites based on the 80% Cu – 20% Sn system were obtained by ultrasonic dispersion followed by hot pressing. It has been established that the phase composition of materials remains stable regardless of the additive content, however, with increasing concentration of nanodiamonds, the tendency to agglomerate increases. Tribological tests have shown that the best characteristics are achieved at a content of 1.5 wt.%: the minimum values of the coefficient of friction, wear and surface roughness are fixed. The results confirm that

nanodiamonds can effectively improve the properties of bronze with optimal dosage and uniform distribution in the matrix.
Ключевые слова: композиционные алмазосодержащие материалы, оловянная бронза, детонационный наноалмаз, горячее прессование, коэффициент трения, массовый износ, линейный износ, шероховатость поверхности.
Key words**:** composite diamond-containing materials, tin bronze, detonation nanodiamond, hot pressing, friction coefficient, mass wear, linear wear, surface roughness.

Введение

Порошковые медно-оловянные сплавы широко применяют благодаря сбалансированному сочетанию физико-механических и эксплуатационных свойств при хорошей обрабатываемости. Их используют как в конструкционных элементах, работающих при повышенном износе, так и в качестве матричного материала для режущего и абразивного инструмента [1]. Для улучшения характеристик бронз в экстремальных условиях перспективным является создание композиционных материалов (КМ) с ультрадисперсными и наноразмерными добавками. Известно, что введение наноалмазов повышает прочность, твердость и износостойкость, снижая коэффициент трения [2]. Однако наночастицы склонны к агломерации, что снижает прочностные свойства композитов. Стандартные методы порошковой металлургии, включая смешивание и спекание, дают лишь небольшой прирост прочности при содержании наноалмазов 1–3 %мас., а дальнейшее увеличение приводит к снижению показателей [3]. Это обусловлено недостаточным контактом между матрицей и наночастицами, приводящем к образованию пор и дефектов в композите. Для борьбы с агломерацией применяют функционализацию частиц, стабилизаторы, ультразвуковую обработку, центрифугирование и механическое легирование [5], однако полностью решить проблему пока не удаётся. В данной работе использован метод ультразвукового диспергирования [4], при котором наночастицы смешивают с порошком матрицы в этиловом спирте, а затем суспензию высушивают до полного удаления растворителя. Формирование композитов осуществляют горячим прессованием при температуре 450 °C, что позволяет создать твёрдый раствор олова в меди и улучшить механические свойства.

Цель исследования является изучение влияния содержания наноалмазных добавок на физико-механические и трибологические свойства, а также на рельеф поверхности износа медно-оловянных композитов.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов использовали порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), олова ПО1 (ГОСТ 9723-73) с размером частиц около 40 мкм и наноалмазы детонационного синтеза (ДНА) марки УДА-С-ГО (ФНПЦ «Алтай»). Соотношение компонентов соответствовало стандартному составу оловянной бронзы (ОБ) 80 % Cu – 20 % Sn. Были подготовлены образцы бронзы и три группы композитов с содержанием наноалмазов 0,5; 1,5 и 3,0 %мас., по 4 образца в каждой группе. Технология включала термомодификацию ДНА при 500 °C в течение 5 ч для очистки и функционализации поверхности, ультразвуковое диспергирование рабочей шихты в этиловом спирте при 75 °C в течение 25 мин [4] и сушку при 100 °C до полного удаления растворителя, а затем горячее прессование таблеток диаметром 10 мм и высотой 5 мм при 450 °C, усилии 30 кН в течение 15 с. Микроструктуру образцов изучали методом растровой электронной микроскопии JSM-6480LV (JEOL), фазовый состав — на дифрактометре D2 PHASER (CuKα, λ = 1,54056 Å) с углами сканирования 20–95° и анализом по базе PDF-2. Плотность определяли пикнометрическим методом с использованием аналитических весов DL-3000 WP (AND). По полученным результатам плотности рассчитывали пористость образцов по формуле:

$$П = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{теор}}\right) \cdot 100\% \qquad (1)$$

где $\rho_{теор}$ – теоретическая (расчётная) плотность беспористого материала, ρ – фактическая плотность исследуемого образца. Теоретическая плотность находится по формуле:

$$\rho_{теор} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{\rho_i}} \quad (2)$$

где C_j – концентрация компонентов в порошковой смеси, n – количество компонентов.

Трибологические свойства – коэффициент трения, линейный и массовый износ – оценивали на универсальном трибометре UMT-3MT (CETR, США) по схеме «палец–диск» при сухом скольжении с контртелом из нержавеющей стали AISI 304, образец на 25 мм от центра диска. Испытания проводили при нагрузке 30 Н, скорости 60 об/мин (0,157 м/мин) и времени 2400 с. Шероховатость поверхности до и после теста измеряли профилометром Surftest SJ-201 (Mitutoyo, Япония) и обрабатывали в Excel с усреднением по всей площади.

Основные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано, что дифрактограммы всех КМ, независимо от содержания наноалмазов, совпадают и соответствуют фазовому составу оловянной бронзы (ОБ). Пики алмаза при отражениях (111) и (220) ≈44° и ≈75° практически не видны из-за наноразмерности частиц и перекрытия линиями меди; небольшой пик около 26° соответствует Cu_3Sn и может указывать на графит. Малая интенсивность пика подтверждает, что наноалмазы не выгорают при отжиге и компактировании.

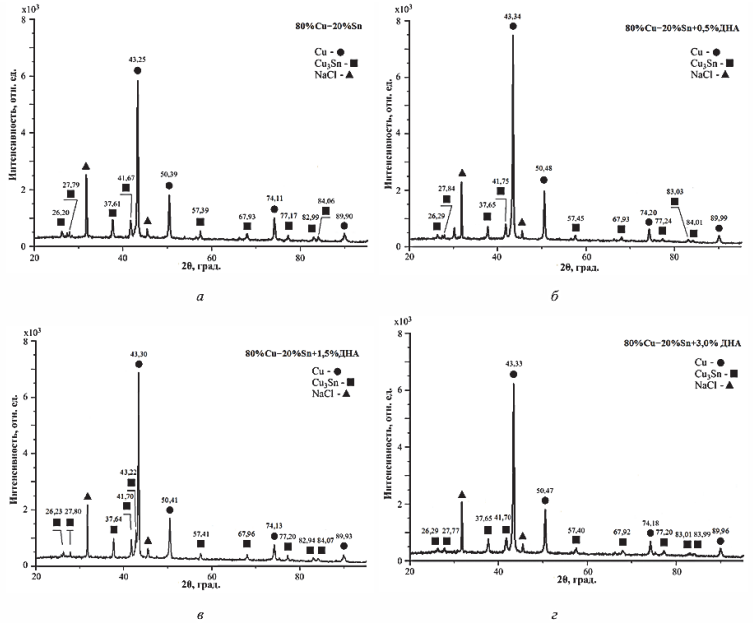


Рис. 1. Дифракционные спектры образцов: а – ОБ без добавок; б – КМ с 0,5 % ДНА; в – КМ с 1,5 % ДНА; г – КМ с 3,0 % ДНА
1 – КМ – композиционный материал; 2 – ОБ – оловянная бронза; 3 – ДНА –детонационный наноалмаз

Микроструктура исходной ОБ двухфазная (рис. 2, а), в КМ наноалмазы распределены достаточно равномерно, но с ростом содержания образуются агломераты (рис. 2, б–г). Микрорентгеноспектральный анализ показал (табл. 1), что олово ($T_{пл}$ ≈ 232 °С) заполняет межчастичное пространство меди с образованием твердого раствора олова меди Cu(Sn) и соединения Cu_3Sn. Светлые области соответствуют фазам, содержащим олово, а темно-серые участки соответствуют меди. (рис. 3, табл. 1). Соединение Cu_3Sn локализуется на границах раздела, а наноалмазы распределены внутри фаз и по межфазным границам (рис. 3, б–г).

Таблица 1

Элементный состав микроучастков образцов КМ с различным содержанием добавок ДНА

Точки замера на рис. 3	Элементный состав			
	Cu, ат.%	Sn, ат.%	C, ат.%	O, ат.%
1	100	-	-	-
2	71,99	28,01	-	-
3	5,24	2,24	61,34	31,18
4	100	-	-	-
5	-	3,14	83,33	13,53
6	70,74	29,26	-	-
7	3,04	1,58	86,96	8,43
8	73,70	26,30	-	-
9	100	-	-	-

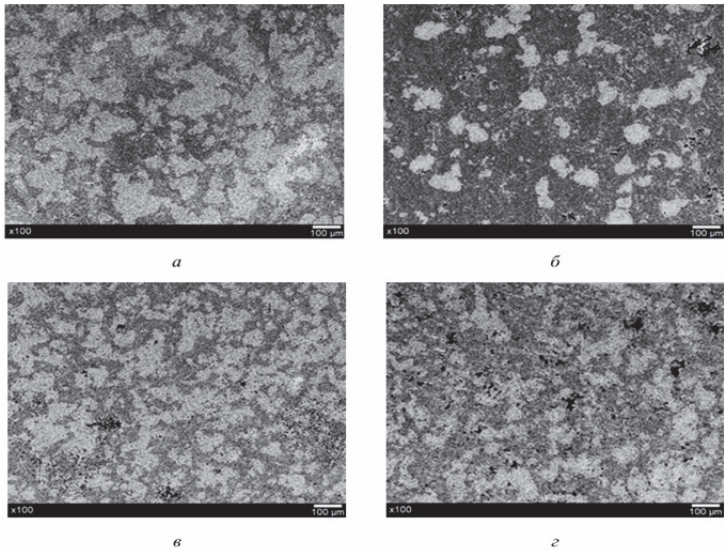


Рис. 2. Структура образцов при увеличении х100: а – ОБ без добавок; б – КМ с 0,5 % ДНА; в– КМ с 1,5 % ДНА; г – КМ с 3,0 % ДНА (SEM-BSE) 1 – КМ – композиционный материал; 2 – ОБ – оловянная бронза; 3 – ДНА –детонационный наноалмаз

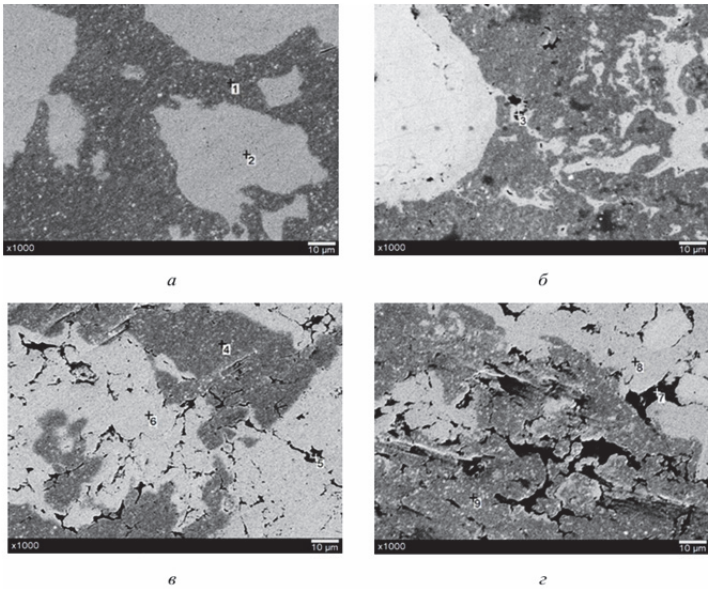


Рис. 3. Структура образцов при увеличении х1000: а – ОБ без добавок; б – КМ с 0,5 % ДНА; в – КМ с 1,5 % ДНА; г – КМ с 3,0 % ДНА (SEM-BSE) 1 – КМ – композиционный материал; 2 – ОБ – оловянная бронза; 3 – ДНА –детонационный наноалмаз

Все КМ имеют высокую относительную плотность (табл. 2), минимум 94 % у образцов с 1,5 мас.% ДНА, что свидетельствует о хорошей консолидации и адгезии наночастиц после термомодификации.

Таблица 2

Физические свойства образцов КМ с различным содержанием добавок ДНА

Параметр	Содержание ДНА, мас. %			
	0	0,5%	1,5%	3,0%
Теор. плотность, г/см3	8,57	8,44	8,21	7,88
Факт. плотность , г/см3	8,26	8,19	7,73	7,72
Отн. плотность, %	96	97	94	98
Пористость, %	4	3	6	2

Оловянно-бронзовые сплавы должны сочетать высокую прочность и износостойкость с низким коэффициентом трения для эффективной работы в парах трения и при обработке материалов. На рис. 4 показано, что добавление ДНА снижает коэффициент трения с 0,73 до 0,60, а массовый и линейный износ изменяются нелинейно: при 1,5 %мас. ДНА массовый износ уменьшается на 26 % ($0{,}31\cdot10^{-2}$ г), линейный — на 21 % ($0{,}51\cdot10^{-4}$ м), значительно улучшая свойства по сравнению с исходной бронзой. Результаты согласуются с данными для алюминиевых матриц [3].

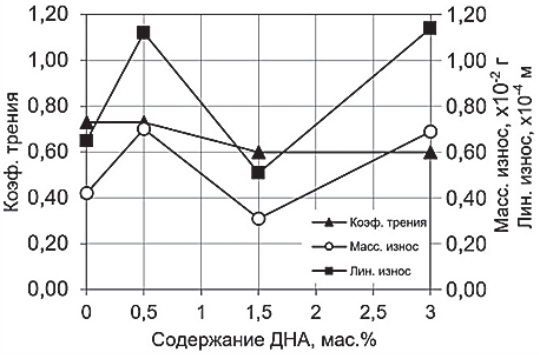


Рис. 4. Трибологические характеристики КМ в зависимости от содержания частиц ДНА
1 – КМ – композиционный материал; 2 – ДНА –детонационный наноалмаз

Нелинейное изменение износа связано с эффектами дисперсного упрочнения: при оптимальном содержании ДНА повышаются прочность и твёрдость, снижается коэффициент трения, а сеть межфазных границ препятствует развитию дефектов. При избытке добавки, напротив, формируются зоны накопления микродефектов, ухудшающие износостойкость; дополнительное влияние оказывает фаза Cu_3Sn, увеличивающая прочность, но снижающая пластичность. Шероховатость как показатель износостойкости существенно возрастает после испытаний (табл. 3), однако для КМ с 1,5 и 3,0 мас.% ДНА она ниже, чем у исходной бронзы. Минимальное значение (2,61 мкм) достигается при 1,5 мас.% ДНА, а близкие значения при 3,0 мас.% могут указывать на процессы структурной самоорганизации при трении.

Таблица 3

Профиль неровностей образцов с различным содержанием ДНА

Концентрация ДНА, мас.%	Шероховатость Ra, мкм	
	исходная	после трения
0	0,20 ± 0,06	2,09 ± 0,17
0,5	0,29 ± 0,11	5,63 ± 1,89
1,5	0,26 ± 0,10	2,61 ± 0,38
3,0	0,53 ± 0,04	2,69 ± 0,30

Таким образом, по результатам трибологических испытаний экспериментальных композиционных материалов на основе оловянной бронзы с наноалмазными частицами можно заключить, что введение наноалмаза в количестве 1,5 %мас. улучшило трибологические характеристики оловянной бронзы состава 80 % Cu – 20 % Sn: коэффициент трения снизился на 18 %, массовый износ – на 26 %, линейный износ – на 21 %.

Заключение

Исследованы композиционные материалы на основе порошковой оловянной бронзы состава 80 % Cu – 20 % Sn с добавками термомодифицированного наноалмаза (0,5; 1,5; 3,0 % мас.), полученные методом ультразвукового диспергирования с последующим горячим прессованием. Установлено, что все образцы обладают высокой относительной плотностью, что свидетельствует об эффективной консолидации и улучшении адгезии наночастиц к металлической матрице после термомодификации. Микроструктурный и фазовый анализ показал, что независимо от содержания добавки формируется одинаковый фазовый состав (Cu, α-Cu(Sn), Cu_3Sn и наноалмаз), при этом частицы распределены относительно равномерно, хотя с ростом их содержания увеличивается количество агломератов.

Трибологические испытания показали, что наилучший комплекс свойств достигается при 1,5 %мас. ДНА: коэффициент трения снижается на 18 %, массовый износ – на 26 %, линейный – на 21 %, а также наблюдается минимальная шероховатость поверхности после испытаний

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Медные сплавы: марки, свойства, применение: справочник / Ю.Н. Райков, Г.В. Ашихмин, В.П. Полухин, А.С. Гуляев; под общ. ред. Ю. Н. Райкова. – М.: Институт "Цветметобработка", 2011. – 456 с. – ISBN 978-5-9900749-6-5. – EDN QNAGZT.

2. Разработка способа нанесения нанокомпозиционных покрытий / В. А. Попов, Е. В. Вершинина, М. Н. Ковальчук, Е. В. Попова // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 13(209). – С. 109-110. – EDN VPMKRY.

3. Попов, В.А. Влияние режимов обработки на структуру композитов с алюминиевой матрицей и наноалмазными упрочняющими частицами / В.А. Попов, В.А. Зайцев, М.Н. Ковальчук // Тезисы докладов XXIV Российской конференции по электронной микроскопии : Черноголовка, 29 мая – 01 2012 года. – Черноголовка: Богородский печатник, 2012. – С.119. ISBN 978-5-89589-060-8. – EDN QJZVIF.

4. Шарин, П. П. Новый метод приготовления твердосплавной шихты с упрочняющими наночастицами для изготовления матриц алмазных инструментов / П. П. Шарин // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2016. – № 1(51). – С. 78-87. – EDN VKPPCB.

5. Hanada, K. Thermal properties of diamond particle-dispersed Cu composites / K. Hanada, K. Matsuzaki, T. Sano // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 153-154, No. 1-3. – P. 514-518. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.289. – EDN KLQWRN.

УДК 620.172.2

Пасюта Анна Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Pasyuta Anna Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Калугина Анна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kalugina Anna Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ АБС–ПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ
DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF TENSILE ABS PLASTIC OBTAINED BY 3D PRINTED METHOD

Аннотация. В статье приведены результаты комплексного исследования механических характеристик образцов АБС-пластика, изготовленных с помощью технологии трёхмерной печати. Изучено влияние параметров технологического процесса печати на прочностные свойства изделий. Актуальность работы обусловлена растущим применением аддитивных технологий в различных отраслях промышленности, где критически важны надёжность и предсказуемость механических свойств материалов. В ходе исследования были определены основ-

ные механические характеристики образцов, включая предел прочности и относительное удлинение при разрыве. Результаты исследования показали существенную зависимость механических свойств от настроек процесса 3D печати. Полученные данные позволяют разработать практические рекомендации по оптимизации параметров печати для достижения требуемых характеристик изделий.
Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the mechanical characteristics of ABS plastic samples made using three-dimensional printing technology. The influence of the parameters of the printing process on the strength properties of products has been studied. The relevance of the work is due to the growing use of additive technologies in various industries, where reliability and predictability of the mechanical properties of materials are critically important. During the study, the main mechanical characteristics of the samples were determined, including ultimate strength and elongation at break. The results of the study showed a significant dependence of mechanical properties on the settings of the 3D printing process. The data obtained allows us to develop practical recommendations for optimizing printing parameters to achieve the required product characteristics.
Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, АБС, метод послойного наплавления, механические характеристики, предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве, анизотропия свойств.
Key words: additive technologies, 3D printing, ABS, fused deposition modeling, mechanical characteristics, tensile strength, elongation at break, anisotropy of properties.

Введение

Целью данной работы является определение механических свойств образцов АБС-пластика, полученных методом FDM-печати [1].

В последние годы аддитивные технологии получают все большее распространение в производстве деталей для различных отраслей промышленности, включая автомобилестроение и авиацию. Одним из наиболее популярных методов 3D-печати для полимеров является FDM (Fused Deposition Modeling), где в качестве материала часто используется акрилонитрил-бутадиен-стирол-сополимер (АБС) [2], который остается одним из самых востребованных материалов для аддитивного производства. Главным его преимуществом является баланс между доступной стоимостью, хорошей технологичностью и относительно высокими механическими характеристиками. Благодаря данному способу возможно послойное создание изделий сложной геометрии с гибкой настройкой структуры материала, что позволяет значительно расширить конструкторские и технологические возможности [3]. В то же время, свойства изделий, изготовленных этим методом, могут заметно различаться в зависимости от настроек печати, включая ориентацию слоев и растра, что напрямую влияет на механические характеристики получаемых образцов [4].

Существует важная научно-практическая проблема - сложная зависимость механических свойств напечатанных деталей от параметров процесса, а особенно от ориентации слоёв и растра относительно нагрузки. Такое влияние особенно выражено при горизонтальном расположении образцов на платформе принтера.

Материалы и методы исследования

Для анализа механических свойств АБС-пластика методом FDM были изготовлены и испытаны 5 плоских пропорциональных образцов типа 1А (рис. 1), согласно размерам ГОСТ 11262 – 2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Образцы печатались горизонтально, параллельно основанию платформы, формирование растра происходило по диагональной схеме +45°/–45°, с плотностью заполнения 100%.

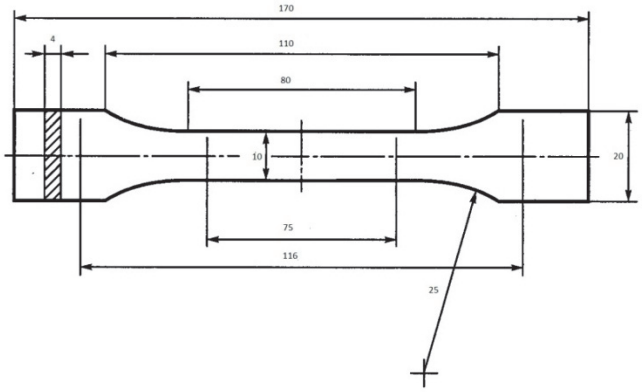


Рис. 1. Плоский пропорциональный образец тип 1А

Образцы были изготовлены из нити диаметром 1,75 мм производства ООО «АБС Мейкер», на принтере Anycubic i3 Mega-S, с диаметром сопла 0,4 мм. Основные настройки печати приведены в таблице 1.

Таблица 1

Настройки для печати

Высота слоя (мм)	0,2
Толщина стенки (мм)	1,2
Толщина низ/верх (мм)	1
Плотность заполнения	100
Скорость печати (мм/с)	40
Температура печати (°С)	230°С
Температура стола(°С)	80°С

Испытания на растяжение производились на универсальной разрывной машине 3382 INSTRON (рис. 2), обеспечивающей высокую точность измерения с погрешностью не выше 0,5%. Испытания производились со скоростью 1 мм/мин, измерения проводили на пяти образцах.

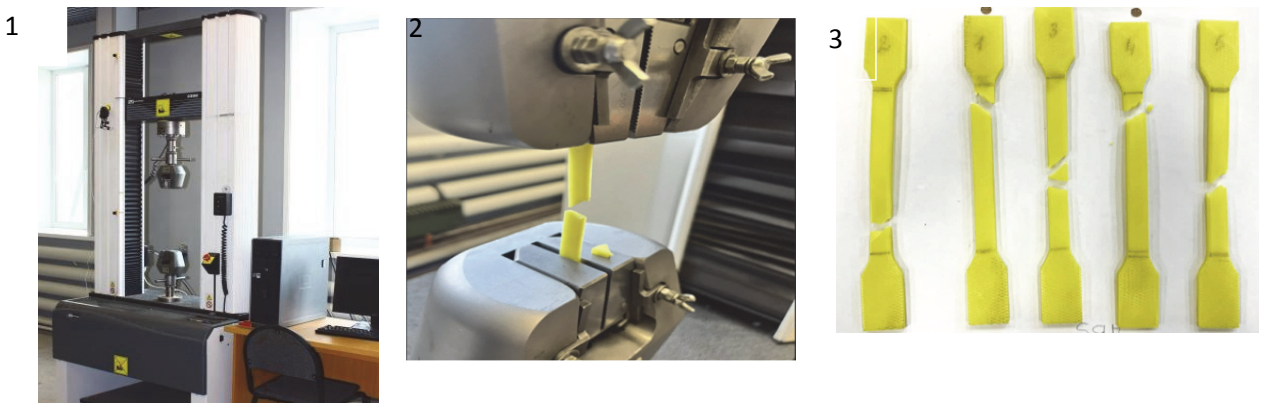


Рис. 2. Оборудование для испытания на растяжение образцов из материала АБС-пластика: 1 - испытательная машина 3382 INSTRON; 2 – процесс разрушения образца в ходе испытания на растяжение; 3 – образцы после испытания на растяжение

Результаты испытаний

На основании проведённых испытаний были построены кривые «напряжение-деформация» (рис. 3) и определены основные механические характеристики.

Основные механические характеристики, определённые в ходе испытания на растяжение являлись: предел прочности при растяжении, прочность при разрыве и относительное удлинение. Данные характеристики рассчитывались по формулам в соответствии с ГОСТ 11262 – 2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»:

Относительное удлинение: $$\delta = \frac{l_к - l_0}{l_0} * 100\%, \quad (1)$$

где l_0 – начальная длина образца; $l_к$ – конечная длина образца.

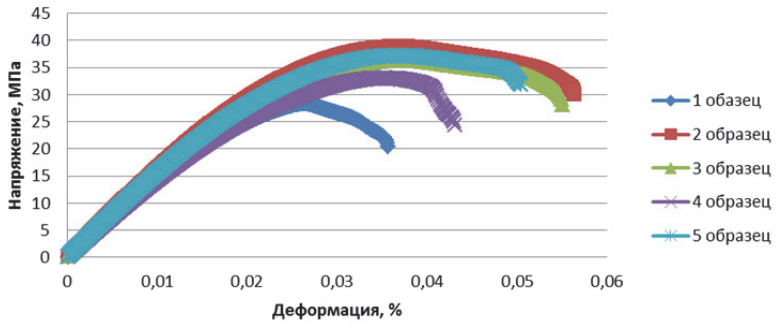


Рис. 3. Кривая «напряжение - деформация»

Предел прочность при разрыве: $$\sigma_{pp} = \frac{F_{pp}}{A_0}, \quad (2)$$

где F_{pp} – растягивающая нагрузка до разрушения образца; A_0 – начальное поперечное сечение образца.

Предел прочность при растяжении: $$\sigma_{pм} = \frac{F_{pм}}{A_0}, \quad (3)$$

где $F_{pм}$ – максимальная растягивающая нагрузка; A_0 – начальное поперечное сечение образца. Значения механических характеристик приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения механических характеристик образцов АБС-пластика

Параметры	**№ образцов**					**Среднее значение**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	
Предел прочности при растяжении, МПа	23,8	38,9	36,4	33,1	37,2	34
Относительное удлинение, %	3,4%	6,1%	5,7%	2,3%	3,8%	4

Обсуждение результатов

В ходе проведения испытаний на пяти образцах был определен предел прочности при растяжении, среднее значение которого составило 34 МПа. Рассчитано относительное удлинение образцов, показатель варьируется в пределах от 2,3% до 6,1%, и в среднем составляет 4 %.

В работе [1], которая была выполнена при других настройках печати образцов (а именно, толщина контура 0,178 мм, температура экструдера 310°C и температуре камеры 78°C, при аналогичном формировании растра по диагональной схеме +45°/–45° с плотностью заполнения 100%), авторами статьи также был определен средний показатель механических характеристик, таких как предел прочности при растяжении и относительное удлинение. Среднее значение предела прочности составило 47 МПа и относительное удлинение 6 %. Различие результатов может быть обусловлено различиями технологических параметров печати образцов, в частности, температуры экструдера и толщины контура.

Заключение

Экспериментальные исследования механических характеристик АБС-пластика, полученного методом FDM-печати, позволили сделать ряд важных выводов. Установлено, что параметры технологического процесса 3D-печати оказывают существенное влияние на прочностные характеристики получаемых изделий. При заданных условиях печати (диагональное формирование растра +45 /–45 и 100% заполнение) выявлена значительная разница показателей прочности между образцами. Анализ результатов испытаний показал, что средний предел прочности при растяжении составил 34 МПа, а относительное удлинение – 4 %. При этом наблюдали существенный разброс значений как по прочности (от 23,8 до 38,9 МПа), так и по пластичности (от 2,3 % до 6,1 %). Сравнительный анализ с результатами аналогичных исследований подтвердил зависимость механических свойств от технологических параметров, в частности от температуры экструдера и геометрии контура. Это указывает на необхо-

димость тщательной оптимизации режимов печати для достижения требуемых характеристик изделий.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании деталей, изготавливаемых методом 3D-печати, а также при разработке технологических процессов производства изделий из АБС-пластика.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шмелев, А. В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4(112). – DOI 10.18698/2308-6033-2021-4-2070. – EDN MNSGQO.

2. Абрамова, И. А. Технология послойного наплавления / И. А. Абрамова, Д. Полков // Наука и военная безопасность. – 2016. – № 3(6). – С. 111-114. – EDN XHYSCZ.

3. Первый напечатанный на 3D-принтере миниавтобус. Опубл. 28.06.2016 // Fishki.net. URL: https://fishki.net/auto/1996051-pervyj-napechatannyj-na-3d-printere-miniavtobus.html

4. Влияние технологических режимов FDM-печати и методов постобработки на физико-механические свойства образцов из ABS пластика / А. А. Потапов, И. С. Говоров, И. В. Гнидина, А. П. Малахо // Новые полимерные композиционные материалы : Материалы XX Международной НПК, Нальчик, 04–10 июля 2024 года. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2024. – С. 92. – EDN BYVDOV.

УДК: 669.71

Першикова Вероника Андреевна, студент, Комсомольского-на-Амуре государственного университета
Pershikova Veronika Andreevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Катунцева Наталья Леонидовна, Руководитель отделения среднего профессионального образования, старший преподаватель, Комсомольского-на-амуре государственного университета
Katuntseva Natalia Leonidovna, Head of the Department of Secondary Vocational Education, senior lecturer, Komsomolsk-na-Amure State University

ИСТОРИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ
HISTORY OF ALUMINUM PRODUCTION

Аннотация. Представленный текст посвящён истории открытия и началу промышленного производства алюминия. Повествование начинается с мифа о мастере, которого казнили за секрет «серебра из глины» и археологических свидетельств древних сплавов. Далее рассмотрены открытия XIX века. Внимание уделено технологическому прорыву, связанному с именами Чарльза Мартина, Поля Луи, Карла Иосифа и др., заложившими основу в производство современной алюминиевой индустрии.

Abstract. The presented text is devoted to the history of the discovery and the beginning of industrial aluminum production. The story begins with the myth of a master who was executed for the secret of "silver from clay" and archaeological evidence of ancient alloys. Next, the discoveries of the 19th century are considered. Attention is paid to the technological breakthrough associated with the names of Charles Martin, Paul Louis, Karl Joseph and others, who laid the foundation for the production of the modern aluminum industry.

Ключевые слова: алюминий, способ получения алюминия, легенда об алюминии
Key words: aluminum, method of obtaining aluminum, legend about aluminum

Введение

Во многих литературных источниках [1-3] пишут только часть истории о получении и нахождении элементов, не приводя интересных фактов или же легенд, которые могли бы заинтересовать студента в углублении интереса к историческим сведениям. Поэтому целью и

задачами данного исследования поставлено изучение истории получения алюминия, от первых предположений его существовании до современных промышленных методов.

Основная часть

Существует легенда, основанная на рассказе Плиния старшего, что алюминий был известен ещё в древности, когда к правителю Тиберию пришёл ювелир с чашей, покрытой серебряным металлом. На что мастер ему поведал, о том, что получил такой металл из обычной глины и что секрет создания его знают только он и Боги. Император, опасаясь, что ценность серебра (алюминий похож на серебро как брат-близнец) упадет, приказал казнить мастера. На самом же деле эту историю можно назвать сказкой, так как для получения чистого алюминия из глины нужно затратить очень много энергии.

Однако, в начале третьего века до н.э. был похоронен китайский полководец Чжоу-Чжу и гроб его состоял из сплава, содержащего 85 % алюминия.

В 1970-х годах немецкие химики решили проверить, могли ли древние люди получить алюминий с помощью восстановления угля. Они нагрели в тигле смесь глины с угольным порошком и поваренной солью (соль получали из морской воды). По итогу на поверхности начали появляться серебряные шарики, что свидетельствует о выделение алюминия. К сожалению, выход металла очень мал, но, предположительно, именно таким способом его получали.

Первое предположение о существовании нового металла выдвинул Антуан Лавуазье в 1782 году, а попытку получить алюминий при помощи электролиза глинозема предпринял Хэмфри Дэви в 1808 году, но ничего не получилось. Опыт возобновил Ганс Христиан Эрнест в 1825 году, он провел эксперимент, пропуская хлор через раскаленную окись алюминия с углем и подвергая нагреванию полученную смесь с амальгамой калия, и ему удалось получить металл, напоминающий олово (не чистый алюминий).

Ученый, которому удалось извлечь из глинозема алюминий, стал Фридрих Вёлер. Он видоизменил опыт Ганса Христиана Эрнеста, но вместо амальгамы калия взял чистый калий. И 22 октября 1827 года он смог получить 30 г порошкообразного алюминия при прокаливании хлорида алюминия с калием. Вёлер потратил 17 лет жизни, чтобы при помощи этого опыта достичь значительного выхода продукта, но ничего не удалось.

Реализовать желаемое удалось Роберту Вильгельму Бунзену в 1854 году, проведя электролиз двойной соли $NaCl_3 \cdot AlCl_3$, и почти в это же время Анри Этьенну Сент-Клер Девилю, видоизменяя способ Вёлера, он добавил вместо калия металлический натрий.

В 1855 году была проведена Всемирная Парижская выставка, организованная лично Наполеоном III в 1855 году, где представили «Серебро из глины» или по-другому «Серебро Девиля» - 12 слитков алюминия, и все смотрели на него, как на редчайшую драгоценность. Было не удивительно, ведь в то время стоимость алюминия превышала в 1500 раз цену железа.

Однако Девиль понимал, что у алюминия совершенно другое будущее, не относящиеся к ювелирным изделиям. Девиль решил открыть мастерскую в пригороде Парижа в 1856 году по производству алюминия. В качестве сырья использовал боксит, для облегчения плавления окиси алюминия начал добавлять криолит. Ученого поддержал Наполеон III, мечтавший надеть на солдат доспехи из алюминия. С 1855-1885 гг. по методу Девиля было получено около 50 тонн алюминия, однако, этот вариант также оказался затратным (в получении использовали гальванические батареи).

Решающим фактором решения вопроса с алюминием стало изобретение Вернером Сименсом динамо-машины в 1867 году. Оно позволило удешевить способ получения, так как генератор вырабатывал электрический ток в больших количествах.

В 1886 году американский ученый Чарльз Мартин Холл и почти одновременно с ним в тоже время француз Поль Луи Туссен Эру разработали электрический способ получения алюминия, используемый в наши дни. Процесс растворения оксида алюминия (глинозёма) в расплаве криолита с дальнейшим электролизом за счет коксовых и графитовых анодных электродов как метод получения алюминия до сих пор носит имя Холла-Эру.

В 1889 году технологичный и дешевый способ производства глинозёма изобрел австралийский химик Карл Иосиф Байер, работая в Санкт-Петербурге на Тентелевском заводе.

В одном из экспериментов ученый добавил щелочной раствор в боксит и нагрел в закрытом сосуде, после чего увидел, что тот растворился. В нерастворившемся остатке Байер не обнаружил алюминия, зато выяснил, что при обработке щелочным раствором весь алюминий, содержащийся в боксите, переходит в раствор.

Сейчас производство металла Al одно из самых больших, так как алюминий используют в различных сферах. Например, в авиастроительной – производят самолёты, в которых Al является одним из основных материалов за счёт легкости, что повышает эффективность полётов. А также, благодаря устойчивости к коррозии, его применяют в пищевой промышленности для транспортировки продукции в банках или же в бутылках. Из него делают сплавы, такие как алюминиево-магнивый, алюминиево-марганцевый и многие другие.

Схема производства получения алюминия в наши дни представлена на рис. 1.

Открытие алюминия произвело технологический переворот, который позволил удешевить производство многих конструкционных материалов. Однако, в нынешних условиях санкций на Россию, мировые цены на Al являются достаточно высокими и поддерживаются рисками дефицита. Цена алюминия на мировом рынке по состоянию на апрель 2026 года составляет около 3600 USD за тонну (рис. 2).

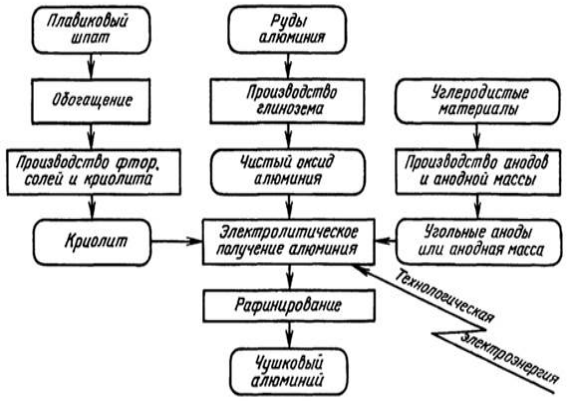


Рис. 1. Этапы производства алюминия



Рис. 2. Мониторинг цены алюминия на мировом рынке (USD за тонну)

Заключение

В работе были изучены эволюционные способы получения алюминия, начиная с предположений, заканчивая промышленным производством. Данный обзор включает в себя различные способы получения алюминия. Во время выполнения работы была достигнута поставленные цель, которая включала в себя собрать познавательный и интересный материал для ознакомления студентов различных направлений и специальностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Медведев, Ю. Н. Алюминий: история промышленного получения / Ю. Н. Медведев // Химия для школьников. – 2017. – № 2. – С. 15-24. – EDN YNFXJZ.

2. Васина, М. А. История получения и применения алюминия и его сплавов / М. А. Васина // Вопросы истории естествознания и техники. – 2020. – Т. 41, № 3. – С. 560-575. – DOI 10.31857/S020596060008100-2. – EDN TERFJC.

3. Федоров, П. П. Древнеримская технология получения алюминия: реконструкция процесса / П. П. Федоров, А. М. Самойлов // Тонкие химические технологии. – 2019. – Т. 14, № 6. – С. 31-38. – DOI 10.32362/2410-6593-2019-14-6-31-38. – EDN YHMQYE.

УДК 621.7.01
Попкова Алёна Алексеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Popkova Alena Alekseevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Щелкунов Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Schelkunov Evgeniy Borisovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КРОНШТЕЙН» ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПЕЧАТИ
INCREASING THE EFFICIENCY OF BRACKET MANUFACTURING THROUGH THE USE OF 3D PRINTING

Аннотация. В работе предложено решение задачи повышения эффективности изготовления детали «Кронштейн» в условиях мелкосерийного производства за счет интеграции традиционных методов обработки детали с 3D-печатью в качестве заготовительной операции. Выполнено сравнение по экономическим показателям предлагаемого технологического процесса с базовым, показавшее ожидаемое повышение эффективности за счет снижения трудоемкости изготовления детали, затрат на сырье, снижения потребности в режущем инструменте и технологическом оборудовании.
Abstract. This paper proposes a solution to the problem of increasing the manufacturing efficiency of the "Bracket" component in small-scale production by integrating traditional machining methods with 3D printing as a preparatory operation. A comparison of the proposed process's economic indicators with the baseline one was conducted, demonstrating the expected increase in efficiency due to reduced labor intensity, raw material costs, and the need for cutting tools and process equipment.
Ключевые слова: 3D-печать, технологический процесс, заготовка, деталь, эффективность
Key words: 3D printing, technological process, workpiece, part, efficiency

Введение

Современное производство деталей традиционными методами в мелкосерийном производстве, такими как литье и штамповка с последующей механической обработкой, сталкивается с рядом технологических и экономических ограничений, таких, как: высокая материалоемкость; ограниченная гибкость производства; длительные сроки подготовки; сложность изготовления изделий с внутренними полостями и сложной геометрией; высокие энергозатраты.

Отдельную группу перспективных современных методов представляют аддитивные технологии, также известные как 3D-печать. К основным достоинствам аддитивных технологий относятся возможность создания изделий сложной пространственной формы без применения инструментальной и технологической оснастки, высокая скорость наладки печатающего устройства на производство продукции, отсутствие необходимости в трудоемкой механической обработке построенных изделий. Технология производства деталей с применением 3D-печати обычно включает два этапа: непосредственно выращивание детали (заготовки) и постобработка (удаление опорных конструкций и окончательное придание изделию требуемых свойств, формы, размеров и точности). В связи с этим 3D-печать может быть использована в качестве метода получения заготовки [1].

В работе предложено решение задачи повышения эффективности изготовления детали «Кронштейн» в условиях мелкосерийного производства за счет интеграции традиционных методов обработки детали с 3D-печатью в качестве заготовительной операции. Выполнено сравнение по экономическим показателям предлагаемого технологического процесса с базовым.

Разработка технологического процесса изготовления детали

Деталь «Кронштейн» (рис. 1), изготавливаемая из алюминиевого жаропрочного сплава АК4-1, имеет в конструкции уклоны, полки, ребро жесткости, исполнительные и крепежные отверстия. Габаритные размеры «Кронштейна» 80х85х86мм. Масса детали 0,26 кг. Деталь изготавливается малыми партиями. что делает применение методов литья и штамповки не эффективным. По базовому технологическому процессу, включающему механическую, термическую и слесарную обработку, основное время изготовления детали составляет 3,25 часа. Время механической обработки составляет 2,57 часа. Коэффициент использования материала по базовому технологическому процессу составляет 0,52.

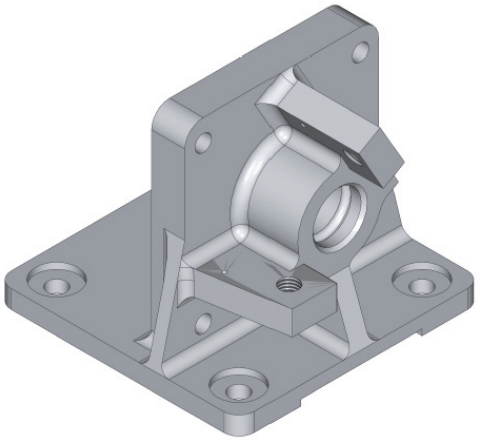


Рис. 1. Деталь «Кронштейн»

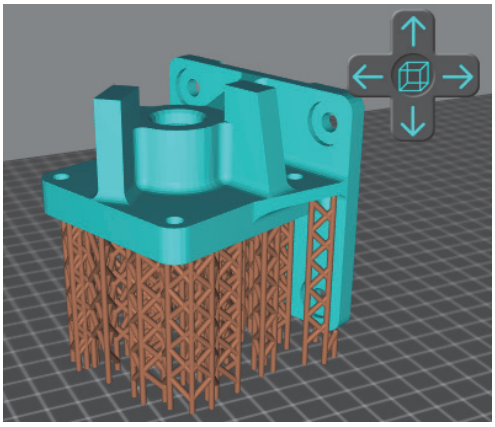


Рис. 2. CAD–модель детали с поддержками

Предлагаемый технологический процесс изготовления детали «Кронштейн» включает следующие технологические операции:

1 построение заготовки методом 3D-печати;

2 отделение заготовки от плиты построения;

3 термообработка заготовки;

4 удаления остатков поддерживающих элементов, обработка отверстий.

В качестве метода 3D-печати выбрано селективное лазерное плавление (SLM), позволяющее изготавливать изделия из металлических порошков с высокой точностью и прочностью. Выбран аналог сплава АК4-1ч для 3D-печати - порошок марки RS-300 со средним размером гранул 20 мкм [2].

Изготовление заготовки выполняется на 3D-принтере модели 3DLAM Maxi 2.0.

Технологические параметры 3D-печати: толщина слоя 0,05 мм, мощность лазера 300-400 Вт, скорость сканирования 1300 мм/с, диаметр пятна лазера – 80-100 мкм, шаг сканирования 0,11 мм, температура платформы 150-200 ^{0}С.

Для обработки поверхности от поддержек и выполнения отверстий выбраны те же оборудование, инструмент и режимы обработки, что и в базовом техпроцессе.

На рис. 2 показана CAD–модель детали, выполненная в программе T-flex и интегрированая в программу слайсер для разделения на слои, конструирования поддержек и позиционирования на платформе 3D-принтера. Объем заготовки с учетом поддержек составляет 91100 мм^3.

Определение экономической эффективности

Для определения экономической целесообразности применения 3D-печати в качестве заготовительной операции при изготовлении детали «Кронштейн» определялись следующие параметры: коэффициент использования материала; стоимость материала, требуемого для изготовления одной детали; потребность в режущем инструменте; время, затрачиваемое на механическую обработку одной детали; общее время изготовления одной детали. Вычисленные параметры сравнивались с одноименными для базового технологического процесса.

Расчет времени печати выполнялся по формуле, предлагаемой [3].

$$V_v = v \cdot s \cdot h,$$

где, V_v – скорость объемной печати, мм3/час; v – скорость сканирования лучом (1300 мм/с); s – шаг штриховки (0,11 мм); h - толщина слоя (0,05мм).

Время спекания:

$$t_c = \frac{V}{V_v},$$

где, t_c – время спекания, V – объем создаваемого объекта.

При выбранных параметрах время спекания составило 3,5 часа.

В принтере 3DLAM MAXI 2.0 может быть одновременно в работе до четырех лазеров, благодаря чему основное время построения изделия может быть сокращено в четыре раза, т.е. до 0,9 часа. Общее время с учетом холостых перемещений лазерной головки составит 2,7 часа.

Размеры рабочей поверхности платформы принтера 3DLAM MAXI 2.0 позволяют разместить до семи выращиваемых заготовок одновременно (рис. 3). При параллельной печати 7 заготовок время печати составит 6,2 часа. Время печати одной заготовки 0,89 часа.

Время термической обработки принято 2 часа на партию.

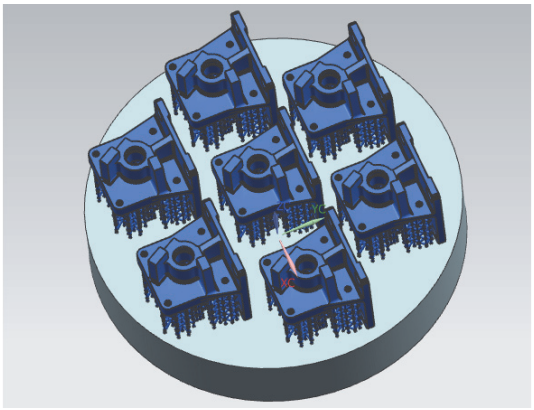


Рис. 3. Размещение заготовок на плите построения 3D-принтера

Коэффициент использования материала определялся как

$$K_{\text{м}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{з}} + m_{\text{п}}}, \qquad [1]$$

где $m_{\text{д}}$ и $m_{\text{з}}$– масса детали и заготовки, кг; и $m_{\text{п}}$ – потери материала, кг.

Значения сравниваемых экономических составляющих базового и предлагаемого технологических процессов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка экономических составляющих базового и предлагаемого технологического процесса детали «Кронштейн»

Параметр	Технологический процесс	
	базовый	предлагаемый
Цена 1 тонны материала, р. (цены 2025 г.)	800000	1800000
Масса/Стоимость материала для одной заготовки, кг/р	1,58/1264	0,32/566
Масса/стоимость отходов от одной заготовки, кг/р	1,32/39,6	0,06/1,8
Стоимость материала, требуемого для изготовления одной детали, р	1224,4	564,2
Коэффициент использования материала	0,2	0,8
Время, затрачиваемое на механическую обработку, час	2,57	1,1
Общее время изготовления детали, час	3,25	2,2

Из таблицы видно, что применение SLM в качестве метода получения заготовки позволяет сократить расходы на материал для детали в 2,17 раза, общее время изготовления «Кронштейна» сократить в 1,5 раза. За счет сокращения времени механической обработки снижаются расходы на режущий и вспомогательный инструмент, сокращаются эксплуатационные расходы на технологическое оборудование.

Заключение

В работе предложена идея повышения эффективности изготовления сложнопрофильной детали «Кронштейн» в условиях мелкосерийного производства за счет использования 3D-печати в качестве метода изготовления заготовок.

Сравнение экономических составляющих предлагаемого и базового технологического процесса изготовления детали «Кронштейн» показало, что повышение эффективности достигается за счет снижения трудоемкости изготовления детали, затрат на сырье, снижении потребности в режущем инструменте и технологическом оборудовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение эффективности изготовления деталей в мелкосерийном производстве за счет использования аддитивных технологий / Е. Б. Щелкунов, М. Е. Щелкунова, А. А. Акулина, Е. А. Рубан // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2026. – № 2(791). – С. 53-60. – EDN HBJCIY.

2. Немолякина, Е. А. Аддитивные технологии в авиастроении / Е. А. Немолякина, Е. Б. Щелкунов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024.

3. Никируй, А. Э. Время и стоимость изготовления деталей методом селективного лазерного спекания при организации прецизионного производства / А. Э. Никируй, С. В. Лымарь, П. А. Дроговоз // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 72-77; DOI: https://doi.org/10.17513/snt.39040.

УДК 678.07

Потапенко Богдан Игоревич, аспирант, Тихоокеанский государственный университет
Potapenko Bogdan Igorevich, post-graduate student, Pacific National University
Яворский Даниил Олегович, аспирант, Тихоокеанский государственный университет
Yavorskii Daniil Olegovich, post-graduate student, Pacific National University
Исаев Сергей Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы промышленной инженерии Политехнического института, Тихоокеанский государственный университет
Isaev Sergey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ФАЗ, ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
INVESTIGATION OF THE THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS, EFFECT OF THE FORMATION INTERFACE BOUNDARIES, TO RECEIVE METAL-POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния модификаторов на основе эфиров акриловой кислоты на некоторые термодинамические характеристики эпоксидного олигомера с целью создания эффективных полимерных связующих (матриц) для композитов. Обнаружено, что модификация эпоксидной смолы приводит к значительному падению динамической вязкости. Показано, что введение модификатора в исследуемую смолу приводит к снижению показателя поверхностного натяжения, уменьшению углов смачивания, что позволяет существенно улучшить адгезионный контакт дисперсных металлических наполнителей с полимерной матрицей.

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of modificators based on esters of acrylic acid on some thermodynamic characteristics epoxy oligomer the preparation of effective polymer binders (matrices) for composites. It was found that epoxy resin modification led to a significant drop of the dynamic viscosity. The introduction of modificator into the investigated resin led to a decrease in surface tension and contact angles, which allows signifiantly improved the adhesion contact of dispersed metal fillers with polymer matrix.
Ключевые слова: композитный материал, эпоксидная смола, эфиры метакриловой кислоты, поверхностное натяжение, угол смачивания, модификаторы.
Key words: composite material, epoxy resin, esters of methacrylic acid, surface tension, contact angle, modificators.

Введение

В течение ряда лет одним из актуальных направлений создания перспективных материалов является совершенствование и разработка композитов, способных противостоять различным воздействиям, что находит широкое применение в различных отраслях промышленного комплекса страны. По своей структуре композиционные материалы (КМ) характеризуются гетерогенным строением и состоят из матрицы (или связующее) и включёнными в неё армирующими элементами (или наполнители).

Благодаря уникальному комплексу эксплуатационных свойств, в настоящее время широкое применение при производстве КМ получили эпоксидные смолы, обладающие отличной химической и коррозионной стойкостью, высокими значениями физико-механических показателей [1]. Однако при всех своих преимуществах эксплуатационных свойств эпоксидные смолы обладают повышенной вязкостью, что в ряде случаев ограничивает их применение при изготовлении композитных изделий, например, методом инфузии.

Принимая во внимание значимость условия образования общей границы раздела двух или более фаз в монолитном гетерогенном композитном материале, необходимо учитывать термодинамические особенности процесса смешения фаз, к которым следует отнести: природу, химический состав и состояние контактирующих поверхностей, термодинамические параметры поверхностей исходных компонентов, взаимодействие поверхностей при молекулярном контакте компонентов [2].

Термодинамические параметры исходных компонентов матрицы в значительной мере характеризуются вязкостью и поверхностным натяжением, а контактирующих поверхностей наполнителей – поверхностной энергией и краевым углом смачивания. Для обеспечения требуемых значений термодинамических показателей применяют различные методы модификации исходных олигомеров, используемых в качестве связующего вещества (матрицы).

Известны три основных способа модификации исходных олигомеров: физические, физико-химические и химические. На практике, основное внимание уделяют физико-химическим и химическим способам модификации эпоксидных смол, а именно: варьирование разнообразных типов отвердителя, образование химической связи с полимерной матрицей за счет введения в эпоксидную систему реакционноспособных олигомеров (таких как изоцианаты, активные разбавители и т. д.), совмещение связующего с различными инертными разбавителями, пластификаторами, поверхностно-активными веществами (ПАВ), стабилизаторами, легирующими добавками и др. Анализ литературных и патентных сведений [3, 4] позволяет сделать вывод о том, что ещё одним типом модифицирующих агентов эпоксидной смолы являются акриловые мономеры. При введении в эпоксидную смолу 10 масс.% акрилового блоксополимера трещиностойкость и вязкость разрушения эпоксидной матрицы увеличивается в 1,5 раза по сравнению с немодифицированной.

Таким образом, исследования по разработке составов на основе пропитывающих эпоксидных олигомеров (ЭО) и отечественных акриловых мономеров, предназначенных для создания композиционных материалов методами пропитки наполнителя, являются актуальными и целесообразными.

Материалы и методы

ЭД-20 уже более 30 лет остаётся самой популярной эпоксидной смолой в России и СНГ. В отверждённом виде характеризуется высокой прочностью на разрыв и сжатие, что характерно для всех эпоксидных смол, а также высокой твёрдостью, что свойственно уже не всем смолам. К минусам применения данной смолы без использования модификаторов можно отнести высокую колкость (при сильных ударах она колется, собственной эластичности у неё нет) и вязкость. Высокая вязкость смолы влияет на качество смачивания армирующего материала, однородность, наличие пузырей и механическую прочность конечного изделия.

Для исследования выбраны следующие термодинамические характеристики модифицированной эпоксидной смолы: вязкость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания. Как известно [5] вязкость является важным технологическим параметром, определяющим режимы синтеза полимерного связующего и последующей пропитки им наполнителя. Для исследования вязкости использовался ротационный вискозиметр Brookfield DV2T (США). Поверхностное натяжение определяли методом максимального давления в пузырьке (метод Ребиндера), суть которого заключается в расчете межфазного натяжения по давлению внутри пузырька воздуха, образованного испытуемой жидкостью. Краевой угол смачивания определяли с помощью экспериментальной установки, содержащей ноутбук, соединенный с помощью кабеля с микроскопом Motic DS-2, оснащенным цифровой камерой для захвата изображения, предметным столиком для размещения пластины и капли на ее поверхности, системой подсветки испытуемого материала. В качестве исследуемой подложки, на которой определяли краевой угол смачивания, использовали алюминиевую и бронзовую пластины размером 11,5х4,5 см. Выбор материала пластин обусловлен физико-механическими свойствами разрабатываемого дисперсно-наполненного полимерного композитного материала. Так введение в исходную полимерную матрицу дисперсных частиц алюминия и бронзы приводит к повышению механической прочности, увеличению теплопроводности, улучшению твердости, плотности и электретных свойств готового композитного материала. При выполнении всех экспериментов температура смолы и модификаторов поддерживалась постоянной и составляла 22±2 °С.

В данной работе в качестве объектов исследования были выбраны: эпоксидная смола ЭД-20 – это эпоксидно-диановая смола с не менее чем 20% эпоксидных групп в составе; пропиточный состав Анакрол 90w1 (производитель НПП «САТУРН», Россия), представляющий собой подвижную жидкость с высокой капиллярной текучестью на основе метакриловых мономеров и олигомеров; Бутакрил (производитель ЗАО «Велт», Россия) – синтетический полимер, относящийся к группе акриловых соединений. Также использовали системы ЭО и модификаторов разных составов.

Низковязкие эфиры метакриловой кислоты могут выступать в качестве активных разбавителей. Они содержат реакционноспособные группы, которые взаимодействуют с эпоксидными группами смолы, что приводит к изменению структуры композиции и позволяет разбавить смолу, изменяя её термодинамические свойства.

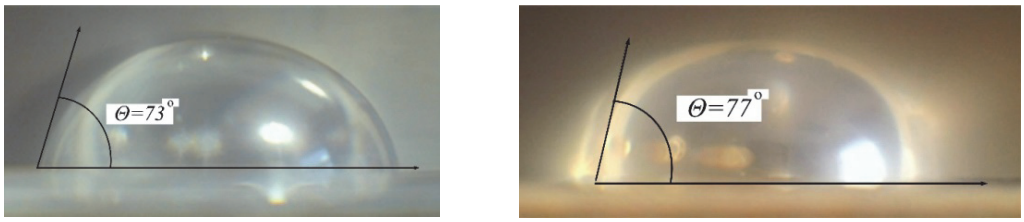
Результаты

Предварительное исследование по определению критического поверхностного натяжения алюминиевой и бронзовой пластин позволило установить, что зеркально отполированная поверхность данных материалов имеет близкие значения исследуемого показателя, а именно: критическое поверхностное натяжение алюминиевой пластины составило 42,25±2 мН/м, а для бронзовой пластины – 40,28±2 мН/м.

Таким образом, согласно термодинамической теории адгезии, наилучшее условие образуемого адгезионного контакта между поверхностью твердого тела и полимером будет обеспечено при $G_{кр.т.т.} \approx G_{ж.г.}$ (здесь $G_{кр.т.т.}$ – критическое поверхностное натяжение твердого тела, $G_{ж.г.}$ – поверхностное натяжение полимера).

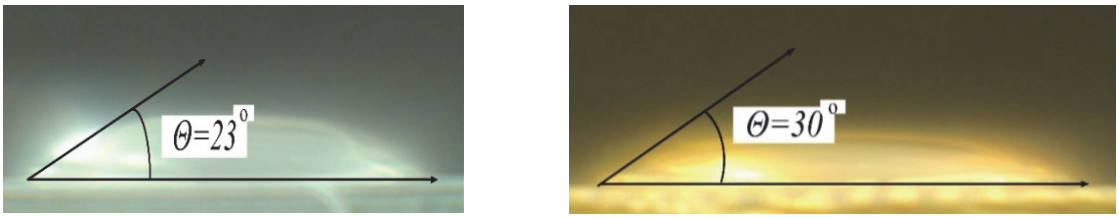
Исследование термодинамических характеристик модифицированной эпоксидной смолы показало, что введение модификаторов позволяет снизить значение исследуемого показателя с 72,8 до 37,0–38,3 мН/м. В данном случае можно предположить, что расхождение между критическим поверхностным натяжением $G_{кр.т.т.}$ и поверхностным натяжением

Gж.г. в пределах 5,5 – 10,5 % будет способствовать образованию должного адгезионного контакта на границе раздела фаз «полимер – наполнитель». Данное предположение подтверждается результатами исследования краевых углов смачивания металлических пластин исходной и модифицированной эпоксидной смолой (рис. 1 и 2).



а *б*

Рис. 1. Краевой угол смачивания поверхности алюминиевой (*а*) и бронзовой (*б*) пластин немодифицированной смолой ЭД-20



а *б*

Рис. 2. Краевой угол смачивания поверхности алюминиевой (*а*) и бронзовой (*б*) пластин модифицированной смолой ЭД-20

Как показано на рисунках, угол смачивания немодифицированной смолы составляет 73° и 77°, тогда как модифицированной смолы – 23° и 30°, для алюминия и бронзы соответственно.

При этом следует отметить, что введение модификатора в эпоксидную смолы ЭД-20 значительно снижает ее динамическую вязкость. Так исходная смола имеет вязкость 13328 мПа·с, а модифицированная – от 41,208 до 85,848 мПа·с в зависимости от типа модификатора.

Заключение

В результате работы получены значения вязкости, поверхностного натяжения и краевого угла смачивания для эпоксидного олигомера, модифицированного эфирами акриловой кислоты. Проведенное исследование позволяет регулировать составы эпоксидных связующих, их технологические свойства и параметры пропитки дисперсных металлических наполнителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

6. Иржак, В. И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей / В. И. Иржак. – Москва : Российская академия наук, 2022. – 290 с. – ISBN 978-5-907366-90-9. – EDN WQPCDG.

7. Симонов-Емельянов, И. Д. Теоретические основы, модели и расчеты составов дисперсно-наполненных полимеров с разными типами структур и свойствами / И. Д. Симонов-Емельянов, К. И. Харламова // Российский химический журнал. – 2024. – Т. 68, № 1. – С. 58-68. – DOI 10.6060/rcj.2024681.11. – EDN WATGYI.

8. Разработка композиционных материалов с пониженной горючестью на основе эпоксидных смол и наноразмерных органо-неорганических отвердителей / Отчет о НИР № 22-43-02056. Российский научный фонд. 2023. – EDN PQRMSQ.

9. Патент № 2760687 C2 Российская Федерация, МПК C08G 59/50, C08G 59/32, C08L 63/00. Системы эпоксидных смол для композитов : № 2019143626 : заявл. 05.06.2018 : опубл. 29.11.2021 / Л. С. Корли, У. П. Убрих, Д. У. Чунг [и др.] ; заявитель ХЕКСИОН ИНК.. – EDN WRTWFO.

10. Прокопова, Л. А. О стабильности технологических свойств эпоксидно-диановых смол после окончания гарантийного срока годности / Л. А. Прокопова, Е. Ю. Головина // Труды ВИАМ. – 2019. – № 1(73). – С. 13-20. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-1-13-20. – EDN YVLUGD.

УДК 544.478
Пухов Алексей Александрович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Puhov Alexey Alexandrovich, Graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Ткачёва Юлия Ильинична, канд. техн. наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Tkacheva Julia Ilyinichna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ КОНДУКТОМЕТРИИ
ON THE POSSIBILITY OF ELECTRIC FIELD INTENCITY MEASURMENT BY THE MEANS OF CONDUCTOMETRY APPROACHE

Аннотация. В данной статье рассмотрена проблема сложности измерения напряжённости электрического поля в условиях электрических явлений, протекающих в атмосфере Земли. Показано, что наличие особых свойств, таких как малость значений напряжённостей, малая скорость динамики целевой величины, изоляционные свойства атмосферы, накладывают существенные ограничения на средства измерения, в связи с чем для их преодоления предложен новый подход, связанный с влиянием электрического поля на распределение ионов в жидких средах с ионным типом проводимости, фиксируемого через измерение проводимости среды методами кондуктометрии. В ходе эксперимента продемонстрирована принципиальная работоспособность способа и сделаны выводы о дальнейших перспективах его развития.
Abstract. This article examines the complexity of measuring electric field strength under conditions of electrical phenomena occurring in the Earth's atmosphere. It is shown that special properties, such as small field strengths, the slow rate of change of the target value, and the insulating properties of the atmosphere, impose significant limitations on measurement instruments. Therefore, to overcome these limitations, a new approach is proposed based on the influence of the electric field on the distribution of ions in liquid media with ionic conductivity, as measured by conductometry. The experiment demonstrated the fundamental viability of the method, and conclusions are drawn regarding its future development prospects.
Ключевые слова: измерение электростатического поля, электрическое поле атмосферы, методы кондуктометрии
Key words: electrostatic field measurement, atmospheric electric field, conductometry methods

Введение

Метрологическое обеспечение электрических величин следует считать одной из наиболее развитых и совершенных областей измерительной техники. Развитие электроники и её компонентов, открытие особых физических явлений, такие как, например, эффект Джозефсона, на данный момент позволили развить инструментарий, позволяющий фиксировать отдельные физические величины с высочайшей точностью, скоростью и феноменальной малостью динамики [1]. Однако, следует выделить одну электрическую величину, которая в своей косвенности предъявляет особые требования к измерительному оборудованию, от чего, следует считать, представляет существенную сложность в своём метрологическом обеспечении.

Такой величиной является напряжённость электрического поля, а более узко, так как существуют отдельные ситуации, где её измерение сравнительно легко осуществимо, напряжённость электрического поля в слабопроводящей, например газовой среде, сопровождающуюся как малостью самих значений (порядка 100 В/м и менее), а также малой динамикой их изменения. В качестве примера такого электрического поля можно считать естественное электрическое поле Земли.

С другой стороны, активный мониторинг состояния электрического поля атмосферы, как считается [2], может быть использован для предсказания изменения погоды, возникновения аномальных погодных явлений, что может быть использовано если и не в качестве единственного источника информации, но как дополняющий к уже существующим информационным источникам для метеорологических расчётов.

В связи с этим в данной работе представлены начальные попытки создания устройства для измерения напряжённости электрического поля, адаптированного к условиям поля атмосферы, реализуемые за счёт методов электрохимии.

Основная часть

Известно множество решений, использующих в своей основе явление электростатической индукции для определения значения напряжённости внешнего (источник поля расположен за пределами измерительного устройства) электрического поля.

Так, например, в решении [3] предложен подход с применением подвижного зонда, при периодическом движении которого из и в область, экранированную от внешнего электрического поля, специальным измерительным устройством фиксируется наводимый на него электрический потенциал, что используется для определения напряжённости электрического поля через известное значение электрической ёмкости зонда. Очевидным недостатком данного решения следует считать необходимость применения подвижных компонентов в системе, что снижает её надёжность и долговечность эксплуатации прибора.

В [4] был предложен оптический элемент, в результате поляризации под действием внешнего электрического поля которого в системе на основе волоконно-оптических фазовых поляриметрических датчиков возникает разность фаз, по значению которой определяется значение напряженности внешнего электрического поля в виду её пропорциональности его напряжённости. Недостатком такого подхода следует считать сложность и сравнительно высокую стоимость системы измерения на его основе, предусматривающую достаточно тонкую настройку оборудования, чувствительную к изменяющимся параметрам окружающей среды.

Хорошим примером можно считать [5], в котором предложено определять значение напряжённости внешнего поля путём измерения сдвига фазы сигнала в полосковой линии передачи, из-за изменяющейся под действием внешнего электрического поля вследствие поляризации электрической проницаемости, диэлектрика. Однако, недостатком такого подхода является достаточно малая точность измерений в случае слабых электрических полей (десятки, сотни вольт на метр).

По итогу можно сказать, что несмотря на значительное количество разработанных подходов к измерению напряжённости электрического поля, их применение в условиях атмосферного электричества сталкивается со значительным количеством ограничивающих факторов, связанных с необходимостью удовлетворять требованиям к измерению напряжённости электрического поля сравнительно малого значения, при малой скорости его изменения со временем, а также в условиях практически непроводящей среды.

Для преодоления указанных недостатков был предложен новый подход, схематическое изображение измерительной системы для которого представлено на рис. 1.

При внесении системы в область действия внешнего электрического поля (показано на рис. 1 стрелкой, поле однородно) в проводящей среде 3 с ионным типом проводимости начинается движение заряженных частиц (ионов) в соответствии с направлением действующих на них электрических сил. В условиях рисунка 1 отрицательно заряженные ионы двигаются по направлению электрического поля вверх в плоскости рисунка 1, а положительно заряженные ионы – вниз. В результате этого после помещения системы во внешнее электрическое поле концентрация ионов в областях, где размещаются электроды для измерения проводимости (2 рис. 1) как в верхней части диэлектрического сосуда, так и в нижней увеличиваются по отношению к равновесной концентрации без приложенного электрического поля. Из-за увеличения концентрации ионов в упомянутых областях сосуда проводимость заполняющей его среды растёт. При этом, конкретное значение этого прироста находятся в взаимосвязи со значением величины напряжённости внешнего электрического поля. В результате

этого, измеряя проводимость среды с помощью подключённых к электродам (2 на рис. 1) с помощью соединительных проводов (4 на рис. 1) кондуктометров (5 на рис. 1), путём сравнения со значением проводимости среды при отсутствии внешнего электрического поля (в том числе из внутренней памяти кондуктометра), возможно определение значения напряжённости внешнего поля.

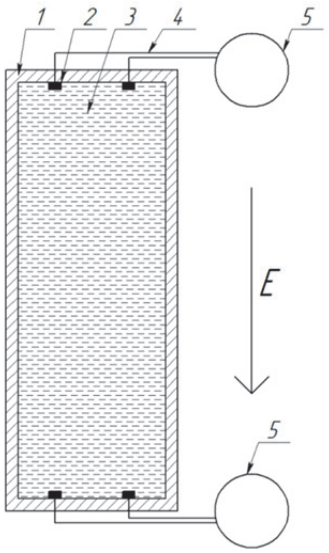


Рис. 1. Схематическое изображение предлагаемого подхода: 1 – замкнутый диэлектрический сосуд цилиндрической формы (вариант формы, показано в разрезе); 2 – электроды для измерения проводимости;3 – среда с ионной проводимостью; 4 – соединительный провода; 5 – устройства-измерители проводимости среды (кондуктометры)

Данный подход позволяет осуществлять непрерывное изменение напряжённости электростатического поля при отсутствии подвижных компонентов при сравнительной простоте установки за счёт широкого диапазона измеряемых с помощью известных кондуктометров значений проводимости среды, осуществляемых при этом, с технически легко достижимой высокой точностью.

Направление внешнего электрического поля для большей определённости показано стрелкой.

Следует отметить, что возможен и иной, частный, вариант реализации подхода с размещением кондуктометрической пары в центре сосуда, а не двух по его крайним точкам. В этом случае конструкция дополнительно упрощается, а измерение напряжённости электрического поля осуществляется через замер уменьшения проводимости среды в области расположения электродов кондуктометра при внесение измерительного устройства в область действия внешнего электрического поля.

В качестве среды с ионным типом проводимости для реализации предложенного подхода следует использовать вещества, которые при ожидаемых условиях эксплуатации обладают чрезвычайно низкой собственной проводимостью, а достижение необходимой проводимости осуществлять за счёт добавления в эту среду примесей. Это условие необходимо для снижения вклада собственной проводимости среды в изменение измеряемой проводимости при появлении электрического поля некоторой напряжённости, например, за счёт самоионизации при ненулевой температуре по механизму тепловой диссоциации.

Для оценки работоспособности способа был проведён эксперимент, в котором с помощью повышающего трансформатора создавали искусственное равномерное электростатическое поле напряжённостью 30 кВ/м, в качестве тестового. Для создания измерительного устройства в качестве сосуда была использована труба из оргстекла длиной 150 мм и внешним диаметром 45 мм с толщиной стенки 3 мм, заполненная диметилсульфоксидом марки «ХЧ», а в качестве устройства измерения электрической проводимости среды использовали кондуктометр CCT-3320V с температурной компенсацией. Расположение измерительных электродов кондуктометра было центральным по отношению к торцевым сторонам трубы. При внесении измерительного устройства в область действия электрического поля фиксировали изменение показаний проводимости среды с 6,94 мкСм до 6,82 мкСм, что подтверждает работоспособность предложенного подхода.

Заключение

Таким образом, в данной работе показана принципиальная возможность использования влияния электрического поля на распределение ионов в жидкости с ионным типом проводимости для определения значения величины напряжённости этого поля. Результаты проведённых экспериментов продемонстрировали работоспособность способа, однако, требуются дальнейшие изыскания в части поиска вещества среды, которое могло бы повысить чувствительность предложенного подхода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Noras M. A. Electric Field Measurement Techniques And Their Practical Applications //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2702. – №. 1. – С. 012016.
2. Wu J. The possibility of rainfall nowcasting using atmospheric electric field / J. Wu, Z. Zou, Y. Li, F. Xie // Atmospheric Research. — 2024. — Vol. 298. — Art. 107118. — DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107118.
3. Патент № 2647225 C1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Измеритель напряженности электрического поля вибрационного типа : № 2017103072 : заявл. 30.01.2017 : опубл. 14.03.2018 / А. Н. Филиппов, Н. М. Пушкин, К. В. Лакшин ; заявитель Акционерное общество "Научно-производственное объединение измерительной техники". – EDN FFLKEN.
4. Патент № 2539130 C1 Российская Федерация, МПК G01R 31/00, G01R 29/12. волоконно-оптическое устройство для измерения напряженности электрического поля : № 2013136095/28 : заявл. 31.07.2013 : опубл. 10.01.2015 / И. К. Мешковский, В. Е. Стригалев, С. М. Аксарин ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (Университет ИТМО). – EDN WACXZG.
5. Патент № 2626065 C Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля : № 2015100502 : заявл. 12.01.2015 : опубл. 21.07.2017 / Б. А. Беляев, И. Н. Злыгостев, А. А. Лексиков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН (ИНГГ СО РАН). – EDN LQPKOS.

УДК 621.7.01
Рубан Екатерина Андреевна, инженер Филиала ПАО «ОАК»-КнААЗ им. Ю.А.Гагарина
Ruban Ekaterina Andreevna, engineer at the Branch of PJSC UAC-KnAAZ named after Yu. A. Gagarin
Попкова Алёна Алексеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Popkova Alena Alekseevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Щелкунов Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Schelkunov Evgeniy Borisovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ, В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ОБРАБОТКИ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ
STRESS-STRAIN ANALYSIS OF A 3D-PRINTED WORKPIECE DURING ITS MILLING PROCESSING

Аннотация. В работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки детали «Кронштейн», полученной методом 3D-печати, в процессе ее механической обработки. Для выполнения расчетов и визуализации результатов использована система «T-FLEX Анализ», являющаяся средой конечно-элементных расчётов, интегрированной с T-FLEX CAD. Результаты проведенных симуляций показывают, что приложенные нагрузки при фрезеровании не вызывают заметных напряжений в заготовке.
Abstract. This study analyzed the stress-strain state of a 3D-printed "Bracket" blank during machining. The T-FLEX Analysis system, a finite element analysis environment integrated with T-FLEX CAD, was used to perform calculations and visualize the results. The simulation results show that the applied loads during milling do not cause significant stress in the blank.
Ключевые слова: 3D-печать, напряженно-деформированное состояние, заготовка, селективное лазерное плавление, поддержка.
Key words: 3D printing, stress-strain state, workpiece, selective laser melting, support.

Введение

В настоящее время все большее применение в машиностроительном производстве получают аддитивные методы производства изделий из металлических сплавов, такие как селективное лазерное плавление (SLM), электронно-лучевая плавка (EBM) и прямое лазерное спекание металлов (DMLS), селективное лазерное спекание (SLS) [1, 2, 3]. Каждый из методов имеет как преимущества перед другими, так и недостатки. В работе [4] обоснован выбор метода SLM для изготовления деталей из алюминиевых сплавов. Однако построенные данным методом изделием, как правило требуют последующей механической обработки.

В данной работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки детали «Кронштейн», полученной методом 3D-печати, в процессе ее обработки с наибольшими расчетными усилиями резания.

Устройство заготовки детали

На рис. 1 показана 3D-модель детали кронштейн. «Кронштейн» изготавливается из алюминиевого сплава RS-300 (аналог сплава АК4-1ч) методом селективного лазерного плавления SLM с последующей механической обработкой ответственных элементов детали – центральное отверстие и отверстия в полках. Одной из особенностей создания изделий методом SLM является необходимость использования поддержек (искусственных баз) для нависающих элементов, таких как полки, стенки внутренних полостей и др. Поддержки изготавливаются заедино с создаваемым изделием [1, 5]. На рис. 2, а показана 3D-модель заготовки детали «Кронштейн» с поддержками 1. После выемки построенного изделия из камеры построения 3D-принтера поддержки срезают. При этом на поверхности изделия остаются выступы (рис. 2, б), которые удаляются при окончательной обработке. Наличие выступов на обрабатываемой поверхности сказывается на динамике процесса резания. Удары, сопровождающие врезания лезвий инструмента в выступы, и последующие за ними выходы из контакта с заготовкой после срезания выступов могут негативно сказываться на точности и качестве обработки, которые косвенно можно оценить по напряженно-деформированному состоянию заготовки в процессе обработки.

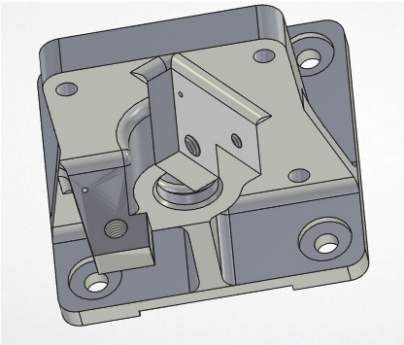


Рис. 1. Деталь «Кронштейн»

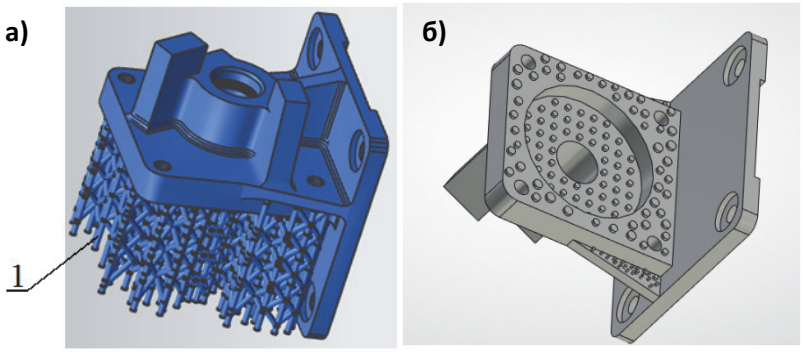


Рис. 2. 3D-модель заготовки со сконструированными поддержками для 3D-печати (а) и со срезанными поддержками (б); 1 – поддержки

Для оценки состояния заготовки в процессе обработки поверхностей, имеющих остатки элементов поддержек, выполнен анализ ее напряженно-деформированного состояния.

Методика анализа напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе обработки

Анализ проводился на электронной трехмерной модели заготовки детали «Кронштейн» путем симуляции нагрузки, действующей на заготовку в процессе обработки.

В качестве инструмента исследования выбрана система «T-FLEX Анализ», являющаяся средой конечно-элементных расчётов, интегрированной с T-FLEX CAD.

При анализе эмитировались следующие условия. Конструкция заготовки обеспечивает минимум переустановов ее в процессе обработки. Обработка поверхностей с остатками поддержек с целью придания им окончательной формы размеров и качества выполняется фрезерованием на станке с ЧПУ. Используется трехзубая сборная концевая фреза модели

A2-16-030-050-105-030 диаметром 16 мм. Параметры режима резания: частота вращения шпинделя 4180 мин$^{-1}$; подача 1558 мм/мин; ширина фрезерования 12,8 мм; глубина резания 1,74 мм; крутящий момент 1,78 Н*м.

Подготовка 3D-модели к исследованию выполнялась в следующей последовательности:

1) Генерирование конечно-элементной модели детали в модуле «Симуляция» системы T-FLEX CAD.

2) Выбор типа анализа в модуле «Расширенная симуляция». Выбран тип анализа – Структурный.

4) Наложение на поверхность модели 3D-тетраэдральной сетки.

5) Задание нагрузок и граничных условий. На рис. 4 показана схема закрепления заготовки (нижняя плоскость основания) и приложения рабочей нагрузки, возникающей в процессе механической обработки поверхностей.

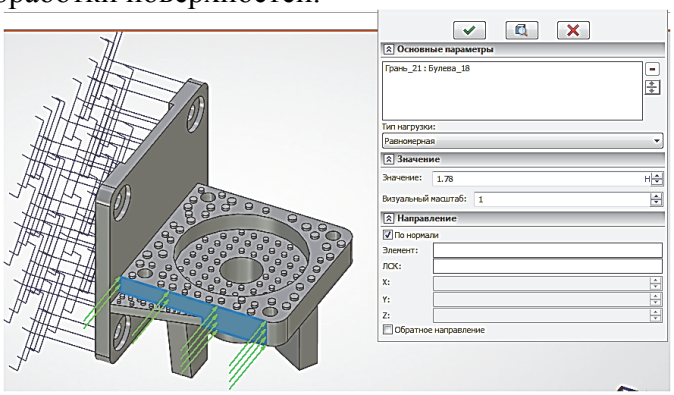


Рис. 4. Схема приложения нагрузки

Для визуализации результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния представлялись в виде соответствующих эпюр.

Результаты исследования

На рис. 5 представлены эпюры напряжений и деформации, возникающих при обработке поверхностей заготовки, имеющих остатки поддержек.

Результаты проведенных симуляций показывают, что приложенные нагрузки при фрезеровании не вызывают заметных напряжений в заготовке. Наибольшей деформации подвергаются боковые ребра жесткости, однако расчетные значения деформации не являются критическими и не сказываются на точности обработки заготовки.

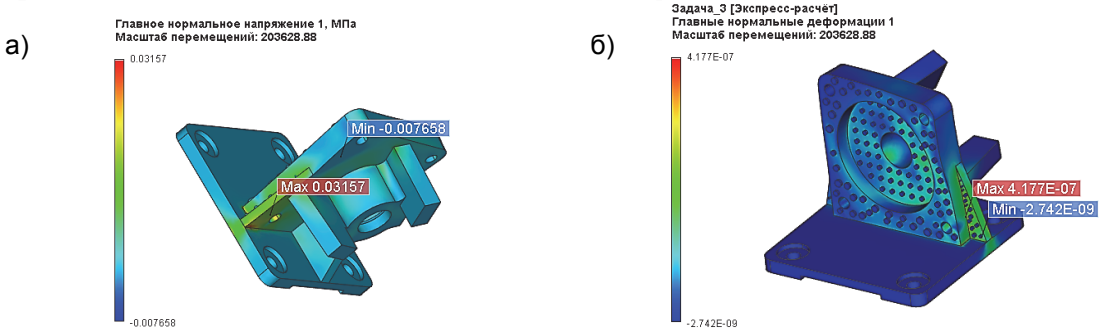


Рис. 5. Эпюры напряжений (а) и деформации (б)

Заключение

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки детали «Кронштейн», полученной методом 3D-печати, в процессе обработки ее поверхностей после удаления поддержек. Для выполнения расчетов и визуализации результатов использована система «T-FLEX Анализ», являющаяся средой конечно-элементных расчётов, интегрированной с T-FLEX CAD. Результаты проведенных симуляций показывают, что приложенные нагрузки при фрезеровании не вызывают заметных напряжений в заготовке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Немолякина, Е. А. Аддитивные технологии в авиастроении / Е. А. Немолякина, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 78-80. – EDN JYDJYG.

2. Акулина, А. А. Анализ методов 3D-печати применительно к изготовлению детали качалка / А. А. Акулина, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 4-6. – EDN CSNSUT.

3. Лыгин, Е. В. Внедрение аддитивных технологий для изготовления деталей авиационной техники / Е. В. Лыгин, А. И. Пронин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 55-57. – EDN TBWAYG.

4. Рубан, Е. А. Повышение эффективности изготовления деталей, объединяющего традиционные и аддитивные технологии / Е. А. Рубан, А. А. Акулина, Е. Б. Щелкунов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 82-85. – EDN WYMNQQ.

5. Повышение эффективности изготовления деталей в мелкосерийном производстве за счет использования аддитивных технологий / Е. Б. Щелкунов, М. Е. Щелкунова, А. А. Акулина, Е. А. Рубан // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2026. – № 2(791). – С. 53-60. – EDN HBJCIY.

УДК 621.791.14;621.9

Рыштаков Никита Евгеньевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Ryshtakov Nikita Evgenievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Григорьев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Grigorev Vladimir Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor Department of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА ПОРООБРАЗОВАНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23
ANALYSIS OF THE POSSIBILITY INFLUENCE OF MACHINING MODES OF WELDED EDGES ON POROSITY AND HYDROGEN CONTENT IN ELECTRON BEAM WELDING OF TITANIUM ALLOY VT23

Аннотация. В работе исследовано влияние режимов фрезерования (скорость резания 20-50 м/мин) при подготовке стыкуемых кромок из титанового сплава ВТ23 на шероховатость поверхности, пористость сварных швов и содержание водорода после электронно-лучевой сварки. Установлено, что минимальная шероховатость достигается при скорости резания 40 м/мин (фреза диаметром 16 мм, Ra = 0,360 мкм) и 50 м/мин (фреза диаметром 32 мм, Ra = 0,384 мкм). При этих режимах количество пор в сварных швах не превышает 6, а содержание водорода в шве составляет в среднем 0,0020-0,0030% (максимальные локальные значения в корне шва достигают 0,0060%), что значительно ниже допустимого предела 0,015% по ОСТ 1 90034-81. Повышение шероховатости до 0,478-0,923 мкм (скорость резания 45 м/мин) приводит к росту числа пор до 14, появлению цепочек пор и увеличению содержания водорода в шве (среднее до 0,0056%, в корне до 0,0076%). Показана прямая корреляция между шерохо-

ватостью поверхности кромок, пористостью и содержанием водорода. Рекомендуемыми режимами фрезерования для подготовки кромок под электронно-лучевую сварку сплава ВТ23 являются скорости резания 40 и 50 м/мин, обеспечивающие минимальное количество пор и пониженное содержание водорода.

Abstract. The effect of milling modes (cutting speed 20-50 m/min) during the preparation of joined edges made of VT23 titanium alloy on surface roughness, porosity of welds and hydrogen content after electron beam welding is investigated. It was found that the minimum roughness is achieved at a cutting speed of 40 m/min (milling cutter with a diameter of 16 mm, Ra = 0.360 microns) and 50 m/min (milling cutter with a diameter of 32 mm, Ra = 0.384 microns). Under these conditions, the number of pores in the welds does not exceed 6, and the hydrogen content in the seam averages 0.0020-0.0030% (the maximum local values at the root of the seam reach 0.0060%), which is significantly lower than the permissible limit of 0.015% according to OST 1 90034-81. An increase in roughness to 0.478-0.923 microns (cutting speed 45 m/min) leads to an increase in the number of pores to 14, the appearance of pore chains and an increase in the hydrogen content in the seam (average to 0.0056%, root to 0.0076%). A direct correlation is shown between the roughness of the edge surface, porosity, and hydrogen content. The recommended milling modes for preparing edges for electron beam welding of VT23 alloy are cutting speeds of 40 and 50 m/min, ensuring a minimum number of pores and a reduced hydrogen content.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановый сплав ВТ23, подготовка кромок, шероховатость, пористость, водород.

Key words: electron beam welding, titanium alloy VT23, edge preparation, roughness, porosity, hydrogen.

Введение

Титановые сплавы, в частности ВТ23, широко применяются в авиастроении благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Однако электронно-лучевая сварка (ЭЛС) таких сплавов часто сопровождается образованием пор в сварном шве, что снижает надежность конструкций [1, 2]. Одной из причин порообразования является наличие загрязнений и адсорбированных газов (в первую очередь водорода) на стыкуемых кромках [3].

Цель работы – установить рациональные режимы фрезерования стыкуемых кромок из сплава ВТ23, обеспечивающие минимальную шероховатость, снижение содержания водорода и уменьшение пористости сварных швов.

Режимы механической обработки и шероховатость поверхности

Образцы из сплава ВТ23 обрабатывались торцевыми фрезами: сборная диаметром 32 мм и монолитная диаметром 16 мм. Скорость резания варьировалась от 20 до 50 м/мин (табл. 1).

Таблица 1

Режимы механической обработки пластин из сплава ВТ23 и измеренные параметры шероховатости, а также показатель содержания водорода на сформированных буртиках

Номер режима	1	2	3	4	5	6
Сборная фреза диаметром 32 мм						
Скорость резания V, м/мин	25	30	35	40	45	50
Шероховатость Ra, мкм	1,702	1,412	0,865	0,933	0,923	0,384
Содержание водорода H, %	0,0015	0,0019	0,0017	0,0023	0,0024	0,0015
Монолитная фреза диаметром 16 мм						
Скорость резания V, м/мин	20	25	30	35	40	45
Шероховатость Ra, мкм	0,485	0,450	0,450	0,413	0,360	0,478
Содержание водорода H %,	0,0010	0,0018	0,0012	0,0020	0,0017	0,0020
Примечание. Согласно ОСТ 1 90034-81 содержание водорода в титановых сплавах должно быть не более 0,015%						

Минимальная шероховатость достигнута: для фрезы диаметром 16 мм при V = 40 м/мин (Ra = 0,360 мкм, режим 5), для фрезы диаметром 32 мм при V = 50 м/мин (Ra=0,384 мкм, режим 6). При режимах ($V_{рез}$ = 45 м/мин для обеих фрез) шероховатость возрастает до 0,478 мкм (фреза диаметром 16 мм) и 0,923 мкм (фреза диаметром 32 мм).

Исходя из полученных данных, в дальнейшем рассматривались образцы, разбитые на следующие группы: 16.5, 16.6 и 32.5, 32.6. Где первый номер диаметр фрезы, а второй режим резания.

Рентгенографический контроль и оценка содержания водорода в поперечном сечении сварных соединений после электронно-лучевой сварки

Выполнена электронно-лучевая сварка 2 темплетов по режиму: U = 60 кВ, Iсв = 390 мА, Vсв = 12 мм/с, вакуум $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.. При этом темплет фрезеровался на половину его протяженности по следующей схеме (рис. 1).

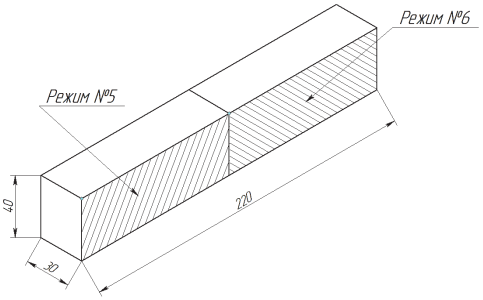


Рис. 1. Схема механической обработки темплета

Результаты рентгенографического контроля после проведения операции раскроя темплетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

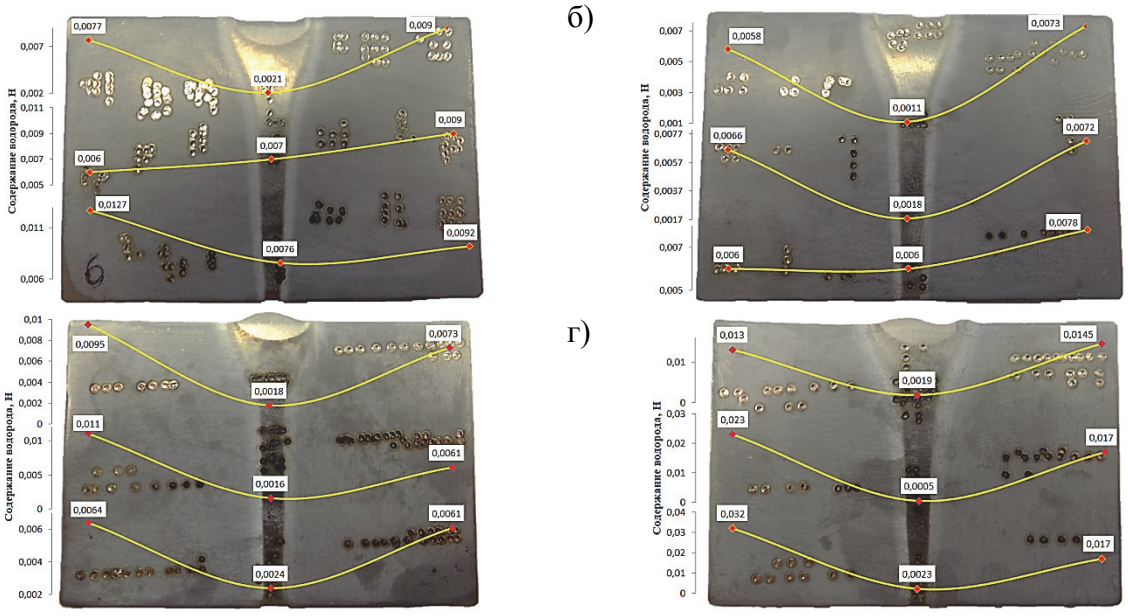
Шероховатость и пористость групп образцов в зависимости от режима резания

Группа образцов	Фреза, мм	V, м/мин	Ra, мкм	Суммарное количество пор	Максимальный диаметр поры, мм	Образцы без дефектов, шт
16.5	16	40	0,360	6	0,3	2 из 6
16.6	16	45	0,478	14	0,4	1 из 6
32.5	32	45	0,923	8	0,5	2 из 6
32.6	32	50	0,384	6	0,5	2 из 6

Минимальное количество пор (6) зафиксировано для групп 16.5 и 32.6, то есть при меньшей шероховатости. При увеличении Ra до 0,478-0,923 мкм количество пор возрастает до 14, появляются цепочки пор.

После ЭЛС изготовлены поперечные макрошлифы четырех образцов (рис. 2) для оценки параметра содержания водорода на установке ТИТАН-СЛ. Для каждого образца измеряли содержание Н в основном металле (слева и справа от шва) и в сварном шве.

а) б)



в) г)

Рис. 2. Поперечные макрошлифы сварных соединений с указанием мест измерения и среднего содержания водорода:
а – образец 16.6.6; б – образец 16.5.1; в - образец 32.6.6; г - образец 32.5.1

Проведенные исследования показали, что при высокопроизводительном фрезеровании титанового сплава ВТ23 увеличение шероховатости поверхности с 0,36 до 0,48 мкм приводит к росту среднего содержания водорода в сварном шве с 0,00297% до 0,00557%, а локальные пики водорода в корне шва достигают 0,0076%. Это прямо коррелирует с повышением пористости: у образца 16.6 (шероховатость 0,478 мкм, скорость резания 45 м/мин) зафиксировано 14 пор при максимальном диаметре 0,4 мм, тогда как при шероховатости 0,36-0,38 мкм (скорости 40 и 50 м/мин) количество пор не превышает 6. Все значения содержания водорода в швах (максимум 0,0076%) ниже допустимого предела 0,015% по ОСТ 1 90034-81, однако повышенная пористость при скорости резания 45 м/мин требует дополнительной отработки режимов. Наилучшие результаты по совокупности показателей достигнуты при скоростях 40 и 50 м/мин.

Заключение

На основе выполненных экспериментальных исследований влияния режимов механической обработки стыкуемых кромок титанового сплава ВТ23 на качество электронно-лучевой сварки установлено, что шероховатость поверхности после фрезерования существенно зависит от скорости резания и типа фрезы. Наименьшие значения Ra (0,360-0,384 мкм) получены при скоростях 40 м/мин (фреза диаметром 16 мм) и 50 м/мин (фреза диаметром 32 мм). Увеличение скорости до 45 м/мин для обеих фрез приводит к росту шероховатости до 0,478-0,923 мкм.

Установлена прямая зависимость между шероховатостью кромок и пористостью сварных швов. При Ra = 0,360-0,384 мкм количество пор минимально (не более 6 на темплет), поры единичны. При Ra = 0,478-0,923 мкм число пор возрастает до 14, наблюдаются цепочки пор, максимальный диаметр пор достигает 0,5 мм.

При шероховатости Ra = 0,360-0,384 мкм среднее содержание водорода (усиление, центр и корень шва) в сварном шве составляет 0,0020-0,0030%, при этом в корне шва возможно локальное повышение до 0,0060%. Максимальные значения водорода при этих режимах не превышают 0,0060%, что значительно ниже допустимого предела 0,015% по ОСТ 1 90034-81.

Рациональными режимами фрезерования для подготовки кромок под электронно-лучевую сварку сплава ВТ23 являются скорость резания 40 м/мин (фреза диаметром 16 мм) и 50 м/мин (фреза диаметром 32 мм). Эти режимы обеспечивают минимальную шероховатость, минимальную пористость и пониженное содержание водорода в сварном шве. Режим со скоростью резания 45 м/мин (для обеих фрез) приводит к ухудшению качества сварных соединений и требует дополнительной отработки технологических параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Муравьев, В. И. Влияние режимов механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением, при сборке титановых конструкций летательных аппаратов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 6(735). – С. 67-79. – DOI 10.18698/0536-1044-2021-6-67-79.

2. Пористость при сварке цветных металлов / В. В. Редчиц, В. А. Фролов, В. А. Казаков, В. И. Лукин. – Москва : Издательский центр "Технология машиностроения", 2002. – 448 с.

3. Лясоцкая, В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / В. С. Лясоцкая ; Лясоцкая В.С.; Под ред. Б.А. Колачева. – Москва : Экомет, 2003. – 351 с.

УДК 620.172.2
Салова Виктория Вячеславовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Salova Viktoria Vyacheslavovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Калугина Анна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kalugina Anna Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of "Chemistry and Materials Science", Komsomolsk-na-Amure State University

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЛА-ПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TENSILE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PLA PLASTIC SAMPLES PRODUCED BY 3D-PRINTING

Аннотация. В статье проводятся испытания на растяжение образцов в соответствие с ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», изготовленных на 3D- принтере Anycubic i3 Mega-S из ПЛА–пластика с соблюдением рекомендованных производителем режимов печати. На основании проведённых испытаний рассчитывались такие механические характеристики как относительное удлинение, прочность при разрыве, прочность при растяжении. Целью работы являлось установление зависимости между рекомендованными производителем параметрами печати, режима формирования структуры и механических характеристик образов.
Abstract. The article presents tensile tests of samples in accordance with GOST 11262-2017 "Plastics. Tensile testing method," manufactured on a 3D printer Anycubic i3 Mega-S from PLA plastic, adhering to the manufacturer's recommended printing modes. Based on the conducted tests, mechanical characteristics such as elongation at break, tensile strength, and yield strength were calculated. The objective of the work was to establish the relationship between the manufacturer's recommended printing parameters, the structure formation regime, and the mechanical characteristics of the samples.
Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, метод послойного наплавления, полилактид, механические характеристики, предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве, анизотропия свойств.
Key words: additive manufacturing, 3D printing, fused deposition modeling, polylactide, mechanical properties, tensile strength, elongation at break, anisotropy of properties.

Введение

ПЛА (PLA) – полилактид, один из самых неприхотливых и экологичных пластиков для 3D печати. Производится из возобновляемых ресурсов растительного происхождения, таких как кукуруза, картофель, сахарный тростник, поэтому является биологически безопасным и получил широкое применение в быту, медицине и пищевой промышленности. Изделия, напечатанные из PLA-пластика, обладают высокой прочностью и твёрдостью, в сочетании с высокой хрупкостью. Режимы печати изделия на 3D-принтере оказывают сильное влияние на механические характеристики [1, 2]. Известно влияние плотности и рисунка заполнения на прочностные характеристики образцов, поскольку печать происходит в горизонтальной или вертикальной плоскости [3].

Проведённые исследования направлены на изучение свойств образцов из PLA-пластика при рекомендованных производителем параметрах печати.

Материалы и методы

Экспериментальное исследование характеристик при растяжении выполняли с использованием плоских пропорциональных образцов материала тип 1А по ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Эскиз образца представлен на рис. 1.

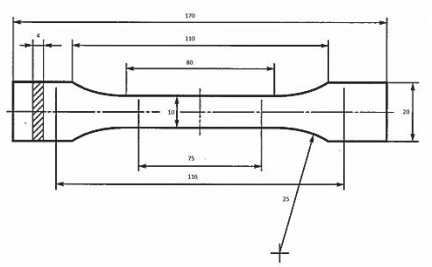


Рис. 1. Размеры пропорциональных плоских образцов тип 1А

Печать образцов осуществляли на плоскости, ориентация растра печати составляла $+45^0/-45^0$, плотность заполнения 100%. Подобный способ печати обеспечивает максимальную прочность образцов при растяжении [4]. Для печати образцов использовались материал PLA производителя «Polymaker», диаметром нити 1,75 мм, и 3D – принтер Anycubic i3 Mega-S, с диаметром сопла 0,4 мм.

Основные параметры печати 3D- принтера в соответствие с рекомендациями производителя были заданы следующие:

высота слоя, мм…… 0,2
толщина стенки, мм……. 1,2
толщина низ/верх, мм…… 1
плотность заполнения, мм…… 100
скорость печати, мм……... 40
t печати, ^{o}C…… 200
t смолы, ^{o}C……. 55

Испытания на растяжение образцов материала проводились на разрывной машине 3382 INSTRON (рис.2) с точностью измерения напряжений и деформаций 0,5 %. Скорость перемещения захватов разрывной машины составляла 1 мм/мин.

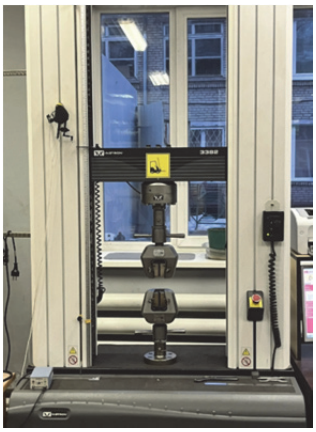


Рис. 2. Испытательная машина 3382 INSTRON

В соответствии с требованиями ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» испытанию было подвергнуто пять образцов (рис. 3).

1 2



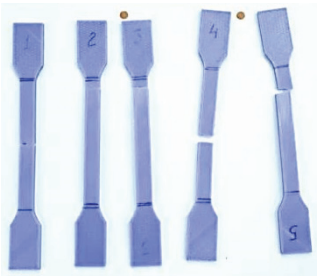


Рис. 3. Исследуемые образцы:
1 – до испытания на растяжение; 2 – после испытания на растяжение

Результаты испытаний

Все образцы до и после испытания были измерены. Измерения предоставлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства образцов

№ образца	$\sigma_{рм}$, МПа	$\sigma_{рр}$, МПа	δ, %
1	43,89	40,77	1,5
2	42,7	40,01	2,4
3	38,1	34,94	2,4
4	41,1	38,09	1,2
5	41,4	38,04	3,0

Относительное удлинение для каждого образца рассчитывалось по формуле:

$$\delta = \frac{l_к - l_0}{l_0} * 100\%, \quad (1)$$

где l_0 – начальная длина образца; $l_к$ – конечная длина образца.

Прочность при разрыве рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{рр} = \frac{F_{рр}}{A_0}, \quad (2)$$

где $F_{рр}$ – растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился; A_0 – первоначальное поперечное сечение образца.

Прочность при растяжении рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{рм} = \frac{F_{рм}}{A_0}, \quad (3)$$

где $F_{рм}$ – максимальная растягивающая нагрузка; A_0 – первоначальное поперечное сечение образца.

Обсуждение результатов

По результатам испытаний на растяжение было установлено, что наибольшее значение предела прочности при разрыве составило 43,89 МПа (образец 1), при минимальном значении 38,1 МПа (образец 3). Производитель приводит значение предела прочности при растяжении равное 39,3±0,5 МПа. За исключением образца 3, все образцы соответствуют заявленному производителем значению и даже смогли улучшить его.

Относительное удлинение по пяти образцам варьировалось в диапазоне от 1,2 до 3 %. Наименьшее значение относительного удлинения составило 1,2% и 1,5% у образцов 4 и 1 соответственно, а наибольшее значение относительного удлинения – 3% было получено на образце 5. По данным производителя значение относительного удлинения составляет 3,8 ± 0,2%, что не соответствует полученному значению в ходе механических испытаний. Пониженное значение показателя относительного удлинения может свидетельствовать о повышенной хрупкости материала образцов. Данное явление может быть связано как с режимом формирования растра печати, так и со свойствами исходной нити, а именно, показателем влажности.

В процессе проведения испытания было отмечено, что значительная доля пластической деформации образцов пришлась на участок кривой «напряжение-деформация» после прохождения предела прочности (рис. 4). Величина предела прочности при разрыве варьировалась в диапазоне от 34,94 до 40,77 МПа.

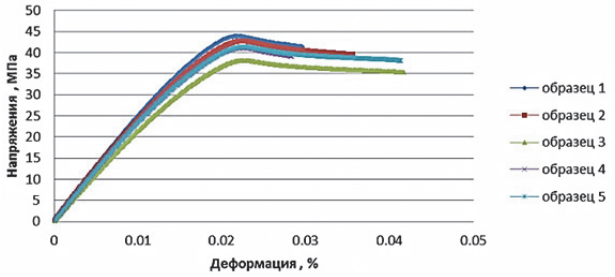


Рис. 4. Кривая «напряжение-деформация»

Заключение

На основании полученных экспериментальных данных по механическим свойствам можно сделать вывод о том, что изделия, изготовленные из PLA-пластика, в соответствии с рекомендациями производителя по режимам печати, при формировании растра печати $+45^0/-45^0$, с плотностью заполнения 100% обладают повышенными значениями предела прочности при разрыве, но пониженными значениями относительного удлинения, в сравнении с указанным производителем.

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кремянский, Ф. В. Исследование физико - механических свойств полилактида PLA используемого для создания 3D моделей / Ф. В. Кремянский, М. А. Белай // Развитие науки и техники: механизм выбора и реализации приоритетов : сборник статей Международной научно-практической конференции, Омск, 25 декабря 2017 года. Том Часть 3. – Омск: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2017. – С. 193-198. – EDN XZAXPH.
2. Михальченко, А. А. Влияние режимов 3D-печати термопластами на прочностные свойства изделий / А. А. Михальченко, А. Б. Невзорова, И. Б. Одарченко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2023. – № 1(92). – С. 31-40. – EDN LXKMQR.
3. Дальская, Г. Ю. Влияние технологических режимов 3d-печати на физико-механические свойства изделий из PLA и PETG / Г. Ю. Дальская, В. Вега // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023) : Сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Москва, 10–15 апреля 2023 года / Под редакцией А.Н. Юрасова. Том 1. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2023. – С. 309-318. – EDN MEOZON.
4. Шмелев, А. В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4(112). – DOI 10.18698/2308-6033-2021-4-2070. – EDN MNSGQO.

УДК 621.791.927.5

Семёнов Сергей Владимирович, аспирант, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Semenov Sergey Vladimirovich, Postgraduate student, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS

Голиков Николай Иннокентьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Golikov Nikolay Innokentyevich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS

ПОВЫШЕНИЕ УДАРНО-АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЁВ ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ МЕТОДОВ НАПЛАВКИ
IMPROVING IMPACT-ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF SURFACED LAYERS THROUGH THE USE OF PULSED ARC SURFACING METHODS

Аннотация. Целью работы является сравнительное исследование влияния режимов электродуговой наплавки (постоянный и модулированный ток) на химический состав, твердость, микроструктуру и ударно-абразивную износостойкость покрытий, сформированных отечественными наплавочными электродами марок WN H 6/60 и ОЗН-400М. Экспериментально установлено, что применение импульсно-дуговых методов позволяет снизить выгорание легирующих элементов (C, Si, Mn, Cr, V) по сравнению с наплавкой на постоянном токе. Для

электродов WN H 6/60 модулированный ток обеспечивает повышение твердости на 11% и снижение массового износа на 18%, а для электродов ОЗН-400М – снижение износа на 12% при незначительном уменьшении твердости. Микроструктурный анализ показал, что использование модулированного тока способствует формированию более однородной структуры с оптимальным сочетанием мартенсита, остаточного аустенита и карбидных фаз. Полученные результаты подтверждают перспективность применения импульсно-дуговой наплавки для повышения долговечности деталей горнодобывающей техники, эксплуатируемой в условиях ударно-абразивного износа.

Abstract. The aim of this work is a comparative study of the influence of electric arc surfacing modes (direct and modulated current) on the chemical composition, hardness, microstructure, and impact-abrasive wear resistance of coatings formed using domestic filler electrodes of the WN N 6/60 and OZN-400M grades. It was experimentally established that the use of pulsed arc methods reduces the burn-off of alloying elements (C, Si, Mn, Cr, V) compared to direct current surfacing. For WN N 6/60 electrodes, modulated current provides an 11% increase in hardness and an 18% reduction in mass wear loss, while for OZN-400M electrodes, it ensures a 12% wear reduction with a slight decrease in hardness. Microstructural analysis showed that the use of modulated current contributes to the formation of a more homogeneous structure with an optimal combination of martensite, retained austenite, and carbide phases. The obtained results confirm the potential of pulsed arc surfacing for improving the durability of mining equipment components operating under impact-abrasive wear conditions.

Ключевые слова: наплавка, износ, горнодобывающая техника, импульсная сварка, твердость.
Key words: surfacing, wear, mining equipment, pulsed welding, hardness.

Введение

Эксплуатация горнодобывающей техники в арктических условиях сопровождается интенсивным ударно-абразивным износом рабочих органов вследствие воздействия мерзлых грунтов, низких температур и знакопеременных нагрузок [1–4]. Поэтому для эффективного решения указанной проблемы ускоренного износа и повышения ресурса деталей, работающих в экстремальных условиях Арктики, необходимы не только прикладные разработки, но и фундаментальные исследования износостойкости, структуры и свойств наплавляемых слоев, формируемых перспективными технологиями с применением новых наплавочных материалов. Одним из перспективных методов является электродуговая наплавка с использованием импульсно-дуговых методов [5], позволяющая управлять термическими циклами и формировать покрытия с улучшенными свойствами.

Основная часть

Проведено сравнительное изучение свойств упрочняющих покрытий, нанесённых ручной дуговой наплавкой в режимах постоянного (НП) и модулированного тока (НМ) с использованием электродов марок «WN H 6/60» и «ОЗН-400М». Электроды WN H 6/60 предназначены для упрочняющей наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного износа с умеренными ударными нагрузками. Электроды ОЗН-400М широко применяются в производственных предприятиях, в том числе в АО «Алмазы Анабара», для наплавки деталей из углеродистых и низколегированных сталей, работающих в условиях трения и ударных нагрузок.

Наплавка выполнялась на пластины из стали Ст3 (150×150×20 мм) в нижнем положении с формированием трёхслойной пирамиды. Энергетические параметры наплавки (сила тока, длительность импульса и паузы) выбирались согласно рекомендациям производителя. Получено четыре наплавленные пробы: НП_WN_H_6/60, НМ_WN_H_6/60, НП_ОЗН-400М, НМ_ОЗН-400М. Для каждой пробы определены химический состав (оптико-эмиссионная спектрометрия, ГОСТ 18895-97), твёрдость по Виккерсу (нагрузка 150 кгс, ГОСТ 2999-75) и проведены испытания на ударно-абразивный износ на специализированном стенде (рис. 1), моделирующем циклическое воздействие (удар, скольжение, царапание). Критерием износостойкости служила массовая потеря образцов после 30 минут испытаний.



Рис. 1. Схема испытательного стенда на УАИ

Химический анализ показал (табл. 1), что наплавка модулированным током способствует снижению выгорания легирующих элементов. Для электродов WN H 6/60 в режиме НМ содержание углерода увеличилось на 16 %, хрома – на 4 %, ванадия – на 6 % по сравнению с НП. Для электродов ОЗН-400М в режиме НМ зафиксирован рост содержания углерода (20 %), кремния (10,5 %) и марганца (10,4 %).

Таблица 1

Химический состав наплавленного слоя электродов «WN H 6/60» и «ОЗН-400М» (содержание элементов, % мас.)

Материал	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	Cu
НП_WN_H_6/60	0,25	0,79	0,52	6,92	0,10	0,65	0,78	
НМ_WN_H_6/60	0,29	0,80	0,53	7,2	0,10	0,69	0,73	
НП_ОЗН-400М	0,10	1,72	3,26	0,10	0,12			0,18
НМ_ОЗН-400М	0,12	1,9	3,6	0,10	0,12			0,17

Измерение твёрдости (табл. 2) выявило разнонаправленное влияние режимов наплавки. Для электродов WN H 6/60 применение НМ повысило среднюю твёрдость с 603 HV до 668 HV (+11 %). Для электродов ОЗН-400М твёрдость в режиме НМ незначительно снизилась (с 372 HV до 366 HV, –1,6 %).

Таблица 2

Результаты измерения твёрдости по Виккерсу (HV)

НП WN H-6/60	НМ WN H-6/60	НП ОЗН-400М	НМ ОЗН-400М
590,58	658,53	373,83	367,74
617,31	650,59	377,97	353,46
601,62	695,25	363,10	375,89
Ср. знач.: 603,17	Ср. знач.: 668,12	Ср. знач.: 371,63	Ср. знач.: 365,70

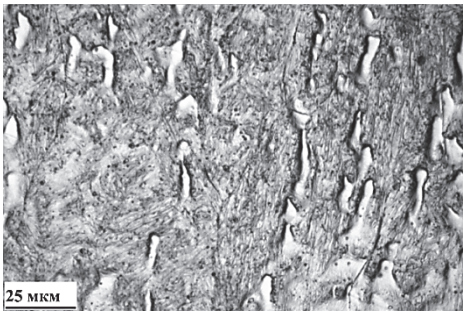
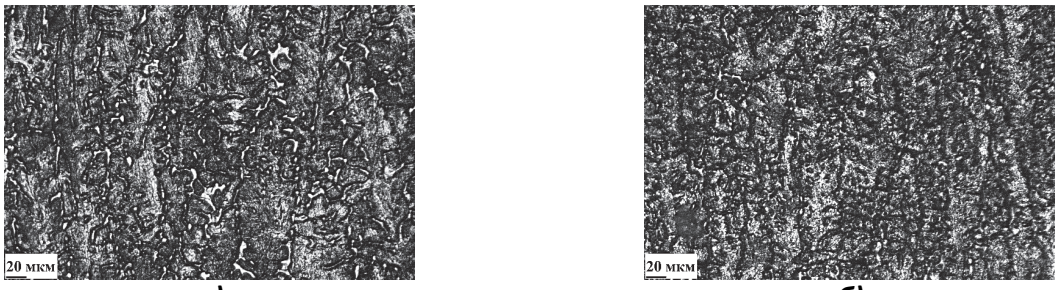


Рис. 2. Мартенсит внутри дендритов и остаточный аустенит в междендритных прослойках при НМ

Испытания на ударно-абразивный износ показали (табл. 3), что использование модулированного тока снижает массовый износ для обоих материалов. Для WN H 6/60 износ уменьшился с 2,8 мг до 2,3 мг (–18 %), для ОЗН-400М – с 17,9 мг до 15,8 мг (–12 %). Микроструктурный анализ показал, что при наплавке электродами WN H 6/60 формируется аустенитно-мартенситная структура с карбидами, характерная для износостойких покрытий (рис. 2).

Применение НМ способствует уменьшению ширины дендритных столбцов и более равномерному распределению структурных составляющих (рис. 3). В случае электродов ОЗН-400М формируется литая микроструктура с ферритно-карбидной смесью и перлитными составляющими (троостит, сорбит). Различия в структуре обусловлены разным содержанием карбидообразующих элементов и особенностями термических циклов при наплавке.

Таким образом, комплексное применение наплавочного материала WN H 6/60 и режима модулированного тока обеспечивает формирование структуры, сочетающей твёрдую карбидную фазу и вязкую металлическую матрицу (мартенсит + метастабильный аустенит), что позволяет эффективно сопротивляться ударно-абразивному воздействию.



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктура наплавленного слоя электродами WN H 6/60: а – НП; б – НМ

Таблица 3

Результаты испытаний на ударно-абразивный износ

Материал	№ обр.	Начальная масса (m_0), г	Масса после исп. (m_1), г	Износ массы (Δm), г	Среднее значение износа массы, мг
НМ_WN_H_6/60	1.1	11,7575	11,7550	0,0025	2,3
	1.2	12,1364	12,1346	0,0018	
	1.3	12,3250	12,3235	0,0015	
НП_WN_H_6/60	2.1	12,0871	12,0848	0,0023	2,8
	2.2	12,0946	12,0922	0,0024	
	2.3	12,5872	12,5836	0,0036	
НМ_ОЗН-400М	3.1	12,9291	12,9120	0,0171	15,8
	3.2	13,8602	12,8450	0,0152	
	3.3	13,0636	13,0484	0,0152	
НП_ОЗН-400М	4.1	12,6572	12,6400	0,0172	17,9
	4.2	12,5785	12,5571	0,0214	
	4.3	12,6210	12,6060	0,0150	

Выводы

Наплавка модулированным током обеспечивает меньшее выгорание легирующих элементов (C, Si, Mn, Cr, V) по сравнению с наплавкой на постоянном токе, что позволяет целенаправленно корректировать химический состав и свойства покрытий.

Влияние режима наплавки на твёрдость зависит от типа электродного материала. Для карбидообразующего сплава WN H 6/60 модулированный ток повышает твёрдость на 11 %, для сплава ОЗН-400М, упрочняемого преимущественно за счёт перлитного превращения, наблюдается незначительное снижение твёрдости (1,6 %).

Использование импульсно-дуговых методов достоверно повышает сопротивление ударно-абразивному износу: на 18 % для WN H 6/60 и на 12 % для ОЗН-400М.

Разработанная методика экспериментальных исследований позволяет комплексно оценивать термические циклы, энергетические параметры, износостойкость, структуру и свойства наплавленных слоёв применительно к горнодобывающей технике Севера.

Благодарности.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта FWRS-2024-0034 и с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедев, Д. И., Федоров, М. В., Голиков, Н. И. и др. Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A // Наука и образование. – 2016. – № 2(82). – С. 81–87. – EDN WHAZAZ.

2. Petrica, M., Katsich, C., Badisch, E., et al. Study of abrasive wear phenomena in dry and slurry 3-body conditions // Tribology International. – 2013. – № 64. – P. 196–203. – DOI 10.1016/j.triboint.2013.03.028.

3. Андреева, Л. И., Данилкин, А. А. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 4(168). – С. 20–27. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27. — EDN SZWLCG.

4. Семенов, С. В., Сараев, Ю. Н., Голиков, Н. И. и др. Обеспечение надежности деталей техники Севера упрочнением рабочих поверхностей методом наплавки // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем : материалы и доклады, Красноярск, 16–20 октября 2023 года. – Красноярск : Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», 2023. – С. 163–167. – DOI 10.25743/SSTS.2023.81.49.040. – EDN JTDKMI.

5. Сараев, Ю. Н., Голиков, Н. И., Сидоров, М. М., Лебедев, М. П. Развитие научных основ обеспечения надежности и живучести технических систем ответственного назначения с применением нового поколения материалов, оборудования и перспективных технологий в условиях Севера // Тяжелое машиностроение. – 2024. – № 9. – С. 2–10. – EDN WWOKDR

УДК 665.775.4

Сергеев Виталий Анатольевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sergeev Vitalii Anatolievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет
Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ БИТУМНЫХ ПОКРЫТИЙ
PROSPECTS FOR USING SELF-HEALING BITUMEN COATINGS

Аннотация. В работе рассматривается технология модифицирования битумного дорожного покрытия умными наполнителями – полимерами с памятью формы (ППФ). Выполнен сравнительный анализ данной технологии с другими, активно используемыми в настоящее время, отмечено превосходство ППФ–покрытий как в экономическом, так и в технологическом плане. Предложены химические присадки к материалу для дополнительного улучшения физических и эксплуатационных характеристик.

Abstract. The paper discusses the technology of modifying bituminous road surfaces with shape-memory polymers (SMP) fillers. A comparative analysis of this technology with other currently used technologies has been performed, and the superiority of SMP coatings has been noted in both economic and technological terms. Chemical additives have been proposed for the material to further improve its physical and performance characteristics.

Ключевые слова: битумные покрытия, самовосстанавливающиеся покрытия, наполнители, полимеры с памятью формы (ППФ).

Key words: bituminous coatings, self-healing coatings, fillers, shape-memory polymers (SMP).

Введение

Ежегодное развитие инфраструктуры России по различным национальным и коммерческим проектам детерминирует модернизацию и расширение дорожных систем, как базиса для логистических поставок и свободного передвижения. Одним из проектов, курируемым на государственном уровне, является проект “Безопасные дороги”, согласно которому жителям всех регионов страны по окончании работ гарантируют качественные дорожные покрытия на основе полимерно-битумных вяжущих (ПБВ). Наличие территорий с резкими климатическими колебаниями и сейсмической активностью создают потребность в разработке новых высокоэффективных битумных покрытий, обладающих повышенными требованиями к долговечности и прочностными характеристиками.

Новым направлением стали инновационные материалы, примером служит самовосстанавливающийся битум – модифицированный битум с SMP-наполнителями, способный уменьшать образование трещин и колеи, увеличивать срок службы покрытия и, как следствие, снижать издержки на эксплуатацию и техническое обслуживание [1]. Рынок потенциальных потребителей предложенной битумной продукции представлен рис. 1.

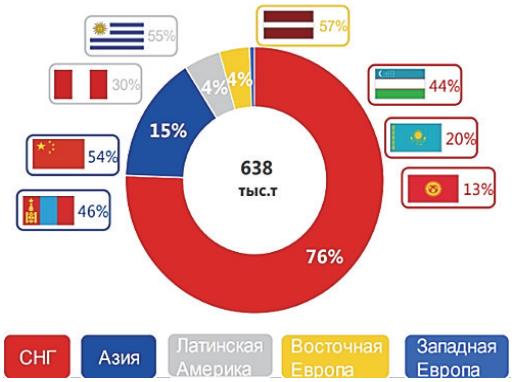


Рис. 1. Рынок потенциальных потребителей битума

Целью данной работы является обзор ключевых технологических и эксплуатационных аспектов таких покрытий и вариантов улучшения физических характеристик с помощью внедрения в состав органических добавок.

Основная часть На основе данных о внутренних и международных поставках ПБВ и сейсмической активности данных регионов была составлена карта поставок (рис. 2), где в балльной системе от 0 (не востребовано) до 6 (необходимо) показана необходимость в дорожных покрытиям.



Рис. 2. Карта потенциального экспорта SMP–битума в ближайшие страны

Результаты и обсуждение

Битумное покрытие с эффектом памяти содержит в своем составе SMP, который вводят в битум как частицы/волокна вместо части мелкого заполнителя. Такое соединение при нагреве либо другом волновом воздействии (солнечный нагрев, ИК/индукционный/микроволновой прогрев) стремится к “первичной форме”, то есть подтягивает свою химическую структуру к первоначальной [2-4].

Такой материал может запоминать исходную геометрию, заданную изначально при нанесении дорожного покрытия, деформироваться при нагрузке, в том числе динамической или сейсмической, после чего при стимуле (волновом воздействии) возвращаться ближе к исходному состоянию, закрывая микротрещины/разрывы контакта и снижая концентрацию напряжения. Особенность такого материала в том, что упор в его использовании делается не на повышении твердости и других механических характеристик, а на возможности поглощения сверхкритических воздействий с последующей регенерацией исходного состояния химической структуры полимера.

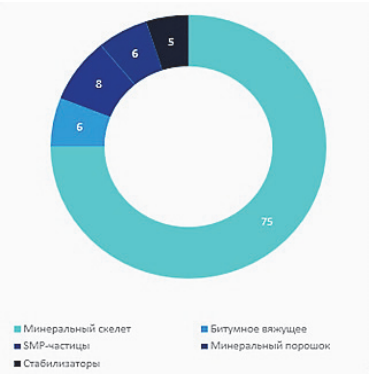


Рис. 3. Состав предлагаемого битумного покрытия, %

Состав битума с эффектом памяти представляет собой минеральный скелет, битумное вяжущее, минеральный порошок, стабилизаторы и SMP–частицы (рис. 3). Такими частицами могут выступать полиуретан, поликапролактон, полиэтилен, полибутадиен, полициклооктен, этиленвинилацетат–сополимеры в размере до 10 мм (в соответствии с патентом

US10954390B2) и любых формах: частицы, микрогранулы, волокна. Стабилизаторами в данном случае выступают органические перекиси – бензоилпероксид либо дикумилпероксид.

Особенность технологического процесса изготовления такого покрытия заключается в особом контроле температур при производстве, под каждый температурный диапазон укладки выбирается свой SMP, технологическая схема производства таких битумов представлена на рис. 4.

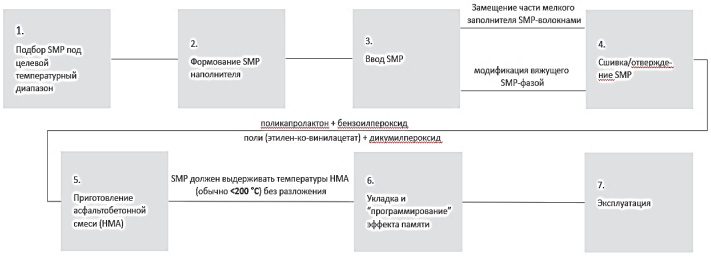


Рис. 4. Обобщенная схема производства SMP-покрытия (US10954390B2)

Был проведен сравнительный анализ ключевых механических и экономических показателей основных видов дорожных покрытий, повсеместно реализуемых в настоящее время (таблица 1, рис. 5).

Таблица 1

Сравнение основных характеристик SMP – покрытия с битумом, модифицированным стирол-бутадиен-стиролом (SBS).

Показатель	SBS–асфальт	SMP–асфальт
Остаточная деформация	20-40%	3-10%
Сопротивление усталости	40%	+40-60%
Срок службы	12-18 лет	18-25 лет
Цена	+20-30%	+35-60%
Вероятность термотрещин	На 20-40% ниже	На 30-50% ниже
Межремонтный период	12-16 лет	+50-100%
Стоимость жизненного цикла	Стандартная	-20-35%
Остаточная деформация при эксплуатации	-40-45%	Снижена в 10 раз

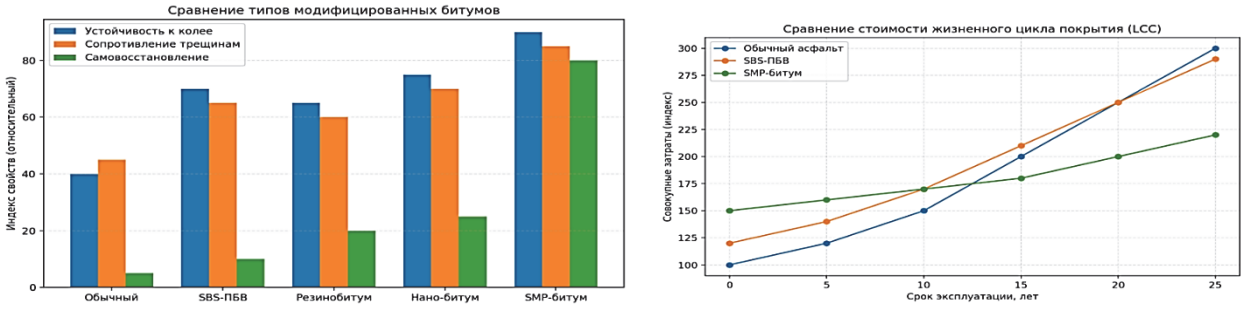


Рис. 5. а) Сравнение типов модифицированных битумов, (б) сравнение стоимости жизненного цикла покрытия

Недостатки некоторых таких покрытий состоят в недостаточной адгезии к наполнителю с эффектом памяти, это можно компенсировать, введя в состав специальные органические присадки. В качестве таких веществ могут выступать оловоорганические соединения, например меркаптив дибутилолова, которых даже при незначительных концентрациях (менее 0,5 %) позволяет повысить гомогенизацию материала, благодаря чему увеличивается количество циклов регенерации материала и его долговечность.

Другие добавки, такие как кремнийорганические соединения (3-аминопропил)триэтоксисилан), титанаты и органические эфиры фосфора, повышают адгезионные свойства покрытия к полимеру с эффектом памяти. Для каждого полимера конкретно можно подобрать комбинацию присадок, которые бы позволяли полностью стабилизировать механические и физические свойства дорожного покрытия.

Заключение

Таким образом, использование полимеров с эффектом памяти является одним из наиболее перспективных направлений развития битумной промышленности. Такие дорожные покрытия проявляют наилучшие свойства в различных климатических условиях и сейсмических ситуациях. Добавление органических присадок к таким полимерам позволяет компенсировать их основной недостаток в виде недостаточной гомогенизации и адгезии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Daquan Sun, Guoqiang Sun, Xingyi Zhu, Alvaro Guarin, Bin Li, Ziwei Dai, Jianming Ling, A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement, Advances in Colloid and Interface Science, Volume 256, 2018, Pages 65-93, ISSN 0001-8686, https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.05.003.
2. Zhang, H., Duan, H., Zhu, C., Chen, Z., & Luo, H. (2021). Mini-Review on the Application of Nanomaterials in Improving Anti-Aging Properties of Asphalt. Energy & Fuels, 35(14), 11017–11036. https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.1C01035
3. Maddalena, R., Sweeney, J., Winkles, J., Tuinea-Bobe, C., Balzano, B., Thompson, G., Arena, N., & Jefferson, T. (2022). Applications and Life Cycle Assessment of Shape Memory Polyethylene Terephthalate in Concrete for Crack Closure. *Polymers*, *14*(5), 933. https://doi.org/10.3390/polym14050933
4. Wenjing Xia, Xiao Chen, Tao Xu, Development of shape memory polyurethane/SBS compositely modified asphalt and synergistic modification mechanism, Construction and Building Materials, Volume 364, 2023, 129936, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129936

УДК 621.762.5

Старцев Егор Андреевич, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Startsev Egor Andreevich, Senior Lecturer, Komsomolsk-na-Amure State University
Бахматов Павел Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bakhtmatov Pavel Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University

СТРОЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА
STRUCTURE AND CHEMICAL COMPOSITION OF AN IRON CONTAINING MATERIAL BASED ON METALLURGICAL SLAG OBTAINED UNDER AUTOVACUUM CONDITIONS

Аннотация. Рассмотрены особенности строения и локального химического состава железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума. Основное внимание сосредоточено на анализе зонального строения образца и распределения элементов по его сечению. Установлено, что в материале выделяются светлая, серая и черная зоны, различающиеся по морфологии и соотношению структурных составляющих. Показано, что переход между ними имеет постепенный характер и сопровождается изменением локального содержания железа, кальция, кремния, марганца, алюминия, магния

и углерода. В итоге подтверждено, что после спекания формируется железосодержащий материал сложного состава с выраженной химической и структурной неоднородностью.
Abstract. The paper considers the structural features and local chemical composition of an iron containing material based on metallurgical slag obtained under autovacuum conditions. The main attention is focused on the zonal structure of the sample and on the distribution of elements over its cross section. Light, gray and dark zones differing in morphology and in the ratio of structural constituents were identified. The transition between the zones was found to be gradual and accompanied by changes in the local content of iron, calcium, silicon, manganese, aluminum, magnesium and carbon. It was shown that sintering results in the formation of an iron containing material of complex composition with pronounced structural and chemical heterogeneity.
Ключевые слова: металлургический шлак, железосодержащий материал, автовакуум, зональное строение, химический состав, SEM, EDS.
Key words: metallurgical slag, iron containing material, autovacuum, zonal structure, chemical composition, SEM, EDS.

Введение

Металлургические шлаки представляют интерес как вторичное сырье, содержащее железосодержащие и минеральные компоненты. При спекании таких систем в условиях автовакуума возникает возможность получения железосодержащего материала сложного состава, однако степень однородности его строения по объему образца заранее не очевидна. Для подобных материалов особое значение приобретает анализ локального распределения структурных составляющих и химических элементов, поскольку именно эти данные позволяют судить о характере преобразования исходного шлакового сырья после термической обработки [1].

Наиболее информативными методами для решения данной задачи являются сканирующая электронная микроскопия и локальный рентгеноспектральный анализ. Их применение позволяет оценить строение материала по сечению образца, выделить участки различного контраста и установить, как изменяется содержание основных элементов в пределах отдельных зон и переходных областей [2].

Цель работы связана с анализом строения и локального химического состава железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума.

Материалы и методики исследования.

В качестве исходного материала использовался металлургический шлак сталеплавильного предприятия АО «Амурсталь». Формирование спеченного образца на основе металлургического шлака в условиях автовакуума ранее было рассмотрено отдельно [3]. В настоящей работе внимание сосредоточено на анализе строения образца по его сечению и оценке локального химического состава отдельных участков материала.

Для исследования внутреннего строения использовали образец, в котором по сечению были выделены светлая, серая и черная зоны, а также переходные области между ними. Морфологические особенности материала изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Наблюдения выполняли в режимах регистрации вторичных и обратнорассеянных электронов, что позволило оценить рельеф поверхности, характер распределения структурных составляющих и различие отдельных участков по контрасту.

Локальный химический состав определяли методом рентгеноспектрального микроанализа в выбранных точках и по характерным участкам образца. Полученные результаты использовали для сопоставления строения светлой, серой и черной зон с содержанием основных химических элементов.

Результаты и обсуждение.

По данным макро и микроскопического анализа установлено, что после спекания образец не является однородным по сечению (рис. 1). В его строении отчетливо прослеживает-

ся зональность, выраженная в чередовании светлой, серой и черной областей, различающихся по контрасту и характеру распределения структурных составляющих.

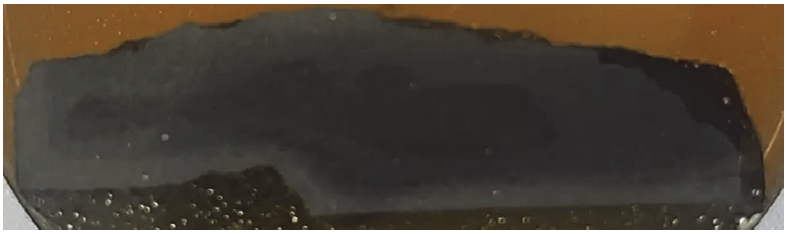


Рис. 1. Макроснимок полученного образца

Переходные участки между основными зонами имеют постепенный характер. На SEM изображениях (рис. 2) видно, что изменение структуры происходит за счет последовательного перераспределения светлой и темной составляющих, а также изменения степени дисперсности материала. При переходе от светлой зоны к серой уменьшается доля крупных плотных светлых участков и возрастает роль более тонкодисперсной матрицы. При дальнейшем переходе к черной зоне темная составляющая становится преобладающей, тогда как светлая фаза сохраняется в виде отдельных включений и локальных скоплений. Такая картина указывает на неполную гомогенизацию материала по объему образца.

Светлая зона характеризуется наибольшей долей светлой структурной составляющей. На BSE изображениях она представлена сравнительно крупными участками неправильной формы, разделенными более тонкими прослойками матричной фазы (рис. 3). В режиме SE видно, что эти фрагменты имеют сложную, местами вытянутую и разветвленную морфологию. Серая зона занимает промежуточное положение и отличается более уравновешенным соотношением светлой и темной составляющих. Структура здесь выглядит более смешанной и менее укрупненной. Черная зона характеризуется преобладанием темной матрицы и наименьшей долей светлой фазы. Светлые включения в ее пределах сохраняются, однако распределяются более разобщенно и не образуют развитой непрерывной системы.

а) б)

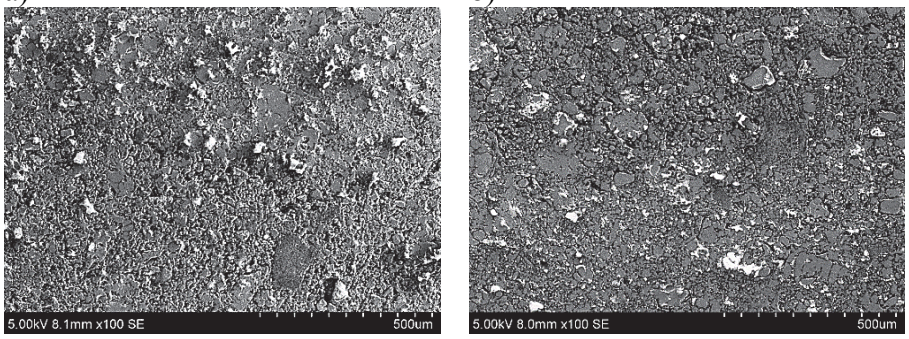


Рис. 2. Переходные участки между основными зонами образца:
а - переход от светлой зоны к серой, б - переход от серой зоны к черной.

Для уточнения природы выявленных структурных различий выполнен локальный химический анализ отдельных зон образца. По результатам усреднения локальных анализов установлено, что светлая, серая и черная зоны различаются по содержанию основных элементов. Наибольшее среднее содержание железа характерно для серой зоны и составляет около 61 мас. %. Для черной зоны этот показатель равен около 59 мас. %, а для светлой снижается до 45 мас. %. Светлая зона отличается наиболее высоким содержанием углерода и кальция. Среднее содержание углерода в ней достигает около 25 мас. %, а кальция около 12 мас. %. В серой и черной зонах содержание углерода снижается до 13–14 мас. %, а кальция до 8–9 мас. % (рис. 4).

Распределение кремния также имеет выраженный зональный характер. Наибольшее его содержание зафиксировано в черной зоне, где среднее значение составляет около 6,6 мас. %. Для светлой зоны этот показатель близок к 5,7 мас. %, а для серой снижается до 4,2 мас.

%. Содержание марганца по зонам изменяется в меньшей степени и в среднем составляет 5,5–6,2 мас. %.

Совокупность SEM и EDS данных показывает, что после спекания формируется не однородный материал, а железосодержащая система сложного состава с выраженной зональной неоднородностью. Светлая зона отличается повышенным содержанием углерода и кальция, серая зона характеризуется максимальной железистостью, а черная зона выделяется более высоким содержанием кремния и наличием натрия. Переход между этими областями имеет градиентный характер, что отражает неполное выравнивание материала по объему образца.

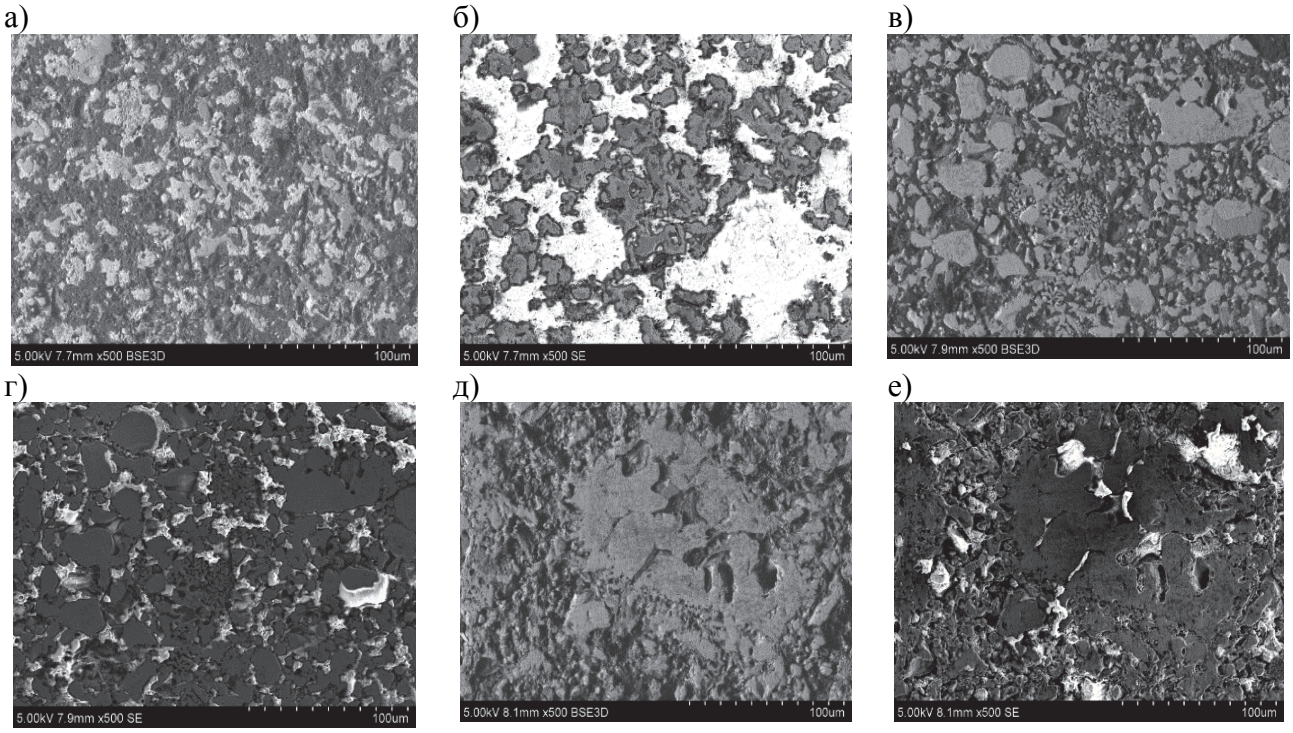


Рис. 3. Изображения характерных участков основных зон спеченного образца: а, б - светлая зона; в, г - серая зона; д, е - черная зона; а, в, д - изображения в режиме BSE; б, г, е - изображения в режиме SE

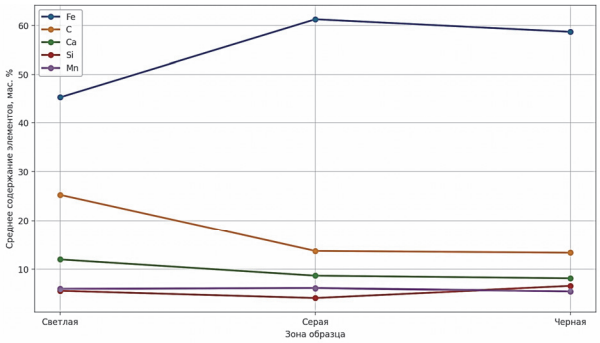


Рис. 4. Средний химический состав по зонам

Заключение

В работе рассмотрены особенности строения и локального химического состава железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума. Установлено, что после спекания формируется зонально неоднородная система, в которой выделяются светлая, серая и черная зоны, различающиеся по морфологии и распределению структурных составляющих. Показано, что переход между зонами имеет постепенный характер. Локальный химический анализ подтвердил выраженную неоднородность состава по сечению образца. В итоге полученный материал может быть охарактеризован как

железосодержащая многофазная система сложного состава с градиентным изменением структуры и химических компонентов по объему образца.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бельский С.С., Глазков Е.В., Плеханов И.В. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 27. № 1. С. 97–108. https://doi.org/10.18721/JEST.27108
2. Федорчук Ю.М., Бажин В.Ю. Техногенные отходы металлургического производства как сырье для получения новых материалов // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 215–223.
3. Бахматов П.В., Старцев Е.А. Исследование спекания прессованных заготовок из металлургического шлака в условиях автовакуума, формируемого геттерной средой // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2025. № 5(85). С. 79–84. EDN TGRECM.

УДК 621.762.5

Старцев Егор Андреевич, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Startsev Egor Andreevich, Senior Lecturer, Komsomolsk-na-Amure State University
Бахматов Павел Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bakhtmatov Pavel Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University

МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА
MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF AN IRON-CONTAINING MATERIAL BASED ON METALLURGICAL SLAG OBTAINED UNDER AUTOVACUUM CONDITIONS

Аннотация. Рассмотрены особенности микроструктуры и микротвердости железосодержащего материала, полученного на основе металлургического шлака в условиях автовакуума. По результатам металлографического анализа установлено, что после спекания формируется гетерофазная структура с выраженной морфологической неоднородностью. В объеме образца выделяются светлые, серые и темные участки, различающиеся по форме, размеру и характеру распределения. Значения микротвердости изменяются в широком диапазоне, что подтверждает неоднородность локальных свойств материала. Показано, что в структуре присутствуют участки с высокой локальной твердостью.

Abstract. The paper considers the microstructure and microhardness of an iron containing material obtained from metallurgical slag under autovacuum conditions. Metallographic analysis showed that sintering leads to the formation of a heterophase structure with pronounced morphological heterogeneity. Light, gray and dark regions differing in shape, size and distribution were identified within the sample volume. The microhardness values varied over a wide range, which confirms the heterogeneity of local properties. Areas with high local hardness were revealed in the structure.

Ключевые слова: металлургический шлак, железосодержащий материал, автовакуум, спекание, микроструктура, микротвердость.

Key words: metallurgical slag, iron containing material, autovacuum, sintering, microstructure, microhardness.

Введение

Металлургические шлаки относятся к числу массовых отходов металлургического производства и представляют интерес как вторичное сырье для получения новых материалов. В их составе сохраняются железосодержащие и минеральные компоненты, что делает возможным применение шлаков в процессах порошковой металлургии. Одним из перспективных подходов является спекание в условиях автовакуума, позволяющее ограничить влияние внешней газовой среды и создать более благоприятные условия для структурного преобразования материала [1].

Практический интерес в данном случае связан не только с возможностью получения спеченного образца, но и с особенностями его внутреннего строения. Для материалов на основе металлургического шлака после спекания характерна выраженная неоднородность, которая проявляется в различии морфологии отдельных участков и в изменении локальных механических свойств. В связи с этим металлографический анализ и измерение микротвердости позволяют оценить степень гетерофазности материала и выявить особенности его структурного состояния [2].

Цель работы это анализ микроструктуры и микротвердости железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума.

Материалы и методики исследования

В качестве исходного материала использовался металлургический шлак сталеплавильного предприятия АО «Амурсталь». Формирование спеченного образца на основе металлургического шлака в условиях автовакуума ранее было рассмотрено отдельно [3]. В настоящей работе внимание сосредоточено на подготовке шлифа и последующем анализе микроструктуры и микротвердости полученного материала.

Микроструктурные исследования проводили с помощью микроскопа Nikon MA200. Пробоподготовку для металлографического анализа выполняли на шлифовально полировальном станке Buehler AutoMet 250. После полировки образец подвергали травлению в 5 % спиртовом растворе азотной кислоты в течение 10–20 с до проявления микроструктуры.

Микротвердость измеряли по методу Виккерса. Испытания осуществляли на микротвердомере HMV 2 Series фирмы Shimadzu с использованием индентора в форме пирамиды с углом при вершине 136°. Нагрузка составляла 0,49 Н, время выдержки 10 с. Измерения выполняли в ряде локальных точек по поверхности подготовленного шлифа.

Результаты и обсуждение

Металлографический анализ показал, что после спекания на основе металлургического шлака формируется выраженно неоднородный железосодержащий материал (рис.1). Уже на нетравленом шлифе фиксируется различие между светлыми и более тёмными участками, неравномерно распределёнными по полю зрения. Светлая составляющая представлена фрагментами неправильной формы, которые образуют отдельные скопления, но не формируют сплошной непрерывной структуры. После полировки и травления микроструктура проявляется значительно отчётливее. В объёме образца начинают ясно различаться светлые, серые и тёмные области, отличающиеся по контрасту, морфологии и характеру распределения. Светлые участки выделяются как наиболее выраженная структурная составляющая, тогда как тёмная часть структуры образует матричную основу материала. Между ними сохраняются переходные области, что указывает на неполную гомогенизацию материала в процессе спекания.

а) **б)**

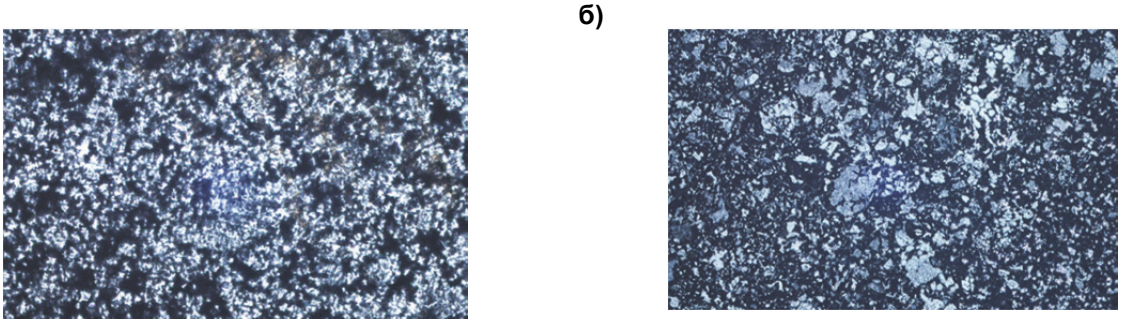


Рис. 1. Микроструктура: а – до травления; б – после травления

По сечению образца прослеживается зональное строение (рис. 2). Выделяются светлая, серая и чёрная зоны, различающиеся по соотношению светлой и тёмной составляющих. Светлая зона характеризуется наибольшей долей плотных светлых участков. Они имеют неправильную, местами вытянутую и разветвлённую форму, распределены сравнительно плотно и разделены узкими прослойками матричной фазы. Серая зона занимает промежуточное положение. В ней светлые и тёмные составляющие находятся в более уравновешенном соотношении, а структура выглядит более смешанной и менее укрупнённой. Чёрная зона отличается преобладанием тёмной матрицы и наименьшей долей светлой фазы. Светлые включения в её пределах сохраняются, однако распределяются более разобщённо и не образуют развитой непрерывной системы.

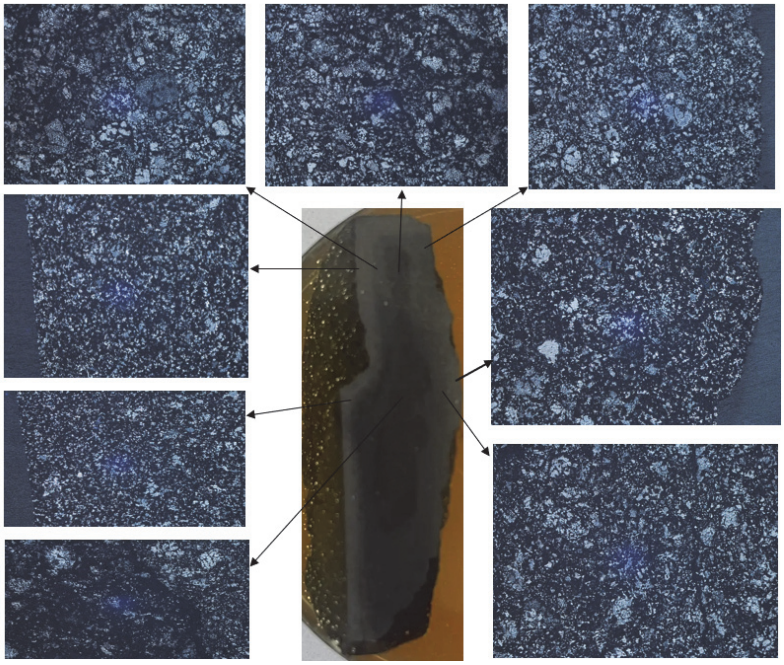


Рис. 2. Общая микроструктура образца

Переход между основными зонами имеет не резкий, а постепенный характер. На переходных участках наблюдается последовательное изменение структуры за счёт перераспределения светлых и тёмных составляющих. При переходе от светлой зоны к серой уменьшается доля крупных плотных фрагментов и возрастает роль более дисперсной матрицы. При дальнейшем переходе к чёрной зоне тёмная составляющая становится преобладающей, а светлая фаза сохраняется в виде отдельных участков и локальных включений. Такая картина отражает градиентный характер строения материала по сечению образца.

Измерение микротвёрдости (рис. 3) подтвердило, что выявленная микроструктурная неоднородность сопровождается выраженным различием локальных механических свойств. Значения микротвёрдости изменяются в широком диапазоне от 127 до 494 HV. Среднее значение составляет 296,4 HV, медиана 266,5 HV. Полученный разброс показывает, что в пределах одного образца сосуществуют участки с существенно различным сопротивлением локальному вдавливанию. Низкие значения, по-видимому, соответствуют зонам с более выраженной матричной составляющей, тогда как более высокие значения связаны с плотными светлыми фрагментами. Наличие участков с микротвёрдостью до 494 HV указывает на формирование в структуре достаточно твёрдых локальных составляющих. По сравнению со многими конструкционными сталями в обычном состоянии такие значения являются высокими, что позволяет рассматривать полученный материал как систему с выраженной локальной твёрдостью.

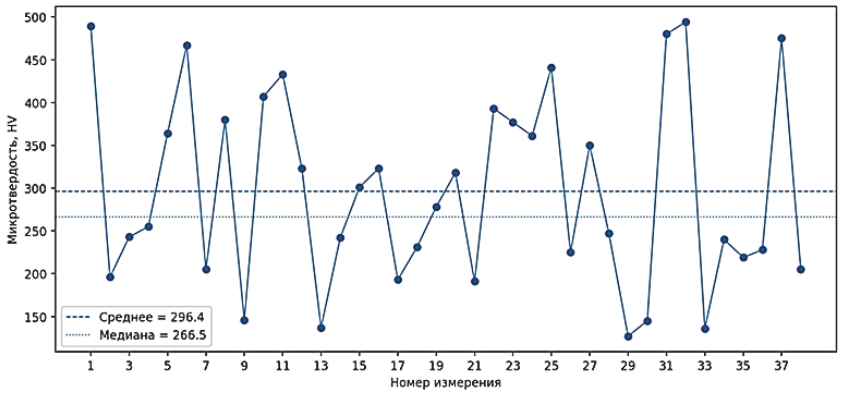


Рис. 3. Распределение микротвердости

Совокупность металлографических данных и результатов микротвёрдости показывает, что после спекания формируется не однородная спечённая масса, а гетерофазный железосодержащий материал с выраженной морфологической неоднородностью и зонально различающимися локальными свойствами. Это позволяет рассматривать структуру полученного материала как результат неполного выравнивания шлаковой системы в условиях автовакуума и частичного формирования плотных железосодержащих участков в пределах общей матричной основы.

Заключение

В работе рассмотрены особенности микроструктуры и микротвердости железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума. Установлено, что после спекания формируется гетерофазная структура с выраженной морфологической неоднородностью и зональным строением, в пределах которого выделяются светлая, серая и темная области, различающиеся по соотношению структурных составляющих. Показано, что переход между зонами имеет постепенный характер, что указывает на неполную гомогенизацию материала по сечению образца. Значения микротвердости изменяются в широком диапазоне от 127 до 494 HV, подтверждая выраженную неоднородность локальных механических свойств. В итоге полученный материал может быть охарактеризован как железосодержащая спеченная система сложного строения с высоким уровнем локальной твердости отдельных участков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бельский С.С., Глазков Е.В., Плеханов И.В. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 27. № 1. С. 97–108. https://doi.org/10.18721/JEST.27108

2. Cuevas F., Latroche M. Ti–Cr–V–Fe alloys as hydrogen getters // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 891. Art. 162052. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162052

3. Бахматов П.В., Старцев Е.А. Исследование спекания прессованных заготовок из металлургического шлака в условиях автовакуума, формируемого геттерной средой // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2025. № 5(85). С. 79–84. EDN TGRECM.

УДК 66.048.3
Страдалов Сергей Анатольевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).
Stradalov Sergey Anatolievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ
IMPROVING THE DESIGN OF A DISTILLATION COLUMN FOR PRIMARY OIL REFINING

Аннотация. Рассмотрена первичная переработка нефти на атмосферно-вакуумной трубчатой установке в условиях нефтеперерабатывающего завода. Предложено улучшение конструкции ректификационной колонны первичной переработки нефти на нефтеперерабатывающем заводе. Приведена структурно-логическая схема улучшения конструкции ректификационной колонны первичной переработки нефти.
Abstract. Primary oil refining using an atmospheric vacuum tubular unit under refinery conditions is considered. A design improvement for the distillation column used for primary oil refining at an oil refinery is proposed. A structural and logical diagram of design improvements for the distillation column used for primary oil refining is presented.
Ключевые слова: нефть, первичная переработка нефти, ректификационная колонна.
Key words: oil, refinery, primary oil processing, rectification column.

Введение

Чтобы получить горючее и горюче-смазочные материалы, а также вторичное сырье, и прочие материалы на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) применяют технологию первичной переработки нефти. НПЗ при переработке нефти на установках АВТ (атмосферно-вакуумной трубчатой) используют разделение фракций по технологическому процессу: нагрев, дистилляция и ректификация, конденсация и охлаждение.

Первичная переработка нефти является первым этапом превращения сырой нефти в товарные нефтепродукты и сырьё для вторичной переработки. Процесс основан на физическом методе «разложения» нефти на фракции в ректификационных колонах, где протекает процесс ректификации.

Ректификация, в отличие от простой перегонки, обеспечивает чёткое разделение компонентов за счёт:

- многократного испарения и конденсации;
- противоточного движения потоков (пары поднимаются, флегма стекает вниз);
- тепло- и массообмена между фазами.

Эффективность разделения зависит от:

- конструкции колонны и типа контактных устройств;
- температурного режима и давления;
- флегмового числа и расхода водяного пара;
- качества подготовки сырья.

Оптимизация этих параметров позволяет повысить выход целевых продуктов, снизить энергозатраты и улучшить качество нефтепродуктов.

Основная часть

Эффективность технологического процесса переработки нефти и повышение качества нефтепродуктов достигается за счет совершенствования конструкции ректификационной колонны первичной переработки нефти на НПЗ. К улучшениям относятся [1]:

1) Замена контактных устройств

Замена тарелок на насадочные контактные устройства является одним из наиболее эффективных методов. Насадочные устройства обеспечивают:

- меньший перепад давления по высоте аппарата;
- более широкий диапазон устойчивой работы;
- насадки повышают КПД и разделительную способность по сравнению с тарельчатыми контактными устройствами.

Также возможно использование комбинированных решений, например, сочетание тарелок и насадок в разных секциях колонны.

2) Оптимизация системы орошения

Циркуляционное орошение позволяет улучшить чёткость фракционирования и стабилизировать внутренние потоки в колонне. Регулирование количества флегмы в секции через распределение отбираемого тепла циркуляционным орошением влияет на фракционный состав продуктов.

Для равномерного распределения флегмы по сечению колонны могут применяться специальные распределительные устройства, например, центральный цилиндрический стакан с калиброванными отверстиями.

3) Модернизация системы управления

Так как все процессы по разделению нефти протекают непрерывно, и отслеживание рабочих параметров установки в реальном режиме времени является основной задачей, то автоматизация и усовершенствование систем управления технологическими процессами (АСУТП) позволяют:

- стабилизировать температурный режим колонны;
- корректировать отбор тепла и внутренние потоки для улучшения чёткости фракционирования;
- минимизировать колебания параметров процесса.

Развитая система управления обеспечивает надежную и безопасную работу установки, поддерживает баланс массы и энергии в колонне. От постоянства процессов, поддерживаемых системой управления, зависит качество продукции в соответствии со спецификациями и максимизация выхода ценных продуктов.

4) Оптимизация параметров процесса

С помощью компьютерного моделирования можно рассчитать зависимости разделяющей и пропускной способности колонны от давления и флегмового числа. Это позволяет определить оптимальные значения этих параметров для достижения нужных показателей. Например, для повышения разделяющей способности при неизменной пропускной способности можно снизить давление и повысить флегмовое число.

Структурно-логическая схема выбора, улучшения конструкции ректификационной колонны первичной переработки нефти на НПЗ представлена на рисунке 1 [3].



Рис. 1 - Структурно-логическая схема выбора, улучшения конструкции ректификационной колонны первичной переработки нефти на НПЗ

Заключение

Модернизация ректификационной колонны требует комплексного подхода, включающего замену контактных устройств, оптимизацию систем орошения и управления, изменение технологической схемы, расчёт оптимальных параметров процесса, использование современных материалов и совершенствование вспомогательных систем. Такой подход позволяет повысить эффективность разделения фракций, снизить энергозатраты и улучшить качество продукции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа / С. А. Ахметов, Т. П. Сериков, И. Р. Кузеев, М. И. Баязитов. – Санкт Петербург : Издательство "Недра", 2006. – 868 с. – ISBN 5-94089-074-1. – EDN USJBSX.

2. Волосов, И. В. Совершенствование установки первичной переработки нефти / И. В. Волосов, С. М. Леденев // Наука, техника и образование. – 2017. – Т. 2, № 5(35). – С. 6-8. – EDN YOYNDL.

3. Медведев, И. С. Повышение эффективности работы колонны атмосферной перегонки нефти за счет контроля избыточного испарения в трубчатой печи / И. С. Медведев, С. Г. Дьячкова // Промышленные процессы и технологии. – 2025. – Т. 5, № 2(16). – С. 95-105. – DOI 10.37816/2713-0789-2025-5-2(16)-95-105. – EDN SBTVEA.

4. Кирюшин, О. В. Предиктивная система управления технологическими режимами установки авт / О. В. Кирюшин, А. А. Чильдинов // Новые информационные технологии и системы в решении задач инновационного развития : сборник статей Международной научно-практической конференции, Казань,, 27 мая 2021 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2021. – С. 30-34. – EDN HFOOJI.

УДК 620.18

Сырков Семён Евгеньевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sirkov Semen Evgenievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Белова Инна Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Belova Inna Valerevna Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС
JUSTIFICATION OF THE STRUCTURAL MATERIAL SELECTION FOR GEAR WHEELS MANUFACTURING

Аннотация. В представленной статье осуществляется анализ и обоснование выбора оптимального конструкционного материала, предназначенного для производства зубчатых колес. Рассматриваются ключевые эксплуатационные требования, предъявляемые к деталям данного типа, включая необходимость обеспечения высокой контактной выносливости и устойчивости к изгибным нагрузкам. Особое внимание уделяется балансу между технологичностью, экономической эффективностью и механическими характеристиками сырья. Обосновывается целесообразность применения среднеуглеродистых марок, в частности стали 45, как наиболее рационального решения для средненагруженных передач в современном машиностроении, позволяющего отказаться от длительных и дорогостоящих процессов химико-термической обработки.

Abstract. The presented article analyzes and justifies the selection of the optimal structural material intended for the production of gear wheels. The key operational requirements for parts of this type are considered, including the need to ensure high contact endurance and resistance to bending loads. Special attention is paid to the balance between manufacturability, economic efficiency, and the mechanical characteristics of the raw materials. The expediency of using medium-carbon grades, in particular

45 steel, is justified as the most rational solution for medium-loaded gears in modern mechanical engineering, allowing the avoidance of lengthy and expensive chemical-thermal treatment processes.
Ключевые слова: выбор материала, конструкционная сталь, зубчатые передачи, сталь 45, контактная выносливость, технологичность, машиностроительное проектирование.
Key words: material selection, structural steel, gear transmissions, 45 steel, contact endurance, manufacturability, mechanical engineering design.

Введение

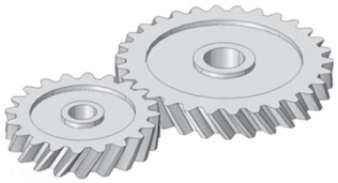


Рис. 1. Зубчатое колесо

Зубчатое колесо (рис. 1) – важное звено в любом механизме, где нужно передавать усилие через сцепление. Например, в металлорежущих станках такие детали работают непрерывно, часто стартуя и останавливаясь, и всегда несут большие нагрузки. Чтобы такая шестерёнка долго служила, очень важно правильно выбрать материал и подумать о способе его упрочнения [1].

Критерии выбора материала

Для зубчатого колеса нам необходимо выбрать материал, который:
- обладает высокой усталостной прочностью;
- имеет предел прочности (σв) не меньше 600 МПа;
- хорошо переносит циклические нагрузки;
- изготавливается из поковок или проката размером 25×15 мм.

Это всё важно, чтобы зубчатое колесо не ломалось в работе и не изнашивалось слишком быстро при постоянных нагрузках [2]. Критичен ещё один фактор – контактная прочность поверхности зубьев, ведь именно в месте соприкосновения быстрее всего идёт износ и разрушаются детали (рис. 2).

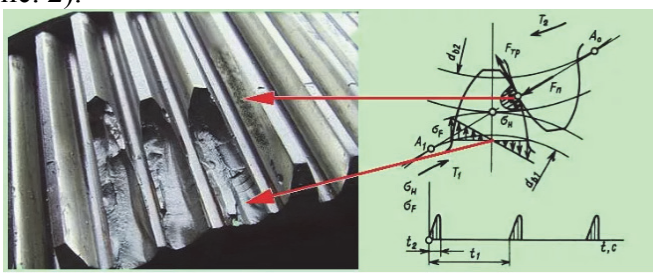


Рис. 2. Последствия выбора неподходящего материала или не верной его подготовки

Рекомендуемые марки стали

В справочниках и реальной практике для таких задач рекомендуют стали: 35, 45, 40Х, 50Г, 40ХН, 18Х2Н4ВА. Давайте кратко разберём основные варианты:

Таблица 1

Рекомендуемые материалы

Марка стали	Преимущества
45	Прочная, доступна, легко поддаётся термообработке. Хорошо подходит для небольших и средних зубчатых колёс, часто используется с поверхностным упрочнением (например, индукционной закалкой).
40Х	Легированная хромом. Отличается большей износостойкостью и прочностью, чем обычная сталь, тоже хорошо подходит для закалки и отпуска.
50Г	Марганцовистая сталь. Прочная, часто используется для деталей при высоких ударных нагрузках. Хорошо закаливается, изнашивается медленнее других марок.
40ХН	В составе есть хром и никель. Сталь менее чувствительна к ударной нагрузке, лучше переносит усталость и подходит для сложных условий эксплуатации.
18Х2Н4ВА	Очень прочная легированная сталь, применяется для «ответственных» деталей, которые несут огромные нагрузки, по структуре часто цементуется для получения твёрдой поверхности.

Твёрдая поверхность: ключевой фактор износостойкости зубчатых колёс.

Главный фактор долговечности – это контактная прочность поверхности зубьев. Даже у самых прочных сталей поверхность может быстро изнашиваться, если её не упрочнить специальной термообработкой. Для стали 45, например, часто применяют индукционную закалку поверхности зубьев (ТВЧ) (рис. 3), чтобы получить твёрдый слой снаружи, а сердцевина оставалась вязкой и могла «гасить» удары [3]. Для легированных сталей (40Х, 50Г, 40ХН, 18Х2Н4ВА) тоже используются разные варианты термических и химико-термических обработок, иногда – цементация или азотирование.

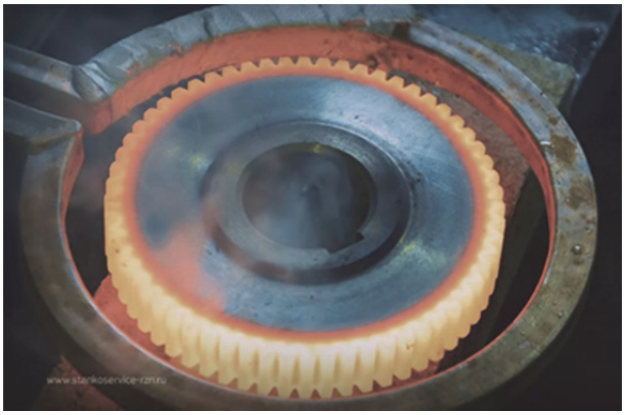


Рис. 3. Закалка ТВЧ

Обоснование выбора

Из всех перечисленных сталей сталь 45 – отличное решение для зубчатых колёс небольшого размера с переменными нагрузками. Её легко закалять, она не требует дорогих легирующих добавок, а необходимую износостойкость и твёрдость ей придаёт правильная термическая обработка. Изделия из стали 45 популярны благодаря экономичности и простоте обработки [4].

Заключение

Для небольшой шестерни или зубчатого колеса оптимально применить сталь 45 с поверхностной индукционной закалкой зубьев. Такая комбинация обеспечит требуемую прочность и долгий срок службы детали в условиях циклических нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1 Овчинников, В. В. Технология термической обработки : учебник / В. В. Овчинников. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2024. – 320 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-8199-0913-3. – Текст : электронный. – URL: https://znanium.ru/catalog/product/2095595 (дата обращения: 2026-04-15).

2 Коновалов, А. А. Обоснование выбора материала и химико-термическая обработка толстостенной трубы / А. А. Коновалов, И. В. Белова // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре госу-дарственный университет, 2022. – С. 116-120. – EDN JTQSKZ.

3 Елагина, О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – Москва : Университетская книга ; Логос, 2020. – 489 с. – (Новая университетская библиотека). – ISBN 978-5-98704-450-6. – Текст : электронный. – URL: https://znanium.ru/catalog/product/1214442 (дата обращения: 2026-04-15).

4 Белова, И. В. Кинетика распада мартенсита при отпуске / И. В. Белова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 10(214). – С. 435-440. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-10-435-440. – EDN LCEWNB.

УДК 620.18
Сырков Семён Евгеньевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sirkov Semen Evgenievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Белова Инна Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Belova Inna Valerevna Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ИЗ СТАЛИ 45
HEAT TREATMENT OF 45 STEEL FOR GEAR WHEELS

Аннотация. В статье рассматривается термическая обработка стали 45, широко используемой в машиностроении России для изготовления зубчатых колёс. Подчёркивается, что оптимальным способом повышения прочности и износостойкости деталей служит индукционная закалка токами высокой частоты (ТВЧ) с последующим низким отпуском. Описан технологический процесс: механическая обработка, нормализация, закалка ТВЧ, низкий отпуск и финишная обработка. Сравниваются альтернативные методы упрочнения (цементация, азотирование) и выявляются преимущества выбранного подхода для обеспечения долговечности и надёжности колёс. Технология активно применяется как в серийном производстве, так и в образовательном процессе в Комсомольском-на-Амуре государственном университете.
Abstract. The article examines the heat treatment process of 45 steel, widely used in Russian mechanical engineering for gear manufacturing. The optimal way to increase the durability and wear resistance of the parts is induction hardening by high-frequency currents (TVCh) followed by low tempering. The technological process is described: machining, normalization, induction hardening, low tempering, and final finishing. Alternative hardening methods (carburizing, ni-triding) are compared and the advantages of the selected approach for ensuring gear longevity and reliability are demonstrated. The technology is actively applied both in mass production and in the educational process at Komsomolsk-na-Amure State University.
Ключевые слова: сталь 45, термическая обработка, индукционная закалка, низкий отпуск, зубчатые колёса, износостойкость, машиностроение
Key words: 45 steel, heat treatment, induction hardening, low tempering, gear wheels, wear resistance, mechanical engineering

Введение

Сталь 45 – одна из самых популярных конструкционных сталей в машиностроении России. Благодаря сочетанию хорошей прочности, износостойкости и относительной простоты обработки, она часто применяется при изготовлении деталей, подвергающихся средним и высоким нагрузкам, например, зубчатых колёс (рис. 1) для станков. Проведение правильной термической обработки позволяет повысить прочностные и эксплуатационные характеристики таких изделий [1]. В данной статье рассматривается технология термической обработки стали 45 для зубчатых колёс (рис. 1), сравниваются разновидности упрочнения и обосновывается выбор оптимальной схемы для достижения требуемых свойств детали.

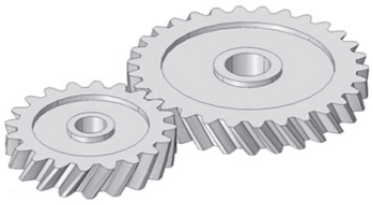


Рис. 1. Зубчатое колесо

Термическая обработка стали 45

Термическая обработка позволяет повысить прочностные и эксплуатационные характеристики детали. В случае зубчатых колёс важно получить твёрдую, износостойкую поверхность зубьев при сохранении вязкой сердцевины, чтобы шестерня выдерживала удары и циклические нагрузки, не ломалась и не изнашивалась слишком быстро [2].

Для стали 45 оптимальна индукционная закалка токами высокой частоты (ТВЧ) (рис. 2) с последующим низким отпуском. Такой способ позволяет упрочнить именно рабочую поверхность зубьев, а сердцевина остаётся более мягкой и пластичной. Это принципиально важно для долговечности и надёжности шестерни.

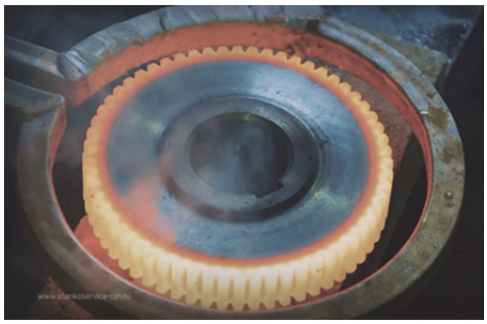


Рис. 2. Закалка ТВЧ

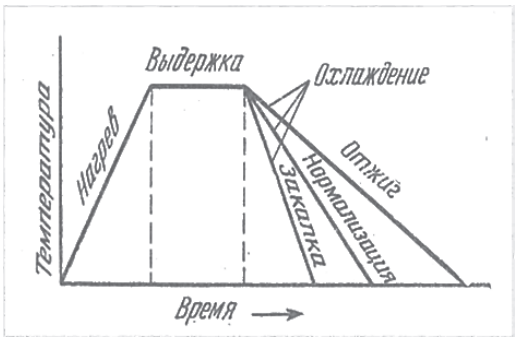


Рис. 3. Схема термообработки

1. Механическая обработка. Заготовке сначала придают нужную форму (точение, фрезерование), но оставляют небольшой припуск для чистовой доработки после закалки.
2. Нормализация. Заготовку нагревают до 850-870 °С, выдерживают 20-30 минут и охлаждают на воздухе. Это позволяет убрать внутренние дефекты и получить равномерную структуру металла.
3. Закалка ТВЧ. Зубья шестерни нагревают токами высокой частоты до 840-860 °С, почти мгновенно охлаждают в полимерном растворе. В итоге поверхность зуба становится твёрдой (58-62 HRC).
4. Низкий отпуск. Сразу после закалки деталь прогревают до 160-180 °С и выдерживают 1–2 часа, чтобы избавить металл от хрупкости и снять внутренние напряжения.
5. Финишная обработка. После термической обработки шестерню шлифуют до окончательных размеров и проводят контроль качества.

В результате термической обработки достигается высокая износостойкость и твёрдость поверхности зубьев при сохранении вязкой сердцевины. Такой подход обеспечивает работоспособность зубчатых колёс при ударных и циклических нагрузках, минимизирует риск излома и преждевременного износа. Финишная обработка и контроль качества позволяют выдерживать заданные геометрические параметры после термообработки с минимальными деформациями [3].

Сравнение с альтернативными методами упрочнения (цементация, азотирование) цементация нужна для низкоуглеродистых сталей, а у стали 45 и так достаточно углерода для упрочнения [4]. Азотирование даёт слишком тонкий упрочнённый слой – этого мало для крупных и нагруженных зубьев.

Преимущества очевидны:

- высокая износостойкость поверхности;
- устойчивость к усталостным разрушениям;
- сохранение вязкой сердцевины для ударной прочности;
- минимум деформаций после обработки.

Заключение

Правильная термическая обработка – залог долговечности и безотказности зубчатых колёс из стали 45. Процесс универсален и экономичен, поэтому его активно применяют для серийного производства на ведущих машиностроительных предприятиях, в том числе в Комсомольском-на-Амуре государственном университете при обучении студентов технических специальностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Овчинников, В. В. Технология термической обработки : учебник / В.В. Овчинников. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2024. – 320 с. – (Высшее образование). - ISBN 978-5-8199-0913-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2095595

2. Елагина, О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – Москва : Университетская книга ; Логос, 2020. - 489 с. - (Новая университетская библиотека). - ISBN 978-5-98704-450-6. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/1214442

3. Коновалов, А. А. Обоснование выбора материала и химико-термическая обработка толстостенной трубы / А. А. Коновалов, И. В. Белова // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре госу-дарственный университет, 2022. – С. 116-120. – EDN JTQSKZ.

4. Белова, И. В. Кинетика распада мартенсита при отпуске / И. В. Белова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 10(214). – С. 435-440. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-10-435-440. – EDN LCEWNB.

УДК 620.193.4

Сырков Семён Евгеньевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sirkov Semen Evgenievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Калугина Анна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kalugina Anna Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЭТГ-ПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PETG-PLASTIC SAMPLES TREATED BY 3D-PRINTING

Аннотация. В работе приводится результаты экспериментального исследования механических характеристик образцов при растяжении, изготовленных методом 3D-печати из ПЭТГ-пластика. Определены параметры предела прочности при разрыве, предела прочности при растяжении и относительное удлинение. Полученные данные показывают, что ПЭТГ проявляет упруго-пластичное поведение и сравнительно невысокие показатели прочности на разрыв. Материал отличается хорошей пластичностью, однако разрушается при малых нагрузках.

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the mechanical characteristics of tensile samples made using 3D printing technology from PETG plastic. The parameters of the tensile strength, tensile modulus, and elongation were determined. The obtained data show that PETG exhibits elastic-plastic behavior and relatively low tensile strength. The material has good plasticity, but it breaks down under lower loads.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, метод послойного наплавления, ПЭТГ, механические характеристики, прочность при растяжении, анизотропия свойств

Key words: additive technologies, 3D printing, fused deposition modeling, PETG, mechanical characteristics, tensile strength, anisotropy of properties.

Введение

Технология 3D-печати, некогда бывшая инструментом для быстрого прототипирования, сегодня уверенно занимает нишу полноценного производственного процесса. Метод послойного наплавления (FDM – Fused Deposition Modeling), благодаря своей доступности,

простоте и широкому выбору материалов стал одним из самых популярных в мире. Инженеры и конструкторы все чаще используют FDM-печать для создания не только макетов, но и функциональных деталей, корпусов и элементов оснастки [1]. В этом контексте выбор материала играет ключевую роль. Если PLA-пластик ценится за простоту печати и экологичность, а ABS – за прочность и термостойкость, то полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТГ, PETG) выступает в роли «золотой середины». Он сочетает в себе механическую прочность, близкую к ABS, с легкостью печати, характерной для PLA, и при этом обладает отличной химической стойкостью и низкой усадкой.

Однако главная проблема, с которой сталкивается инженер при проектировании деталей для 3D-печати, — это анизотропия свойств [2]. Деталь, напечатанная на 3D-принтере, не является монолитной. Ее свойства сильно зависят от того, как были уложены слои материала. Прочность вдоль линий печати может в разы превышать прочность поперек слоев, где слабым звеном является межслоевое спекание. Именно поэтому данные о свойствах сырья (филамента) недостаточны для реальных прочностных расчетов. Необходимо иметь экспериментальные данные для конкретных режимов печати [3].

Материалы и методы исследования

Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов, все этапы эксперимента осуществляли в соответствие с ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Для испытаний были изготовлены стандартные плоские пропорциональные образцы типа 1А согласно ГОСТ 11262-2017. Эскиз образца представлен на рис. 1.

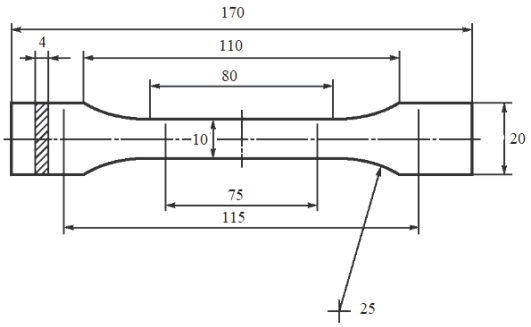


Рис. 1. Размеры пропорциональных плоских образцов типа 1А

Образцы были напечатаны на 3D-принтере Anycubic i3 Mega-S филаментом PETG производства ООО «Стар Групп», диаметром нити 1,75 мм. Формирование структуры образца осуществлялось на плоскости, ориентация растра печати $+45^0/-45^0$. Данный способ печати был выбран с целью обеспечения максимальной прочности образцов при растяжении [4]. Основные параметры печати приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технологические параметры 3D-печати образцов

Параметр	Значение
Высота слоя, мм	0,2
Толщина стенки, мм	1,2
Плотность заполнения, %	100
Скорость печати, мм/с	40
Температура экструдера, °С	230
Температура стола, °С	75

Испытания на одноосное растяжение проводились на универсальной испытательной машине Instron 3382 (рис. 2) на базе центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ». Каждый образец аккуратно закреплялся в захватах разрывной машины, после чего к нему прикладывалось растягивающее усилие, возрастающее с постоянной скоростью перемещения траверсы 1 мм/мин. В ходе испытания фиксировали диаграмму «напряжение-деформация». Испытанию подвергали 5 образцов.

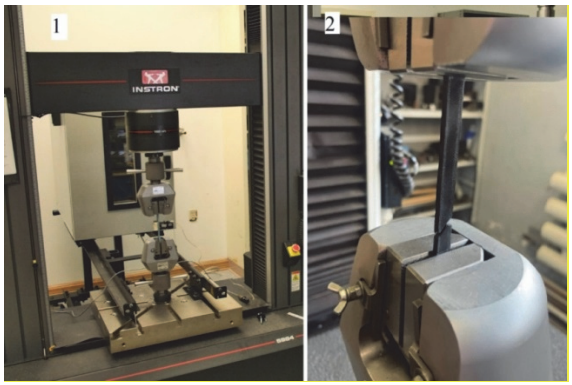


Рис. 2. Универсальная испытательная машина
1 – Испытательная машина; 2 – разрушенный образец в ходе испытания

Результаты испытаний

В ходе испытаний на статическое растяжение 5 образцов материала PETG, полученных методом 3D-печати по FDM-технологии, был определён комплекс механических характеристик: прочность при растяжении, прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве. Образцы после проведения испытаний представлены на рис. 3. Кривые «напряжение-деформация» образцов приведены на рисунке 4.



Рис. 3. Пропорциональные плоские образцы материала PETG после проведения испытаний на растяжение

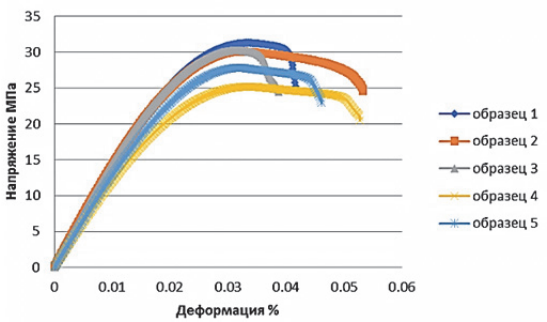


Рис. 4. Кривые «напряжение-деформация» образцов материала PETG

Значения механических характеристик материала PETG рассчитывались по формулам предела прочности и относительного удлинения:

$$\delta = \frac{Fpm}{A_0} \quad \text{и} \quad \delta = \frac{L_0 - L_k}{L_0} * 100\ \%$$

где F_{pm} – максимальная растягивающая нагрузка, Н; A_0 – первоначальное поперечное сечение образца мм^2; L_0 – рекомендуемая расчётная длина; L_k – конечная расчётная длина.
Рассчитанные значения механических характеристик приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения механических характеристик

Номер образца	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение %
1	31,3	3,4
2	30,1	3,2
3	30,2	3,1
4	25,2	3,4
5	27,8	3,2

Обсуждение результатов

Проведённые испытания на машине Instron 3382 показали, что PETG проявляет упруго – пластичное поведение. Было зафиксировано, что материал обладает сравнительно низким показателями прочности на разрыв. При этом PETG демонстрирует хорошую пластичность, однако при испытаниях образцы разрушались при меньших значениях нагрузки по

сравнению с другими материалами. Это свидетельствует о том, что область применения PETG целесообразно ограничить задачами, где не требуется высокая прочность, а на первый план выходит пластичность и возможность получения сложной геометрии.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что PETG уступает на разрыв другим материалам. Тем не менее, за счёт своей пластичности он может быть рекомендован для изготовления изделий, где требуется гибкость или сложная форма, а требования к прочности не являются критичными.

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голобурдин, Д. А. Аддитивные технологии и перспективы их применения в современном станкостроении / Д. А. Голобурдин, А. М. Козлов // Новые технологии в машиностроении : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 14–15 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2021. – С. 83-91. – EDN UFQQSM.

2. Колодкин, Д. Ю. Формирование анизотропной структуры при аддитивном производстве FDM-методом / Д. Ю. Колодкин, Е. И. Кордикова // Технология органических веществ : Материалы 85-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 01–13 февраля 2021 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2021. – С. 202-203. – EDN FJOORV.

3. Влияние параметров 3D печати на физико-механические характеристики материалов / М. В. Тимошенко, К. С. Кошевая, С. В. Балабанов, М. М. Сычев // Физика и химия стекла. – 2022. – Т. 48, № 4. – С. 484-492. – DOI 10.31857/S0132665122040138. – EDN YACWEL.

4. Шмелев, А. В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4(112). – DOI 10.18698/2308-6033-2021-4-2070. – EDN MNSGQO.

УДК 658.512.22

Табаков Евгений Васильевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Tabakov Evgeny Vasilievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Серебренникова Анжела Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serebrennikova Anzhela Gennadievna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ КРИОГЕННОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
STUDY OF THE DEPENDENCE OF OUTPUT PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM WHEN TURNING STRUCTURAL CRYOGENIC STEEL 12X18N10T ON CHANGES IN THE GEOMETRY OF THE CUTTING TOOL

Аннотация. Проведено экспериментальное определение влияния главного переднего угла γ упорного проходного резца (ГОСТ 18879-73, твёрдый сплав ВК8) при фиксированном заднем угле α = 6° в диапазоне γ от –8° до +10° (шаг 2°) и различных значениях подачи S (0,07; 0,09; 0,11 мм/об) на шероховатость обработанной поверхности Ra и общую силу резания F при точении конструкционной криогенной стали марки 12Х18Н10Т. Режимы резания: глу-

бина t = 0,5 мм, частота вращения шпинделя n = 630 об/мин (скорость резания V ≈ 146,5 м/мин), диаметр заготовки 74 мм. Обработка выполнялась на токарно-винторезном станке 1К625. Измерение Ra проводилось портативным профилометром TR200 с выполнением четырёх замеров для каждого значения переднего угла γ. Измерение силы резания F осуществлялось с помощью лабораторного стенда STD.201-2. Построены зависимости Ra(γ) и F(γ) для всех исследуемых значений подачи. Полученные результаты могут быть применены при выборе геометрии режущего инструмента для чистового точения криогенных сталей.
Abstract. An experimental determination has been carried out of the influence of the main rake angle γ of a thrust turning tool (GOST 18879-73, carbide grade VK8) with a fixed clearance angle α = 6° in the range γ from –8° to +10° (step 2°) and various feed rates S (0.07, 0.09, 0.11 mm/rev) on the surface roughness Ra and total cutting force F when turning structural cryogenic steel grade 12Kh18N10T. Cutting conditions: depth t = 0.5 mm, spindle speed n = 630 rpm (cutting speed V ≈ 146.5 m/min), workpiece diameter 74 mm. Machining was performed on a 1K625 screw-cutting lathe. Ra was measured using a TR200 portable profilometer with four measurements taken for each rake angle γ. The cutting force F was measured using a laboratory stand STD.201-2. Dependences Ra(γ) and F(γ) were plotted for all feed values studied. The obtained results can be applied when selecting the geometry of the cutting tool for finish turning of cryogenic steels.
Ключевые слова: Точение, передний угол, шероховатость поверхности, сила резания, криогенная сталь, 12Х18Н10Т, проходной резец, подача
Key words: Turning, rake angle, surface roughness, cutting force.

Введение

Конструкционные криогенные стали, в том числе аустенитная нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т, широко применяются при изготовлении элементов оборудования, работающего при низких и криогенных температурах (сосуды под давлением, трубопроводы, ёмкости для сжиженных газов, элементы космической и авиационной техники). Благодаря высокой коррозионной стойкости, хорошей свариваемости и сохранению вязкости при температурах до –253 °С эта сталь является одним из основных материалов криогенной техники. Однако обработка 12Х18Н10Т резанием сопряжена с рядом трудностей: повышенная склонность к наклёпу, высокая вязкость, интенсивное наростообразование на режущей кромке и низкая теплопроводность, что приводит к повышенным силам резания и ухудшению качества обработанной поверхности.

Одним из наиболее эффективных и доступных способов управления процессом точения криогенных сталей является оптимизация геометрии режущего инструмента. Среди геометрических параметров резца главный передний угол γ оказывает непосредственное влияние на деформацию срезаемого слоя, направление схода стружки, силы резания и тепловыделение в зоне контакта. Увеличение переднего угла обычно снижает силы резания, однако чрезмерно большой положительный угол может привести к снижению прочности режущего клина и вибрациям. Отрицательные передние углы часто применяются при обработке твёрдых и вязких материалов для повышения прочности режущей кромки.

Для упорных проходных резцов, применяемых при чистовой обработке, рекомендуемые значения переднего угла в справочной литературе для нержавеющих сталей обычно находятся в диапазоне от 0° до 10-12°. Однако эти рекомендации носят обобщённый характер и не учитывают специфику конкретных криогенных сталей, таких как 12Х18Н10Т.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение влияния главного переднего угла γ упорного проходного резца (ГОСТ 18879-73, твёрдый сплав ВК8) при фиксированном заднем угле α = 6° в диапазоне γ = –8…+10° и различных значениях подачи S = 0,07…0,11 мм/об на шероховатость обработанной поверхности Ra и общую силу резания F при точении конструкционной криогенной стали 12Х18Н10Т в условиях чистового точения (t = 0,5 мм, n = 630 об/мин).

Задачи исследования:

1 Экспериментально получить зависимости Ra(γ) и F(γ) для трёх значений подачи.
2 Выявить характер влияния переднего угла на каждый из выходных параметров.

3 Определить рациональные диапазоны переднего угла для обеспечения низкой шероховатости и умеренной силы резания при точении стали 12Х18Н10Т [1-3].

Основная часть

В ходе эксперимента получены зависимости шероховатости Ra и общей силы резания F от главного переднего угла γ (от –8° до +10°) при трёх значениях подачи S = 0,07; 0,09; 0,11 мм/об. Режимы резания: t = 0,5 мм, n = 630 об/мин (V ≈ 146,5 м/мин), задний угол α = 6° - постоянны. Результаты измерений представлены в таблицах 1 и 2 [1].

Как видно из таблицы 1:

− при подаче S = 0,07 мм/об наименьшая шероховатость зафиксирована при γ = –8° (2,26 мкм) и γ = –6° (2,30 мкм), наибольшая – при γ = 10° (4,48 мкм);

− при подаче S = 0,09 мм/об минимальное значение Ra = 2,35 мкм получено при γ = 0°, максимальное – при γ = 10° (4,95 мкм);

− при подаче S = 0,11 мм/об наименьшая шероховатость достигнута при γ = 0° (2,58 мкм) и γ = –8° (2,59 мкм), наибольшая – при γ = 10° (4,64 мкм);

− для всех трёх подач максимальная шероховатость наблюдается при γ = 10° [2, 3].

Таблица 1

Влияние переднего угла и подачи на шероховатость поверхности Ra

γ, град	S = 0,07	S = 0,09	S = 0,11
-8	2,26	2,43	2,59
-6	2,30	-	-
-4	2,45	2,53	3,04
-2	-	-	-
0	-	2,35	2,58
2	-	4,43	-
4	2,38	-	-
6	-	-	4,30
8	2,44	2,53	3,20
10	4,48	4,95	4,64

Примечание: «-» означает, что измерение для данного сочетания параметров не проводилось.

Как видно из таблицы 2:

− при подаче S = 0,07 мм/об сила резания снижается с увеличением переднего угла: от 298,83 Н (γ = -8°) до 184,21 Н (γ = 10°)

− при подаче S = 0,09 мм/об минимальное значение F = 233,45 Н достигнуто при γ = 10°, максимальное – при γ = -4° (353,32 Н);

− при подаче S = 0,11 мм/об наименьшая сила зафиксирована при γ = 10° (246,11 Н) и γ = 6° (244,59 Н), наибольшая – при γ = -4° (385,06 Н);

− для всех трёх подач прослеживается тенденция к снижению силы резания при увеличении переднего угла до положительных значений.

Таблица 2

Влияние переднего угла и подачи на силу резания

γ, град	S = 0,07	S = 0,09	S = 0,11
-8	298,83	335,10	373,05
-6	297,56	-	-
-4	232,67	353,32	385,06
-2	-	-	-
0	-	267,03	319,38
2	-	299,74	-
4	269,10	-	-
6	-	-	244,59
8	229,32	271,63	295,07
10	184,21	233,45	246,11

Примечание: «—» означает, что измерение для данного сочетания параметров не проводилось.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют выявить ряд закономерностей влияния переднего угла γ и подачи S на шероховатость Ra и силу резания F при точении криогенной стали 12Х18Н10Т, а также отметить отдельные аномальные точки, требующие комментария.

1. Влияние переднего угла и подачи на шероховатость

Для всех исследованных подач наблюдается общая тенденция: наименьшие значения Ra получены при отрицательных и нулевом переднем угле (γ = -8…0°), тогда как при γ = 10° шероховатость возрастает в 1,5-2 раза. Это может быть объяснено следующим образом. При отрицательных передних углах режущий клин имеет большую прочность, снижается вибрационная активность процесса, а стружка сходит с большей деформацией, что в случае вязких аустенитных сталей (12Х18Н10Т) может способствовать более стабильному процессу резания без нароста. При увеличении переднего угла до больших положительных значений (γ = 10°) уменьшается площадь контакта стружки с передней поверхностью, ухудшается теплоотвод, возрастает локальная температура в зоне резания, что провоцирует налипание материала и рост шероховатости.

2. Влияние переднего угла и подачи на силу резания

В отличие от шероховатости, зависимость силы резания F от переднего угла γ демонстрирует чёткую тенденцию: с увеличением γ от отрицательных к положительным значениям сила резания снижается. Это полностью согласуется с классическими представлениями теории резания: увеличение переднего угла облегчает деформацию срезаемого слоя, уменьшает силу трения стружки по передней поверхности и снижает общую энергосиловую нагрузку. Наиболее это видно:

при S = 0,07: F снижается с 298,83 Н (γ = -8°) до 184,21 Н (γ = 10°);
при S = 0,09: F снижается с 353,32 Н (γ = -4°) до 233,45 Н (γ = 10°);
при S = 0,11: F снижается с 385,06 Н (γ = -4°) до 244,59 Н (γ = 6°) и 246,11 Н (γ = 10°). С ростом подачи, силы резания закономерно увеличиваются для всех передних углов, что соответствует известным зависимостям.

Выводы

На основании экспериментальных исследований влияния главного переднего угла γ упорного проходного резца (ГОСТ 18879-73, сплав ВК8, α = 6°) в диапазоне от –8° до +10° и подачи S (0,07; 0,09; 0,11 мм/об) на шероховатость Ra и силу резания F при точении конструкционной криогенной стали 12Х18Н10Т (t = 0,5 мм, n = 630 об/мин, V ≈ 146,5 м/мин) можно сделать следующие выводы:

1 Шероховатость поверхности Ra достигает наименьших значений при отрицательных и нулевом переднем угле (γ = -8…0°) для всех исследованных подач. Наименьшее значение Ra = 2,26 мкм получено при γ = -8° и S = 0,07 мм/об.

2 При увеличении переднего угла до γ = 10° шероховатость возрастает в 1,5–2 раза для всех подач, достигая максимума Ra = 4,95 мкм при γ = 10° и S = 0,09 мм/об.

3 Зафиксированы аномальные выбросы шероховатости: при S = 0,09 мм/об и γ = 2° (Ra = 4,43 мкм), а также при S = 0,11 мм/об и γ = 6° (Ra = 4,30 мкм), что может свидетельствовать о нестабильности процесса резания на данных режимах.

4 Сила резания F закономерно снижается с увеличением переднего угла от отрицательных к положительным значениям. Максимальное снижение (на 38 %) зафиксировано при S = 0,07 мм/об: с 298,83 Н (γ = -8°) до 184,21 Н (γ = 10°).

5 С ростом подачи сила резания увеличивается для всех передних углов, что соответствует классическим закономерностям.

6 Выявлен компромиссный характер выбора переднего угла: для минимизации шероховатости предпочтителен диапазон γ = -8…0°, для снижения силы резания – γ = 6–10°.

Заключение

В ходе выполнения работы экспериментально исследовано влияние главного переднего угла γ упорного проходного резца в диапазоне от -8° до +10° на шероховатость обработанной поверхности Ra и общую силу резания F при точении конструкционной криогенной стали 12Х18Н10Т с постоянными режимами резания (t = 0,5 мм, n = 630 об/мин) и варьируемой подачей S = 0,07…0,11 мм/об. Установлено, что увеличение переднего угла закономерно снижает силу резания (на 34–38 %), однако приводит к росту шероховатости поверхности, особенно при γ > 6°. Наилучшее качество поверхности достигнуто при отрицательных и нулевых передних углах (γ = -8…0°).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филиппов А. В. Влияние объемной интенсивной пластической деформации на шероховатость фрезерованной поверхности коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т / А. В. Филиппов, Н. Н. Шамарин, Ю. Н. Зайцева [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 18–29. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-29.

2. Артамонов Е. В. Исследование взаимосвязи свойств инструментальных материалов с процессом резания на примере токарной обработки стали 12Х18Н10Т / Е. В. Артамонов, А. С. Штин, А. М. Тверяков, Д. С. Василега // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 4. – С. 80–86. – DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86.

3. Tuyen B. N., Cong N. C. Selecting the Appropriate Geometrical Parameters of made in Viet Nam Carbide Insert for Best Roughness and Dimensional Accuracy during Contour Turning of SUS304 Stainless Steel / B. N. Tuyen, N. C. Cong // Vietnam Journal of Science and Technology. – 2017. – Т. 55, № 5. – С. 543–551.

УДК 665.662.9

Тырышкин Сергей Игоревич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tyryshkin Sergey Igorevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет

Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ПРОЕКТ УСТАНОВКИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ДЕАСФАЛЬТИЗАЦИИ
TAR SUPERCRITICAL DEASPHALTING PLANT PROJECT

Аннотация. В данной статье приведены характеристики сырья, деасфальтизата и асфальтита пропановой деасфальтизации, технологическая схема сверхкритической деасфальтизации гудрона, материальный баланс установки, а также оценка экономической эффективности внедрения установки деасфальтизации гудрона для производства сырья гидрокрекинга и компонента сырья замедленного коксования.

Abstract. This article presents the characteristics of raw materials, deasphaltizate and asphaltite of propane deasphalting, the technological scheme of supercritical tar deasphalting, the material balance of the unit, as well as the assessment of the economic efficiency of the implementation of a tar deasphalting unit for the production of hydrocracking raw material and delayed coking raw material component.

Ключевые слова: деасфальтизация гудрона, сверхкритическая регенерация, пропан, базовые масла.

Key words: tar deasphalting, supercritical regeneration, propane, base oils.

Введение

Проектирование установки деасфальтизации гудрона является актуальным, поскольку деасфальтизация гудрона позволяет получить деасфальтизат, который является сырьем гид-

рокрекинга для производства базовых масел III группы, являющихся сырьем высокоиндексных моторных и трансмиссионных масел, а также асфальтит деасфальтизации, использующийся в качестве компонента сырья установки замедленного коксования.

Целью данной работы является проектирование установки сверхкритической деасфальтизации гудрона для производства сырья гидрокрекинга и компонента сырья замедленного коксования, а также оценка экономической эффективности внедрения данной установки.

Материальный баланс

Расчёт материального баланса проводился в «MS Excel» по формулам 1-5. Для расчета выхода деасфальтизата используется формула 1.

$$\eta_{\text{дао}} = \frac{\text{С}_{\text{асф}} - \text{С}_{\text{гуд}}}{\text{С}_{\text{асф}} - \text{С}_{\text{да}}} \quad (1)$$

где $\text{С}_{\text{асф}}$ – коксуемость асфальтита, $\text{С}_{\text{гуд}}$ - коксуемость гудрона, $\text{С}_{\text{да}}$ – коксуемость деасфальтизата [3].

Для расчёта выхода асфальтита используется формула 2.

$$\eta_{\text{асф}} = 100 - \eta_{\text{да}} - \text{L}_{\text{с}} \quad (2)$$

где $\eta_{\text{да}}$ – выход деасфальтизата, $\text{L}_{\text{с}}$ – потери сырья.

Для расчета массового расхода продуктов используется формула 3.

$$\text{G} = \eta * \text{G}_{\text{с}} \quad (3)$$

где η – выход продукта, $\text{G}_{\text{с}}$ – массовый расход сырья.

Для расчёта массового расхода циркулирующего пропана используется формула 4.

$$\text{G}_{\text{пр.цирк}} = \text{G}_{\text{с}} * \text{К} \quad (4)$$

где К- кратность растворителя, $\text{G}_{\text{с}}$ – массовый расход сырья.

Для расчёта массового расхода пропана на подпитку используется формула 5.

$$\text{G}_{\text{подп}} = \text{G}_{\text{пр.цирк}} * \text{L}_{\text{пр}} \quad (5)$$

Здесь G пр.цирк – массовый расход циркулирующего пропана, $\text{L}_{\text{пр}}$ – потери пропана.

Оценка экономической эффективности рассчитана по формулам 6-13.

Для расчёта капитальных затрат используется формула 6.

$$\text{К}_{\text{общ}} = \text{К}_{\text{обор}} + \text{К}_{\text{смр}} + \text{К}_{\text{пнр}} + \text{К}_{\text{пр}} \quad (6)$$

где $\text{К}_{\text{обор}}$ – суммарная стоимость оборудования, $\text{К}_{\text{СМР}}$ – стоимость строительно-монтажных работ, $\text{К}_{\text{ПНР}}$ – стоимость пуско-наладочных работ, $\text{К}_{\text{пр}}$ – стоимость проектирования.

Для расчёта амортизационных отчислений используется формула 7.

$$\text{А} = \text{К}_{\text{общ}} * \text{Н}_{\text{а}} \quad (7)$$

где $\text{К}_{\text{общ}}$ – капитальные затраты, $\text{Н}_{\text{а}}$ – норма амортизации (На = 10 %).

Для расчета себестоимости используется формула 8.

$$\text{ОР} = \text{С}_{\text{сырье}} + \text{С}_{\text{эн}} + \text{ФОТ} + \text{А} \quad (8)$$

где $\text{С}_{\text{сырье}}$ – стоимость гудрона, $\text{С}_{\text{эн}}$ – стоимость энергоресурсов, ФОТ – фонд оплаты труда, А – амортизационные отчисления.

Для расчёта выручки используется формула 9.

$$\text{В} = \text{G}_{\text{да}} * \text{С}_{\text{да}} + \text{G}_{\text{асф}} * \text{С}_{\text{асф}} \quad (9)$$

где $\text{G}_{\text{да}}$ – массовый расход деасфальтизата, $\text{С}_{\text{да}}$ – стоимость тонны деасфальтизата, $\text{G}_{\text{асф}}$ – массовый расход асфальтита, $\text{С}_{\text{асф}}$ – стоимость тонны асфальтита.

Для расчёта себестоимости продукции используется формула 10.

$$\text{С} = \text{С}_{\text{сырье}} + \text{С}_{\text{эн}} + \text{С}_{\text{проп}} + \text{ФОТ} + \text{А} + \text{С}_{\text{рем}} \quad (10)$$

где $\text{С}_{\text{сырье}}$ – стоимость гудрона, $\text{С}_{\text{эн}}$ – стоимость энергоресурсов, $\text{С}_{\text{проп}}$ – стоимость пропана подпитки, ФОТ – фонд оплаты труда, А – амортизационные отчисления, $\text{С}_{\text{рем}}$ – стоимость ремонтных работ.

Для расчёта налогооблагаемой прибыли используется формула 11.

$$\text{П} = \text{В} - \text{С} \quad (11)$$

где В – годовая выручка, С – себестоимость продукции.

Для расчёта чистой прибыли используется формула 12.

$$\text{Пч} = \text{П} * (1 - \text{налог}) \quad (12)$$

где П – прибыль, налог – налог на прибыль.

Для расчёта срока окупаемости используется формула 13

$$Т_{ок} = \frac{К_{общ}}{Пч} \quad (13)$$

где $К_{общ}$ – капитальные затраты, Пч – чистая прибыль.

Характеристики сырья и продуктов в представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики сырья и продуктов

Показатель	Значение		
	Гудрон	Деасфальтизат	Асфальтит
Плотность при 20 °С, кг/м^3	975-1005	895-905	1080-1120
Условная вязкость $ВУ_{100}$, с	35-55		
Температура размягчения по КиШ, °С		-	18-26
Температура застывания, °С	+38-+45		
Кинематическая вязкость, мм^2/с		14-16	-
Коксуемость по Конрадсону,%	12-14,5	0,8-1,2	45-55
Содержание серы,%	0,6-0,8	0,25-0,35	1,2-1,8
Содержание асфальтенов,%	3,5-5,5	-	25-35
Содержание смол, %	18-22	1,5-2,5	35-42
Содержание металлов(V+Ni), ppm	50-80	<0,5	150-300
Цвет на колориметре ЦНТ, ед.		5-7	-

Основная часть

Материальный баланс установки представлен в таблице 2.

Таблица 2

Материальный баланс

Наименование	% масс.	кг/ч	т/сут	т/год
Сырье				
Гудрон	100,00	75000,00	1800,00	657000,00
Пропан подпитки	0,10	450,00	10,80	3942,00
Итого	100,10	75450,00	1810,80	664,88
Продукты				
Деасфальтизат	48,00	36000,00	864,00	315360,00
Асфальтит	51,5	38625,00	927,00	3383555,00
Потери общие	1,1	825,00	19,80	7227,00
Итого	100,10	75450,00	1810,8	660942,00

Гудрон с АВТ из емкости Е-1 подают насосом Н-1 в подогреватель Т-1, где нагревают до 80 °С, и направляют на верхнюю распределительную тарелку экстрактора К-1. Жидкий пропан подают из ресивера Е-2 насосом Н-2 в нижнюю часть К-1 при температуре 55 °С. Давление в К-1 соответствует 4 МПа. Раствор деасфальтизата с верха К-1 направляют через систему рекуперативных теплообменников Т-2, где нагревают до 115 °С, в сепаратор С-1. Давление в С-1 составляет 4,8 МПа. Раствор деасфальтизата из С-1 направляют в отпарную колонну К-2, где удаляют остатки пропана. Пропан из С-1 направляют в Т-2 для подогрева раствора деасфальтизата, затем он направляется в Е-2.

Деасфальтизат из низа К-2 охлаждают в холодильнике Х-1, смешивают с вакуумным газойлем и направляют на гидрокрекинг. Асфальтит нагревается в печи П-1 до 210 °С и поступает в отпарную колонну К-3. После отпарки пропана асфальтит из нижней части К-2 охлаждают в Х-2, смешивают с гудроном и отправляют на установку замедленного коксования.

Пары пропана из К-2 и К-3 сжимают компрессором ПК-1, а после конденсации в конденсаторе ХК-1 и осушки в адсорбере А-1, направляют в ресивер пропана Е-1.

Сверхкритическая регенерация повышает выход и качество деасфальтизата, экологическую безопасность установки, а также снижает капитальные и операционные затраты.

Экономическое обоснование проекта представлено в таблице 3.

Таблица 3

Оценка экономической эффективности

Показатель	Значение
Капитальные затраты,млн. руб/год	3863,00
Эксплуатационные затраты,млн. руб/год	17906,00
Выручка,млн. руб/год	34820,8
Себестоимость продукции, млн. руб/год	10491,20
Валовая прибыль,млн. руб/год	34217,00
Чистая прибыль,млн. руб	27856,6
Простой срок окупаемости, лет	0,14

Заключение

Спроектированная нами установка позволит производить деасфальтизат, являющийся сырьем гидрокрекинга, а также асфальтит пропановой деасфальтизации, который является компонентом сырья замедленного коксования.

Гидрокрекинг деасфальтизата и вакуумного газойля в соотношении 1:3 позволит получить сырье для производства базовых масел III группы путем гидродепарафинизации и гидрофинишинга. Асфальтит пропановой деасфальтизации необходимо смешивать с гудроном в соотношении 1:3 для повышения качества и выхода нефтяного кокса.

Согласно оценке экономической эффективности проектирование установки сверхкритической деасфальтизации для получения остаточных масел является экономически целесообразным. Сверхкритическая регенерация растворителя позволяет снизить эксплуатационные затраты за счет снижения затрат энергоресурсов на 40 %. Простой срок окупаемости составил менее 2 месяцев из-за высокой стоимости продуктов гидрокрекинга деасфальтизата и коксования смеси гудрона и асфальтита деасфальтизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технологический расчет процесса деасфальтизации гудронов / Р. Р. Фасхутдинов, Л. А. Насырова, Ш. Т. Азнабаев, А. Т. Гильмутдинов. – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. – 101 с. – ISBN 978-5-7831-1273-7. – EDN VDBYJL.

2. Гайфуллина, М. М. Экономика и управление на предприятии (нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности) / М. М. Гайфуллина, Г. З. Низамова. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2021. – 278 с. – (Бакалавриат). – ISBN 978-5-406-07905-8. – EDN DTILTF.

3. Применение сверхкритических флюидов для разделения групповых компонентов нефтяных систем (обзор) / А. В. Припахайло, Р. Н. Магомедов, Л. С. Фотеева, О. В. Шаповалова // Сверхкритические флюиды: теория и практика. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 3-24. – DOI 10.34984/SCFTP.2024.19.4.001. – EDN GMVHUL.

4. Замковой, Н. П. Повышение эффективности работы установки деасфальтизации гудрона пропаном / Н. П. Замковой, Е. В. Подоплелов, А. И. Дементьев // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2019. – № 13. – С. 40-44. – DOI 10.36629/2686-777x-2019-1-13-40-44. – EDN BYLASE.

5. Подземельнов, Ф. И. Повышение эффективности работы установки деасфальтизации гудрона пропаном / Ф. И. Подземельнов, Т. К. Корчагина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 6-2. – С. 224-225. – EDN WGFNDT.

УДК 66.081.63
Федорова Татьяна Евгеньевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Fedorova Tatyana Evgenievna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет
Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ОБОРОТНЫХ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ БЛОКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
OPTIMIZATION OF THE CONTROL FILTRATION PROCESS OF RECYCLE SOLUTIONS USING A PRE-FILTRATION UNIT

Аннотация. В работе рассмотрена проблема быстрого забивания барьерных фильтров при процессе очистки оборотных растворов. Частая замена фильтрующих элементов повышает затраты и снижают качество фильтрата. Предложен способ оптимизации процесса с помощью установки блока предварительной фильтрации. Такая установка задерживает крупные и средние частицы до подачи раствора на установку обратного осмоса через барьерные фильтра. Описана схема блока: корпус с фильтрующими элементами, датчики перепада давления и автоматическая система обратной промывки. Показано, что применение блока предварительной фильтрации увеличивает рабочий цикл барьерных фильтров и снижает эксплуатационные расходы.
Abstract. The paper discusses the problem of rapid clogging of barrier filters during the process of cleaning recycled solutions. Frequent replacement of filter elements increases costs and reduces the quality of the filtrate. A method for optimizing the process is proposed by installing a pre-filtration unit. This unit captures large and medium-sized particles before the solution is fed to the reverse osmosis system through the barrier filters. The paper describes the design of the unit, which includes housing with filter elements, pressure differential sensors, and an automatic backwash system. The use of the pre-filtration unit has been shown to increase the operating cycle of the barrier filters and reduce operational costs.
Ключевые слова: контрольная фильтрация, оборотные растворы, блок предварительной фильтрации, перепад давления, барьерные фильтра, взвешенные частицы.
Key words: control filtration, recycled solutions, pre-filtration unit, pressure drop, barrier filters, suspended particles.

Введение

В оборотных растворах гидрометаллургических и химических производств со временем накапливаются взвешенные вещества - тонкодисперсные фракции руды, коллоидные гидроксиды, продукты коррозии и частицы реагентов. Контрольная фильтрация и очистка оборотных растворов служат конечной стадией очистки перед возвратом раствора в процесс. Однако на практике фильтрующие элементы быстро теряют пропускную способность. Работа на фильтре, достигшем предельного перепада давления, и частые остановки на замену фильтров увеличивают эксплуатационные расходы и снижают качество очищенного фильтрата.

Усложняет ситуацию разнообразие размеров частиц, сохраняющихся в растворе после первичной очистки. Более крупные частицы задерживаются на внешней стороне фильтра, формируя плотную пленку. Микроскопические частицы проникают вглубь пористой структуры фильтра, вызывая внутреннюю закупорку. Эта неоднородность загрязнений приводит к быстрому увеличению гидравлического сопротивления и уменьшению срока службы фильтра. Последовательная замена загрязненного на новый фильтр не решает проблему, поскольку он также быстро теряет эффективность.

В открытой литературе описаны различные механизмы влияния загрязнений на работу фильтров и мембран. Как показано в работе Эрика М.В. Хука, при фильтрации растворов через мембраны обратного осмоса гидравлический перепад давления через слой коллоидных отложений незначителен по сравнению с осмотическим давлением, усиленным этим слоем [1]. Основной причиной снижения потока становится затруднённая обратная диффузия ионов солей внутри коллоидного слоя. Это означает, что даже небольшое количество взвесей, осевших на поверхности фильтра, способно резко ухудшить его работу.

Обоснование необходимости внедрения блока предварительной фильтрации

После контрольной фильтрации фильтрат поступает в емкость осветленного фильтрата, а затем на участок очистки оборотных растворов, оснащённый установками обратного осмоса. Перед установками в схеме предусмотрены барьерные фильтры, предназначенные для защиты мембран от случайных выносов взвешенных частиц.

Практика показывает, что барьерный фильтр забивается быстрее расчётного срока. Крупные частицы образуют плотный слой на поверхности, мелкие закупоривают поры изнутри. Перепад давления достигает предела уже через несколько часов. Аналогично, при загрязнении мембран обратного осмоса перепад давления возрастает с 50-100 до 200 кПа [1]. Прерывание производственного цикла для смены фильтра в системе обратного осмоса дестабилизирует её работу и ведет к повышенному потреблению ресурсов.

Для решения проблемы предлагается установка блока предварительной фильтрации перед барьерным фильтром. Он задерживает частицы >10–20 мкм, снижая нагрузку на барьерный фильтр и увеличивая интервал между его регенерациями. Блок предварительной фильтрации оснащен автоматической обратной промывкой, исключающей ручную замену фильтрующих элементов.

Внедрение блока предварительной фильтрации снижает частоту смены фильтров, сокращает эксплуатационные расходы и повышает надежность защиты мембран обратного осмоса.

Концептуальная схема системы автоматизированного регулирования

На основе анализа существующих технических решений в системах предварительной очистки воды, предшествующих установкам обратного осмоса, предлагается следующая конфигурация блока предварительной фильтрации, предназначенного для защиты барьерных фильтров. В основе системы функционируют три взаимосвязанных контура управления.

Первый контур обеспечивает контроль перепада давления в блоке предварительной фильтрации. Датчик, установленный до и после блока, передает данные на контроллер. При достижении заданного порогового значения контроллер запускает автоматическую обратную промывку. Как отмечается в технической литературе, мониторинг перепада давления на предфильтрах позволяет оперативно выявлять их загрязнение и своевременно проводить замену или регенерацию, предотвращая снижение производительности и потенциальный ущерб основному оборудованию [2, 3]. Промывку осуществляют обратным потоком фильтрата в течение определенного времени. После завершения промывки перепад давления возвращается к нормальному уровню, и блок продолжает работу. Это позволяет избежать остановки технологической линии для замены фильтрующих элементов.

Второй контур предназначен для контроля качества фильтрата, выходящего из блока предварительной фильтрации. В соответствии с отраслевыми стандартами, для надежной защиты мембран обратного осмоса необходимо поддерживать индекс плотности осадка (SDI) ниже 5, а содержание взвешенных веществ – не более 1–3 мг/л [3]. На выходе блока устанавливают датчик мутности или оптический датчик взвешенных частиц. При превышении допустимых значений мутности контроллер переключает поток на байпасную линию или прекращает подачу раствора на барьерный фильтр [4]. Это предотвращает попадание крупных частиц на мембраны обратного осмоса, что критически важно, поскольку механическое и коллоидное загрязнение является одной из основных причин преждевременного выхода мембран из строя.

Третий контур управляет периодичностью и интенсивностью обратной промывки. В отличие от простого запуска промывки при достижении порогового перепада давления, этот контур анализирует накопленную статистику: частоту промывок за смену, динамику изменения перепада давления и общее время работы блока. Алгоритм адаптивно корректирует продолжительность промывки и интервалы между ними. Например, при увеличении частоты промывок контроллер увеличивает длительность промывочного импульса или информирует обслуживающий персонал о необходимости осмотра блока. Такой подход позволяет оптимизировать расход промывочной воды и продлить срок службы фильтрующих элементов блока.

Все элементы блока, контактирующие с раствором, должны быть изготовлены из коррозионно-стойких материалов. В агрессивных химических средах рекомендуют использовать нержавеющую сталь марки 316L или полипропилен [5]. Фильтрующие элементы подбирают с номиналом задержания 10-20 мкм для первой ступени и 1–5 мкм для второй, обеспечивая каскадную очистку и продлевая ресурс финишных барьерных фильтров.

Блок предварительной фильтрации устанавливают на линии между емкостью осветленного фильтрата и барьерным фильтром, непосредственно перед установкой обратного осмоса. Производительность блока должна соответствовать номинальной производительности установки обратного осмоса по питающей воде – 100-400 м³/ч. Поток раствора движется следующим образом: из емкости осветленного фильтрата в блок предварительной фильтрации, затем в барьерный фильтр и, наконец, на установку обратного осмоса. Такая двухступенчатая схема предварительной очистки является стандартной рекомендацией для систем, предъявляющих высокие требования к качеству питающей воды.

Заключение

Анализ доступной информации и существующих технологий показывает, что установка блока предварительной фильтрации перед основными барьерными фильтрами на линии подачи осветленного фильтрата к установкам обратного осмоса — это эффективное и выгодное решение для улучшения качества очистки оборотных растворов и получения пермеата. Этот блок задерживает частицы крупнее 10–20 мкм, тем самым уменьшая нагрузку на барьерный фильтр и предотвращая его быстрое засорение. Автоматическая промывка по перепаду давления исключает частые остановки для замены фильтров. В результате увеличивается срок службы барьерных фильтров, снижается риск загрязнения мембран обратного осмоса и сокращаются расходы на обслуживание.

Данная концепция предварительной фильтрации применима при проектировании и модернизации систем водоподготовки в гидрометаллургической и химической промышленности, где требуется высокое качество воды для установок обратного осмоса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hoek, E.M.V. Colloidal fouling mechanisms in reverse osmosis and nanofiltration / E.M.V. Hoek. – Yale University, 2002. — 358-370.

2. Berg, J.H. Reverse osmosis prefilter system : пат. US11261102B2 США. – Текст : электронный. – URL: https://patents.google.com/patent/US11261102B2/ (дата обр.: 03.04.2026).

3. Davis & Shirtliff. Ultratreatment Membranes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://davisandshirtliff.africa/water-treatment/product/ultratreatment-membranes (дата обр.: 01.04.2026).

4. RO AGUA Water Treatment Solutions. Требования к питательной воде и технологический процесс промышленной системы обратного осмоса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.roagua.com/ru/news/what-are-the-feed-water-requirements-and-process-flow-of-industrial-reverse-osmosis-system/ (дата обращения: 02.04.2026).

5. Маркозов, Д. Ю. Причины коррозии нержавеющей стали / Д. Ю. Маркозов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 4. – С. 136-137. – EDN YOSOWK.

УДК 620.197.3
Федулов Егор Александрович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Fedulov Egor Aleksandrovich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

НЕЙТРАЛИЗАТОРЫ НА УСТАНОВКАХ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ
NEUTRALIZERS AT PRIMARY OIL REFINING PLANTS

Аннотация. В статье рассмотрены основные проблемы применения нейтрализаторов (реагентов для нейтрализации pH среды обведённых потоков нефтепродуктов) на установках первичной переработки нефти, эксплуатируемых в Российской Федерации. Показано влияние индивидуальных химических соединений, входящих в состав нейтрализаторов различных марок, на применяемые при проектировании установок материалы. Сделаны рекомендации по химическим соединениям, входящим в состав нейтрализаторов, для возможности принятия решения при подборе пакета реагентов, применяемых для химико-технологической защиты на нефтеперерабатывающих предприятиях.
Absrtact. This article discusses the main problems of using neutralizers (reagents for neutralizing the pH of the environment of the circled streams of petroleum products) at primary oil refining plants operated in the Russian Federation. The influence of individual chemical compounds, which are part of neutralizers of various brands, on the materials used in the design of installations is shown. Recommendations are made on the chemical compounds included in the neutralizers for the possibility of making decisions when selecting a package of reagents used for chemical and technological protection at oil refineries.
Ключевые слова: нейтрализаторы, реагенты для нефтепереработки, защита конденсационно-холодильного оборудования, коррозия верхнего слоя.
Keywords: neutralizers, reagents for oil refining, protection of condensation and refrigeration equipment, top-tray corrosion.

Введение

Нейтрализаторы – это группа реагентов, применяемых на установках первичной переработки нефти, для защиты от коррозии ряд участков технологической схемы, на которых возможно протекание коррозии с динамикой снижения толщины стенок трубопроводов и аппаратов более чем на 0,1 мм/год. Химико-технологические мероприятия применяются на установках любой производительности, при всех типах перерабатываемых нефтей. Изменяется лишь дозировка реагентов. Для каждой установки и конкретных условий разрабатывается свой технологический регламент или технологическая инструкция в зависимости от свойств нефти. Точная дозировка реагентов определяется непосредственно на НПЗ на основании результатов опытных пробегов для конкретных условий. pH среды следует поддерживать на нейтральном уровне, либо слабощелочной.

Для защиты от коррозии оборудования конденсационно-холодильного узла, верхней части корпуса и элементов тарелок эвапоратора, атмосферной колонны в условиях конденсации влаги одновременно с процессом защелачивания нефти применяется аминирование среды. Для этого, в зависимости от режима аппарата, нейтрализующий реагент вводится в верхние погоны или в линию острого орошения. Нейтрализатор вводится в шлемовую линию ректификационной колонны, если во время работы отсутствуют условия для конденсации влаги и протекания электрохимической коррозии (т.е. когда температура в верхней части колонны выше «точки росы» не менее, чем на 5°С). Подача нейтрализатора может осуществ-

ляться как непрерывно, так и периодически, в зависимости от показателя pH среды измеренного поточным анализатором [1-3].

Материалы и методы

Для исследования коррозионного воздействия аминов на конструкционные материалы конденсационно-холодильного оборудования был применен метод оценки коррозионной активности углеводородов в условиях конденсации. Данный метод имитирует работу атмосферной колонны и ее конденсационной системы за счет процессов испарения и конденсации низкокипящих углеводородных фракций модельной среды.

Коррозионная активность сталей и латунного сплава оценивалась по скорости коррозии металлических образцов-свидетелей, помещенных в модельную среду состава: Нефрас С2 80/120 (ТУ 38.401-67-108-92) – 95% масс, вода дистиллированная по ГОСТ 6709-72 – 4% масс., амин – 1 % масс. Температура испытания составляла 100°С при атмосферном давлении, продолжительность испытаний с момента конденсации паров на образцах - шесть часов. Скорость коррозии образцов-свидетелей определялась гравиметрическим методом.

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены результаты скорости коррозии сталей и латунного сплава в среде, моделирующей технологический поток шлемовой линии атмосферной колонны с массовым содержанием амина – 1% и результаты исследований термической деструкции аминов с образованием аммиака.

Таблица 1

Коррозионные испытания конструкционных материалов в присутствии аминов

Объект исследования	Скорость коррозии, мм/год			Масса образовавшегося аммония, г	Вероятность разложения амина
	Ст.20	08Х18Н10Т	Л63М		
Морфолин	0,09	0,005	0,257	0,00003	не разлагается
3-Метоксипропиламин	0,05	0,005	0,156	0,00006	не разлагается
Моноэтаноламин	0,04	0,016	0,320	0,00007	не разлагается
Циклогексиламин	0,10	0,037	0,301	0,00014	не разлагается
Этилендиамин	0,22	0,069	0,479	0,00012	не разлагается
Диметиламинопропиламин	0,04	0,011	0,159	0,00010	не разлагается
Аммиак	0,08	0,021	0,356	-	-
Нормативные значения	не более 0,01			-	-

Из приведенных результатов следует:

- диметиламинопропиламин, моноэтаноламин, 3-метоксипропиламин, аммиак, морфолин и циклогексиламин безопасны по отношению к стали марки Ст.20. Данные амины могут быть включены в состав нейтрализаторов, применяемых для ХТЗ конденсационно-холодильного оборудования, выполненного из углеродистых сталей.

- диметиламинопропиламин, 3-метоксипропиламин, морфолин безопасны по отношению к легированной стали марки 08Х18Н10Т и могут быть включены в состав нейтрализаторов, применяемых для ХТЗ конденсационно-холодильного оборудования, выполненного из легированной нержавеющей стали марки 08Х18Н10Т.

- все амины являются коррозионно-агрессивны для аппаратов, выполненных из сплава марки латунь.

Критерием безопасности применения аминов в составе нейтрализаторов является недопустимость осаждения твердых солей гидрохлоридов аминов в шлемовой линии атмосферной колонны при технологических параметрах работы конденсационно-холодильного оборудования. Согласно расчетам, аммиак и моноэтаноламин являются потенциально опасными химическими реагентами, применение которых при любых технологических параметрах системы приведет к образованию твердых солей на поверхности трубопроводов и обору-

дования. Точка соли морфолина, этилендиамина и диметиламинопропиламина выше точки конденсации воды, что будет способствовать образованию солей в конденсационно-холодильном оборудовании. 3-Метоксипропиламин и циклогексиламин даже в жестких (высокая концентрация хлоридов [4] и большой удельный расход нейтрализатора при низком содержании воды) условиях работы колонн установки ЭЛОУ-АВТ-3 ООО «РН-Комсомольский НПЗ» имеют запас по температуре фазового перехода и не образуют отложений.

Следовательно, 3-метоксипропиламин и циклогексиламин являются безопасными для работы конденсационно-холодильного оборудования атмосферных колонн установок АВТ. Морфолин и диметиламинопропиламин являются условно безопасными. Их применение возможно, если на установке будет внедрена схема водной промывки. Этилендиамин, моноэтаноламин и аммиак являются потенциально опасными (в части образования твердых отложений) и не могут быть использованы в составе нейтрализующих реагентов. Все исследованные амины являются термически стабильными (могут применяться в составе нейтрализаторов без угрозы термического разложения с образованием аммиака).

Согласно ASTM D3948, химические вещества, снижающие светопропускание ниже 80 баллов, обладают поверхностно-активными свойствами и эмульгируют систему. Результаты исследований процесса отделения воды от углеводородов в присутствии аминов приведены в Таблице 2. Без добавления амина светопропускание принято за 100 баллов.

Таблица 2

Влияние аминов на разделение фаз вода – углеводороды

Объект исследования	Оценка светопропускания, балл	Влияние на разделение фаз вода-углеводороды
Морфолин	94	не влияет
3-Метоксипропиламин	82	не влияет
Моноэтаноламин	87	не влияет
Циклогексиламин	54	препятствует отделению воды
Этилендиамин	94	не влияет
Диметиламинопропиламин	59	препятствует отделению воды
Аммиак	99	не влияет

Согласно результатам исследований морфолин, 3-метоксипропиламин, моноэтаноламин, этилендиамин и аммиак не влияют на процесс отделения воды от бензиновой фракции и являются в этом качестве безопасными, а циклогексиламин и диметиламинопропиламин способствуют накоплению воды в сырье установок гидроочистки бензинов.

Результаты исследования распределения аминов бензиновой фракции и измерение нейтрализующей способности и буферности аминов представлены в таблице 3.

Морфолин, 3-метоксипропиламин, моноэтаноламин, этилендиамин, деметиламинопропиламин, аммиак являются безопасными соединениями с точки зрения распределения и не содержатся в бензиновых фракциях. Циклогексиламин, вследствие частичного перераспределяться в углеводородную фазу, остается в сырье установок гидроочистки. Наиболее эффективными аминами, сочетающими низкую буферность и низкую нейтрализующую способность (расход), являются 3-метоксипропиламин, морфолин, диметиламинопропиламин и этилендиамин. Моноэтаноламин, аммиак и циклогексиламин не эффективны с точки зрения расхода и его корректировки.

Таблица 3

Распределение аминов в двухфазной системе вода – углеводороды

Объект исследования	Коэффициент распределения		Нейтрализующая способность, кг/г-экв	Буферность, ед. pH
	нефрас-вода, Knw, ед.	октанол-вода, Kow, ед.		
Морфолин	0	0,113	0,088	9,1
3-Метоксипропиламин	0	0,35	0,089	7,1
Моноэтаноламин	0	0,05	0,061	16,9
Циклогексиламин	0,97	19,80	0,101	13,5
Этилендиамин	0	0,04	0,030	10,9
Диметиламинопропиламин	0	0,35	0,051	10,5
Аммиак	0	0	0,100	12,9

Заключение об эффективности и безопасности нейтрализующих аминов

3-Метоксипропиламин является самым безопасным и эффективным амином из числа исследованных. Рекомендуется к использованию в составе нейтрализаторов.

Морфолин – безопасный и эффективный амин. Рекомендуется к применению в том случае, если термодинамический расчет работы конкретной колонны исключает вероятность образования твердых отложений.

Диметиламинопропиламин не рекомендуется к применению в составе нейтрализаторов. Это соединение способствует образованию в конденсационно-холодильном оборудовании твердых солей и накоплению воды в бензиновых фракциях.

Циклогексиламин не рекомендуется к применению в составе нейтрализаторов. Этот амин обладает высокой коррозионной агрессивностью по отношению к нержавеющим сталям, способствует удержанию воды в бензинах и накапливается в углеводородных фракциях. Также циклогексиламин неэффективен с точки зрения расхода и его корректировки.

Этилендиамин не рекомендуется к применению в составе нейтрализаторов вследствие высокой коррозионной агрессивности и образования твердых солей.

Моноэтаноламин является потенциально опасным амином и должен быть запрещен к применению в качестве активного компонента нейтрализаторов.

Аммиак является потенциально опасным веществом и должен быть запрещен к применению в качестве нейтрализатора.

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Scattergood G.L., Ferguson S. Method of reducing corrosion and corrosion byproduct deposition in a crude unit. US11326113B2, 2019. **https://patents.google.com**
2. Lessard R.B., Fearnside P. On-line acid monitor and neutralizer feed control of the overhead water in oil refineries. US5302253A, 1994.
3. Banks R.H., Ciota S.R., Welz S.J. Method for determination of system parameters for reducing crude unit corrosion. US9453798B2, 2016. https://patents.google.com
4. Pauly J.-F., Roussel G. Procedure for the continuous analysis of the chloride ions present in the overhead waters of a hydrocarbon distillation column. US4942133A, 1990.

УДК 621.9:519.8
Фью Сет Аунг, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Phyo Set Aung, Postraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Башков Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bashkov Oleg Viktorovich, Doctor of Sciences in Technology, Professor, Head of the department "Chemistry and Materials Science", Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 15-5 PH С РАЗЛИЧНЫМ СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ
STUDY OF INFORMATIVE ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS FOR EVALUATING THE CYCLIC DURABILITY OF 15-5 PH STAINLESS STEEL SPECIMENS WITH DIFFERENT SURFACE CONDITIONS

Аннотация. В работе представлены результаты анализа информативных параметров АЭ в образцах стали 15-5 PH, подвергнутых циклическим испытаниям на усталость. Целью исследования является изучение информативных параметров АЭ для оценки усталостной долговечности при циклическом нагружении образцов стали 15-5 PH, что имеет важное значение для прогнозирования остаточного ресурса и обеспечения безопасности технических систем. Метод акустической эмиссии (АЭ) широко применяется для изучения механизмов роста усталостных трещин и прогнозирования разрушения материалов. Установлено, что полировка поверхности стали 15-5 PH способствует увеличению долговечности и снижению финальной длины макротрещины примерно на 30 % при одинаковом значении падения частоты резонансных колебаний, а также изменяет энергетические параметры регистрируемых сигналов АЭ. Это дает возможность использовать выявленные частотно-энергетические характеристики для прогнозной оценки остаточного срока эксплуатации критически важных деталей.
Abstract. The paper presents the results of the analysis of informative AE parameters in 15-5 PH steel samples subjected to cyclic fatigue tests. The aim of the study is to study the informative parameters of AE for assessing fatigue life during cyclic loading of 15-5 PH steel samples, which is important for predicting the remaining life and ensuring the safety of technical systems. The acoustic emission (AE) method is widely used to study the mechanisms of fatigue crack growth and to predict the destruction of materials. It has been found that polishing the surface of 15-5 PH steel increases durability and reduces the final length of the macrocrack by about 30 % with the same frequency drop of resonant vibrations. It also changes the energy parameters of the recorded AE signals. This makes it possible to use the identified frequency and energy characteristics for predictive evaluation of the remaining service life of critical components.
Ключевые слова: распространение трещин, усталость, сталь 15-5 PH, акустическая эмиссия, усталостное повреждение.
Key words: crack propagation, fatigue, 15-5 PH steel, acoustic emission, fatigue damage.

Введение

Состояние поверхности и состав материалов могут влиять на долговечность и надежность при сопротивлении внешним нагрузкам. В настоящее время механические свойства материалов должны быть высокого качества, чтобы использовать их в современных промышленных областях с развитием технологий [1, 2]. Нержавеющая сталь 15-5 PH обладает такими свойствами, как высокая прочность, устойчивость к ржавчине (хорошая коррозионная стойкость) и долговечность, поэтому она широко используется во многих областях промышленности. В частности, для изготовления структурных элементов самолетов, компонентов двигателей, компонентов ядерных реакторов, соединений нефте и газопроводов, компонентов, подверженных воздействию химических веществ, медицинских хирургических инструментов и т.д.

Методика испытания

Перед экспериментом мы подготовили полированные и неполированные образцы, чтобы получить корректные результаты эксперимента. Затем образец устанавливали на машину для циклических усталостных испытаний, оснащенную бесконтактным электромагнитным устройством привода. Испытание образцов проводили в условиях резонансных колебаний, частота которых определялась геометрией и упругими свойствами материала образцов. Факт начала развития магистральной трещины определяли по снижению резонансной частоты колебаний. Для регистрации сигналов АЭ пьезоэлектрический датчик (GT301) устанавливали на фиксированную часть образца и соединяли с компьютером через усилитель сигнала. Перед началом эксперимента были проведены необходимые процедуры измерения размеров и шероховатости поверхности образцов.

Результаты

Начальная частота резонансных колебаний образцов находилась в пределах 59-61 Гц. Различие в частоте резонансных колебаний объясняется небольшими различиями в точности изготовления, которые являлись индивидуальностью каждого образца. Испытание останавливали при достижении падения частоты резонансных колебаний на ~ 6,5-7,5 Гц. Особенности микроструктуры стали 15-5 PH оказывают определяющее влияние на характер её усталостного разрушения, что обусловливает необходимость детального исследования информативных параметров акустической эмиссии для оценки стадий накопления повреждений [3].

В результате анализа кинетики разрушения неполированного образца было установлено, что состояние поверхности оказывает существенное влияние на параметры АЭ (рис. 1).

Для неполированного образца длина магистральной трещины составила 1,705 мм (табл. 1). Комплексный анализ данных АЭ стали 15-5 PH разделил процесс разрушения на четыре основные стадии. Начальный этап ($t < 887$ с) характеризуется зарождением пластических деформаций и дислокационной активностью, что выражается в широком распределении частотных параметров на рис. (2,в). Последующий период ($877 \text{ с} < t < 3390$ с) демонстрирует отсутствие новых повреждений, что подтверждается горизонтальным участком на кривой суммарного счета АЭ (рис. 1). Переход к активному росту макротрещины ($3390 \text{ с} < t < 3772$ с) сопровождается резким увеличением активности АЭ и концентрацией сигналов в области высоких значений коэффициента K_f, что показано на рисунке (2,в). На финальном стадии ($3772 \text{ с} < t < 3808$ с) показано аномальное увеличение амплитуды сигналов (свыше 200 мВ), вызванное механическими воздействиями магнита в испытательном устройстве, что классифицируется как высокоэнергетический акустический шум.

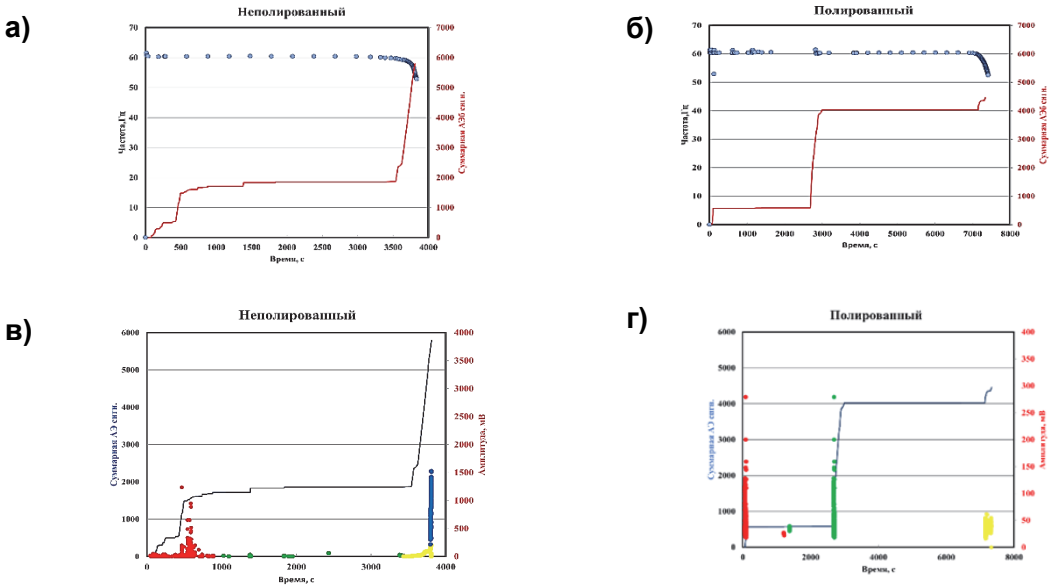


Рис. 1. Диаграммы зависимости суммарной АЭ (N) и частоты колебаний образца (а, б) и диаграммы зависимости суммарной АЭ (N) и амплитуды (в, г)

Таблица 1.

Результаты испытаний на усталость образцов стали 15-5 PH

Образец	Напряжение (MPa)	Nкон, циклов	$f_{нач}$ (Гц)	$f_{кон}$ (Гц)	Длин.трещ, мм	R_a μm
Неполированный	700	229159	60.08	53.58	1.705	0.786
Полированный	700	291156	59.56	52.47	1.175	0.264

Испытание полированного образца демонстрирует более высокое сопротивление развитию усталостных повреждений, о чем свидетельствует меньшая конечная длина трещины 1,175 мм. Кинетика накопления повреждений в полированном образце стали 15-5 PH характеризуется более высокой стабильностью и длительным инкубационным периодом по сравнению с необработанным образцами. На начальном этапе (t < 1383 с) фиксируются процессы дислокационной активности и зарождения первичных микротрещин, что отражается в стабильных частотных показателях на рисунке (2,г). В диапазоне времени 1383 с < t < 3000 с наблюдается замедленное развитие микродефектов, что подтверждается отсутствием резких скачков на кривой суммарного счета АЭ (рис. 1). Переход в состояние макроразрушения и активного распространения трещины (t > 3000 с) сопровождается сжатием диапазоне частот регистрируемых сигналов, смещением спектра в область частот 250-300 кГц, что хорошо видно на рисунке (2,б). При этом общая активность АЭ и уровень RMS остаются значительно ниже, чем при испытании неполированных образцов, что указывает на значительный эффект влияния полировки поверхности на замедление процесса наступления усталостного разрушения [4, 5].

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что состояние поверхности оказывает существенное влияние на характер накопления усталостных повреждений в стали 15-5 PH. Сравнительный анализ показал, что полировка поверхности позволяет увеличить долговечность образцов при одинаковой амплитуде напряжения цикла σ_a=700 МПа в сравнении с неполированными образцами более чем в 2 раза. Кроме того, финальная длина магистральной трещины полированного образца меньше длины неполированного образца примерно на 30% при близких значениях частоты резонансных колебаний на 6,50-7,49 Гц. Комплексное использование временных, энергетических и частотных характеристик регистрируемых сигналов АЭ позволяет идентифицировать стадии дислокационной активности, микротрещин и финального разрушения, что подтверждает эффективность метода для мониторинга состояния высокопрочных сталей.

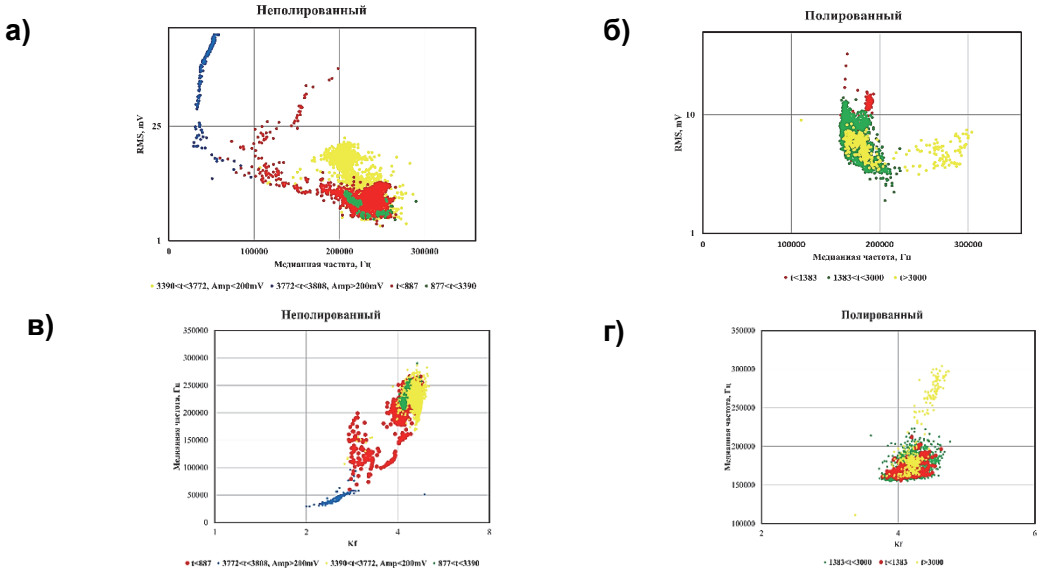


Рис. 2. Диаграммы RMS - Медианная частота (а,б) и Медианная частота-Kf- (в,г)

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 24-29-00838). Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Новые материалы и технологии» на базе ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Acoustic emission analysis of fatigue damages of titanium alloys / O. V. Bashkov, A. A. Popkova, Y. P. Sharkeev [et al.] // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017 (AMHS'17), Tomsk, 09–13 октября 2017 года / Edited by Victor E. Panin, Sergey G. Psakhie and Vasily M. Fomin. Vol. 1909. – Tomsk: AIP Publishing, 2017. – P. 020012. – DOI 10.1063/1.5013693. – EDN XXEKUP.

2. Бао, Ф. Усталостное разрушение алюминиевого сплава 1163 с различной морфологией оксидного покрытия / Ф. Бао, Л. Люй, О. В. Башков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – Т. 20, № 1(229). – С. 3-7. – DOI 10.36652/1813-1336-2024-20-1-3-7. – EDN YQLZIS.

3. Структура и разрушение стали 1.45.40 (15-5 PH) при циклическом нагружении образцов, полученных лазерной 3D печатью / Н. В. Казанцева, О. В. Башков, Ю. Н. Коэмец [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 12(834). – С. 65-71. – DOI 10.30906/mitom-2024-12-65-71. – EDN EEHQDR.

4. Fatigue failure stages of VT1-0 titanium in different structural states. Study by acoustic emission method / O. V. Bashkov, Yu. P. Sharkeev, S. V. Panin [et al.] // AIP Conference Proceedings : Proceedings, Tomsk, Russia, 19–23 сентября 2016 года. Vol. 1783. – Tomsk, Russia: AIP Publishing, 2016. – P. 020013. – DOI 10.1063/1.4966306. – EDN SIHNQL.

5. Сапожник, К. Р. Влияние сверхмногоцикловой нагрузки на структуру и микротвёрдость стали 45 / К. Р. Сапожник, И. Ч. Божоев, О. В. Башков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 1(65). – С. 116-122. – DOI 10.17084/20764359-2023-65-116. – EDN LLUPMY.

УДК 621.542

Хисамиев Руслан Рамилевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Khisamiev Ruslan Ramilevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОДЕТАНДЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ
IMPROVEMENT OF TURBOEXPANDER DESIGN FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF GAS PROCESSING EQUIPMENT

Аннотация. Целью работы является обнаружение основных конструктивных недостатков турбодетандеров и разработка направлений их устранения для повышения надёжности и энергоэффективности газоперерабатывающего оборудования. Предметом исследования послужили механические узлы турбодетандера (рабочее колесо, подшипниковые опоры, уплотнительная система). В ходе работы выполнен анализ причин снижения эффективности: износ деталей, вибрационные нагрузки, аэродинамические и механические потери. Результатом исследования стали предложения по оптимизации геометрии рабочего колеса, применению современных подшипников с улучшенной системой смазки и использованию торцевых уплотнений. Практическая значимость заключается в снижении энергопотерь, увеличении межремонтного ресурса и повышении безопасности эксплуатации.

Abstract. The aim of the work is to identify the main design drawbacks of turboexpanders and to develop directions for their elimination in order to increase the reliability and energy efficiency of

gas processing equipment. The subject of the study includes the mechanical units of the turboexpander (impeller, bearing supports, sealing system). The analysis of efficiency loss causes (wear of parts, vibration loads, aerodynamic and mechanical losses) is carried out. The results include proposals for impeller geometry optimisation, application of modern bearings with improved lubrication system, and use of mechanical seals. The practical significance lies in reducing energy losses, increasing overhaul life and improving operational safety.
Ключевые слова: турбодетандер, рабочее колесо, подшипниковые узлы, вибрация, газопереработка, торцевые уплотнения, износостойкость.
Key words: turboexpander, impeller, bearing assemblies, vibration, gas processing, mechanical seals, wear resistance.

Введение

Турбодетандеры являются ключевым элементом газоперерабатывающих предприятий и газораспределительных станций, обеспечивая снижение давления природного газа с одновременной выработкой механической или электрической энергии. Согласно данным, использование детандер-генераторных агрегатов позволяет утилизировать до 30–40 % перепада давления, что даёт значительный экономический эффект. Однако надёжность и эффективность турбодетандера напрямую зависят от состояния его механических узлов: рабочего колеса, подшипников и уплотнений.

Анализ литературных источников показывает, что основные усилия исследователей направлены на термодинамическое совершенствование проточной части. При этом вопросам повышения механической надёжности уделяется недостаточно внимания. В работах рассмотрены общие подходы к вибродиагностике и оценке износа, но отсутствуют системные рекомендации по модернизации конструкции именно турбодетандеров.

Таким образом, белым пятном остаётся комплексное влияние износа подшипниковых узлов, геометрии рабочего колеса и качества уплотнений на общую эффективность агрегата. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения аварийности и энергопотерь на газоперерабатывающих производствах.

Совершенствование конструкции турбодетандера путём оптимизации геометрии рабочего колеса, выбора современных подшипников и уплотнений являлась целью данной работы. Для достижения цели решены следующие задачи:

1. выполнить анализ наиболее нагруженных узлов и причин снижения КПД;
2. предложить конкретные конструктивные изменения;
3. оценить ожидаемый эффект от предложенных решений.

Материалы и методы

Исследование проведено на основе анализа типовых конструкций турбодетандеров, применяемых на газораспределительных станциях (производительность 10–50 тыс. м³/ч, давление на входе 3–6 МПа, температура газа – от –50 до +20 °С). В качестве объекта рассмотрен одноступенчатый радиально-осевой турбодетандер с газостатическими подшипниками.

Методика анализа включала расчёт аэродинамических потерь в рабочем колесе методом конечных элементов (с использованием ANSYS CFX), оценку вибрационных характеристик подшипниковых узлов по методике, а также анализ износа уплотнительных элементов с применением модели Архиарда.

Для сравнения приняты два варианта конструкции: базовый (стандартное колесо, подшипники качения, лабиринтные уплотнения) и предлагаемый (оптимизированная геометрия колеса, газостатические подшипники, торцевые уплотнения). Сравнение проводилось по критериям: механический КПД, ресурс до капитального ремонта, уровень вибраций.

Результаты

В результате численного моделирования установлено, что оптимизация геометрии рабочего колеса (увеличение угла выхода лопаток с 30° до 45°, скругление входной кромки) позволила снизить аэродинамические потери на 12 % (с 8,4 % до 7,4 % от подведённой энергии). Применение газостатических подшипников с внешним наддувом уменьшило механические

потери на трение на 18 % по сравнению с подшипниками качения. Уровень вибраций снизился с 4,2 мм/с до 1,8 мм/с (согласно нормам, допустимый уровень – до 4,5 мм/с). Торцевые уплотнения с карбидокремниевыми кольцами сократили утечки газа с 2,1 % до 0,6 % от расхода. В таблице 1 приведены сравнительные данные по ресурсу основных узлов.

Таблица 1.

Прогнозируемый ресурс узлов турбодетандера для базовой и предлагаемой конструкции

Узел	Базовый вариант, час	Предлагаемый вариант, час	Увеличение ресурса, %
Рабочее колесо	24 000	36 000	+50
Подшипниковый узел	12 000	28 000	+133
Уплотнительная система	8 000	20 000	+150

Обсуждение результатов

Полученные данные согласуются с результатами [1-5], где также отмечается эффективность применения газостатических подшипников и торцевых уплотнений. Однако, в настоящем исследовании впервые показан синергетический эффект от одновременной модернизации всех трёх узлов – снижение вибраций (благодаря подшипникам) дополнительно уменьшает износ уплотнений и рабочего колеса. Отметим, что предлагаемые решения требуют также более сложной системы подачи газа для газостатических подшипников, что увеличивает первоначальную стоимость агрегата примерно на 15–20 %. Также не рассматривались вопросы эрозионного износа при наличии твёрдых частиц в газе.

Тем не менее, полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что комплексная модернизация механической части турбодетандера позволяет повысить общую эффективность газоперерабатывающего оборудования и увеличить межремонтный период в 1,5–2 раза.

Заключение

В результате проведённого исследования были выявлены основные конструктивные недостатки турбодетандеров, а именно, высокий износ подшипников качения, значительные утечки через лабиринтные уплотнения и неоптимальная геометрия рабочего колеса.

В качестве направлений совершенствования предложены оптимизация геометрии колеса, замена подшипников качения на газостатические и внедрение торцевых уплотнений. Показано, что предлагаемые решения позволяют снизить механические потери на 12–18 % и утечки газа до 0,6 %, увеличить ресурс узлов в 1,5–2,5 раза.

Ограничения работы связаны с отсутствием экспериментальных испытаний натурного образца. Дальнейшие исследования предполагают создание опытного образца и его стендовую апробацию. Полученные рекомендации могут быть использованы при модернизации существующих турбодетандеров и проектировании новых агрегатов для газоперерабатывающих заводов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Старчукова, И. В. Применение методов вибродиагностики для контроля за состоянием оборудования химической промышленности / И. В. Старчукова // In Situ. – 2015. – № 4. – С. 48-50. – EDN VCHZTP.

2. Диагностика и техническое обслуживание машин / Сибирский научно-исследовательский институт механизации, электрификации сельского хозяйства, СО ВАСХНИЛ. – Новосибирск : Западно-Сибирское книжное издательство, 1972. – 239 с. – (Научные труды ; Выпуск 8, Часть 1). – EDN UJPPAZ.

3. Максимов, И. Г. Надежность систем мониторинга активного оборудования / И. Г. Максимов, В. Н. Астапов, Л. И. Второва // Международный студенческий научный вестник. – 2024. – № 6. – С. 44. – EDN BBHUSJ.

4. Галдин, В. Д. Основы теории и опыт создания теплохладоэнергетических агрегатов / В. Д. Галдин, В. И. Гриценко. – Омск : Омский государственный технический университет, 2013. – 176 с. – ISBN 978-5-8149-1651-8. – EDN SBLJTB.

5. Зацепин, С. С. Применение турбодетандерных установок на газораспределительных станциях / С. С. Зацепин, С. М. Купцов // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 12. – С. 50-53. – EDN XEKFVV.

УДК 662.7
Челомбитько Мария Андреевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Chelombitko Maria Andreevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Проценко Александра Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Protsenko Alexandra Nikolaevna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ИСТОРИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА
THE HISTORY OF MOTOR FUEL

Аннотация. Работа посвящена изучению различных видов автомобильного топлива. Проанализирована история развития автомобильного транспорта и применения для него различных фракций нефти как топлива. В ходе работы рассмотрено использование в качестве автомобильного топлива бензина и дизельного топлива, а также их аналогов: этанола, керосина и др. Указаны технологии производства различных видов биотоплива.
Abstract. The work is devoted to the study of various types of automobile fuel. The history of the development of motor transport and the use of various fractions of oil as fuel for it is analyzed. In the course of the work, the use of gasoline and diesel fuel as automobile fuel, as well as their analogues: ethanol, kerosene, etc. The production technologies of various types of biofuels are indicated.
Ключевые слова: нефть, топливо, альтернативные источники энергии, двигатель, бензин.
Key words: oil, fuel, alternative energy sources, engine, gasoline.

Введение

С самого начала истории человечества, люди всегда стремились к созданию новых источников энергии, которые могли бы облегчить их жизнь и сделать ее более комфортной. По определению Д.И. Менделеева, «топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения теплоты». Сейчас термин «топливо» распространяется на все материалы, служащие источником энергии.

Органическое топливо - уголь, нефть и природный газ - составляет подавляющую часть всего энергопотребления. Всё это топливо имеет углеродную основу, и энергия высвобождается из него, главным образом, в процессе образования диоксида углерода.

Основная часть

Нефть привлекала внимание жителей различных регионов: арабы использовали ее для освещения и получения горючего, а китайцы - для обогрева. В Средневековье арабские ученые разработали методы перегонки нефти и провели исследования. На Западе нефть долгое время игнорировалась, однако в период Возрождения и Средневековья были найдены технологии, которые приблизили срок появления бензина. В частности, была изобретена технология дистилляции. Нефть использовали как смазку и для освещения, она также применялась в медицине.

Сегодня нефть стоит у истоков мировой экономики, и трудно представить нашу повседневную жизнь без неё, ведь она является источником топлива, энергии и множества других продуктов. До XVIII века в основном использовалась сырая нефть. Первые сведения о перегонки нефти относятся к X веку нашей эры, но продукты перегонки не получили распространения. Первый завод по очистке нефти построили на Ухтинском нефтяном промысле в 1745 г., именно там проводили технологические манипуляции с нефтью. Очищенную нефть использовали преимущественно в бытовых целях: многие помещения освещались лампадами, в которые наливалась смесь растительного масла и очищенной нефти [1].

Годом появления бензина принято считать 1825 год, когда Майкл Фарадей выделил углеводородную смесь с высокими воспламеняющимися свойствами из нефти.

Керосин стал популярным после открытия А. Геснера в 1850-х годах и заменил более дорогой китовый жир как источник света и энергии. На 1859 год в США действовало около 33 фабрик по переработке нефти, началась активная разработка скважин.

В XIX веке бензин начали использовать в качестве топлива для примусов после того, как в нескольких странах был введен запрет на использование керосина из-за его высокой пожароопасности. Тем не менее, по масштабам распространения бензин все еще уступал другим видам топлива и был не самым популярным нефтепродуктом - города освещались масляными и керосиновыми лампами, и именно на масло и керосин был основной спрос. Ситуация изменилась с развитием двигателей внутреннего сгорания.

Готлиб Даймлер усовершенствовал двигатель для работы на бензине в конце 1880-х годов. К 1910 году спрос на бензин значительно возрос по сравнению с другими нефтепродуктами, так как автомобили становились все более популярными. В 1891 году Владимир Шухов получил патент на метод переработки нефти, путем разложения тяжелых углеводородов на более легколетучие вещества – крекинг, который позволял выделять больше бензина за один цикл [2]. На данный момент бензин является одним из самых распространенных видов топлива, и его производство продолжает расти.

Альтернативой бензину стало дизельное топливо. Понятие «дизельное топливо» произошло от названия двигателя - изобретения немецкого инженера Рудольфа Дизеля. В настоящий момент под дизельным топливом (соляровое масло) понимают жидкий продукт, использующийся как топливо в дизельном двигателе. Первый такой двигатель работал на керосине. Дизельное топливо двигатель стал потреблять по разработке Эммануила Нобеля. На машиностроительном заводе Нобеля в Петербурге переработали двигатель, и тот стал работать на сырой нефти, а позже на соляровом масле.

В настоящее время появляется все больше видов альтернативных источников энергии для автомобилей, но поиск альтернатив бензину и дизелю был и в начале двадцатого века. На самой заре автомобилестроения спирт и растительное масло едва не вытеснили углеводородные соединения. Первая попытка применения биотоплива была предпринята Генри Фордом в 1908 году при выпуске в продажу Model T- этот автомобиль мог работать на бензине, этаноле или их смеси.

Сейчас в мире вновь четко прослеживается тенденция перехода на биотопливо. Наиболее перспективные его виды - этанол и биодизель. Из всех производимых сегодня в мире машин 17 % могут работать только на этаноле, а 70 % - на смеси Е85 (85 $\%_{об}$ этанола и 15 $\%_{об}$ бензина). При этом абсолютно все автомобили могут эффективно работать на бензине с добавлением 10-15 $\%_{об}$ этанола [3].

Особое место в качестве альтернативы углеводородным топливам занимает электричество. Самыми проверенными и надежными на данный момент считаются гибридные автомобили. Они обладают системой из двух двигателей - электрического и бензинового, которые работают попеременно или вместе. Пока работает бензиновый двигатель, заряжается аккумулятор. Полный же переход на электромобили подразумевает использование мощных аккумуляторов, энергия которых идет на работу двигателя. Но и у таких автомобилей есть свои недостатки: при частой подзарядке батареи довольно быстро приходят в негодность, а утилизация большого количества аккумуляторов ведет к огромному ущербу окружающей среде.

Ещё одним вариантом, способным заменить бензин, является водород. Есть топливные элементы, которые способны удерживать этот газ и передавать его непосредственно двигателю, где происходит столкновение водорода с кислородом. В результате выделяется большое количество тепла, которое переводится в работу. Идет выработка электрического тока, который запускает двигатель [4].

Инженеры японской компании Genepax разработали прототип двигателя, работающий на воде. В основе этого двигателя лежит электролизер, расщепляющий воду на кислород и водород, а затем используется тот же принцип, что и в водородном двигателе – столкновение

водорода с кислородом. Дальнейшее развитие проекта не состоялось ввиду дороговизны разработки [3].

В прошлом веке уголь занимал доминирующее положение в качестве энергетического ресурса, обеспечивая примерно 80 % всей потребляемой энергии. Однако со временем его роль уменьшалась, уступая место нефти. Добыча нефти была в десятки раз более экономичной по сравнению с углем, а её перевозка по трубопроводам обеспечивала высокую скорость и надежность. Тем не менее, при поиске замены нефтепродуктам, уголь также рассматривали как автомобильное топливо. Технология производства такого топлива не отличается особой сложностью: уголь разлагают, при этом выделяется смесь горючих газов. Затем эту газовую смесь охлаждают, очищают от примесей золы и смешивают с воздухом, после чего смесь уже направляется в камеру сгорания двигателя. В США заводы по преобразованию угля в жидкое транспортное топливо применяют технологии связывания углерода. У этой технологии есть существенные недостатки – большой расход сырья при производстве и увеличение выбросов углекислого газа при сжигании топлива [1].

Еще одной альтернативой традиционным видам автомобильного топлива является природный газ. В 30-е годы XIX века был создан двигатель, работающий на газо-воздушной смеси, однако, с изобретением автомобиля предпочтение было отдано бензину. Снова попытки применять газ как автомобильное топливо были предприняты только в 30-е годы XX века, во время нефтяного кризиса. Сначала были разработаны газогенераторные двигатели, топливом для которых выступали древесные чурки. Их сжигали в газогенераторах при недостатке кислорода - в результате образуется большое количество недоокисленных продуктов, которые горят в камере сгорания двигателя. Газогенераторные установки были довольно громоздкими и тяжелыми, а запас хода небольшим - всего 60-70 км. Из-за недостатков газогенераторных установок были разработаны газобаллонные автомобили. Первые такие автомобили выпустили в Советском Союзе: в конце 30-х годов начался выпуск газобаллонных грузовиков ЗИС-30 и ГАЗ-44. В двигателях этих грузовиков применялся газ, подаваемый из баллонов. В западных странах об использовании газа всерьез задумались после нефтяного кризиса середины 70-х годов [3].

При всем многообразии, существующие альтернативы бензина и дизельного топлива являются единичными и в ближайшее время не смогут полноценно заменить бензин и дизель. Традиционные виды топлива еще долго будут востребованы в автомобильной отрасли ввиду их доступности. Для применения такого топлива не требуется изменение конструкции двигателя и специальной утилизации.

Заключение

Таким образом, в данной работе были рассмотрены различные виды автомобильного топлива. Проанализирована история развития автомобильного транспорта и применения для него различных фракций нефти как топлива, таких как бензин и керосин. Также были рассмотрены альтернативные источники энергии для автомобилей. При всем многообразии, существующие альтернативы бензина и дизельного топлива являются единичными и в ближайшее время не смогут полноценно заменить бензин и дизель.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Могучая смесь: этапы развития автомобильного топлива [Электронный ресурс] : статья - Режим доступа: https://studfile.net/preview/3070313/ (дата обращения: 28.03.2026)

2. История развития бензина: от первых попыток создания до современных технологий [Электронный ресурс] : статья - Режим доступа: https://neftregion.ru/informaciya/istoriya-razvitiya-benzina:-ot-pervykh-popytok-sozdaniya-do-sovremennykh-tekhnologii (дата обращения: 28.03.2026)

3. Сагайда Н.К., Полуев А.Н., Френкель Е.Н. Топливо: история, классификация, свойства, перспектива, альтернативы // Вольский военный институт материального обеспечения - Вольск Саратовской обл., Россия - VIII Международная студенческая научная конференция «Студенческий научный форум – 2016», [Электронный ресурс] : статья - Режим доступа: https://scienceforum.ru/2016/article/2016022841

4. Егоров В.А., Ременцов А.Н., Кулагина Е.В. Применение альтернативных видов топлива и движителей в России и в мире. Текущее состояние и перспективы. // Сборник научных трудов по материалам 75-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. – 2017 – стр. 73-80 - EDN: XSDOFB

УДК 543.556
Челомбитько Мария Андреевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Chelombitko Maria Andreevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Проценко Александра Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Protsenko Alexandra Nikolaevna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БЕНЗИНА ПРОЦЕССА ИЗОМЕРИЗАЦИИ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
DETERMINATION OF THE DETONATION RESISTANCE OF GASOLINE DURING THE ISOMERIZATION PROCESS BY DIELECTRIC SPECTROSCOPY

Аннотация. Работа посвящена изучению методов контроля важнейших характеристик бензина процесса изомеризации. Проведен подробный анализ методик исследования детонационной стойкости бензина. Проведена калибровка диэлектрического анализатора DEA 230/10 (NETZSCH) для определения зависимости между октановым числом и параметрами исследуемого образца в диапазоне частот от 1 до 100000 Гц. В результате исследования была выявлена корреляция параметров образца с октановым числом. Была проведена апробация практического применения метода диэлектрической спектроскопии для наблюдения за процессом изомеризации в режиме реального времени. По полученным графикам оценено, что целевой продукт в проводимом при 150 °С процессе изомеризации имеет наибольшее значение октанового числа и составляет почти 85 единиц.
Abstract. The work is devoted to the study of methods for controlling the most important characteristics of gasoline during the isomerization process. A detailed analysis of the methods for studying the detonation resistance of gasoline has been carried out. A DEA 230/10 dielectric analyzer (NETZSCH) was calibrated to determine the relationship between the octane number and the parameters of the sample under study, in the frequency range from 1 to 100,000 Hz. As a result of the study, the correlation of the sample parameters with the octane number was revealed. The practical application of the dielectric spectroscopy method for monitoring the isomerization process in real time was tested. According to the obtained graphs, it is estimated that the target product in the isomerization process carried out at 150 °C has the highest octane value and amounts to almost 85 units.
Ключевые слова: методы анализа, изомеризация, октановое число, бензиновая фракция, диэлектрическая спектроскопия.
Key words: analysis methods, isomerization, octane number, gasoline fraction, dielectric spectroscopy.

Введение

По мере развития двигателей внутреннего сгорания к качеству бензина выдвигались новые требования и ужесточались ограничения по важным параметрам топлива – антидетонационные свойства, испаряемость и т.д. Также жестко контролируется состав бензинов, поскольку, в зависимости от состава, свойства смеси при горении могут сильно различаться. Именно от компонентного состава бензина зависят его антидетонационные свойства. Октановые числа – исследовательское (RON) и моторное (MON) – являются важными параметрами для оценки этих свойств [1].

Изомеризация легких бензиновых фракций является одним из наиболее широко используемых процессов в нефтяной промышленности. Сырьем для процесса изомеризации, главным образом, служат легкие фракции прямогонных бензинов, а также бензинов риформинга и гидрокрекинга, имеющие низкое октановое число. Любой технологический процесс сопровождается процедурами контроля входящего сырья, течения процесса, и выходящего продукта. В процессе изомеризации такой важной процедурой, помимо лабораторного анализа состава, является контроль октанового числа выходящего продукта.

Целью данной работы является изучение и разработка метода определения октановых чисел с помощью диэлектрического анализа. Также стояли задачи проанализировать существующие методы определения октанового числа, провести экспериментальные исследования и выявить корреляцию данных, полученных методом диэлектрического анализа и справочных октановых чисел углеводородов нормального строения.

Материалы и методы

Стандартный исследовательский метод испытания бензинов на устойчивость к детонации регламентируется ГОСТ 8226-2015 и предполагает испытание бензина на установке CFR или типа УИТ. Моторный метод регламентируется ГОСТ 511-2015 и включает испытание на той же установке, однако при другой нагрузке и температуре. Использование установок CFR или типа УИТ не идеально подходит для тестирования новых составов топлива из-за стоимости, размера установки, времени испытания и сложности эксплуатации. [2]

Существуют аналитические методы, такие как адсорбция флуоресцентных индикаторов (АФИ) и ближнее инфракрасное излучение (БИК), которые могут предоставить лишь ограниченную информацию о составе, соответствующую структурным группам. [1] Данные БИК со временем могут стать неточны из-за старения датчиков, кроме того, изменения в окружающей среде также влияют на надежность прибора [3]. При АФИ наблюдается большой разброс результатов, также недостатком этого метода является большой размер колонок – по ГОСТ 31872-2019 он составляет 161,5-162 см. Газофазная хроматография (ГХ) как метод может предоставить подробные данные о составе, но стоимость прибора крайне высока, а процедура анализа трудоемка для широкого применения [3]. Тем не менее, метод хроматографии широко используется для определения октанового числа.

Новым методом определения октановых чисел является диэлектрическая спектроскопия (диэлектрический анализ, DEA). Прибор DEA является более стабильным и надежным, чем прибор БИК, поскольку на него не оказывают сильного влияния колебания температуры и влажности. Относительно метода ГХ метод DEA существенно выигрывает в стоимости оборудования [3]. Метод DEA дает возможность наблюдать за диэлектрическими параметрами вещества непрерывно в режиме реального времени.

Нами была проведена калибровка прибора NETZSCH DEA 230/10 для определения вида зависимости между октановым числом и диэлектрической проницаемостью образца. Исследование проводилось при различных частотах – от 1 до 100000 Гц на индивидуальных углеводородах с различными октановыми числами. Список исследуемых углеводородов и полученных значений их октановых чисел приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Октановые числа исследуемых углеводородов

Углеводород	Октановое число MON(RON)
н-октан	-17(-19)
н-гептан	0(0)
н-гексан	26(24,8)
н-пентан	61,7(61,7)
изооктан	100(100)

В результате измерений была получена следующая зависимость (рис. 1).

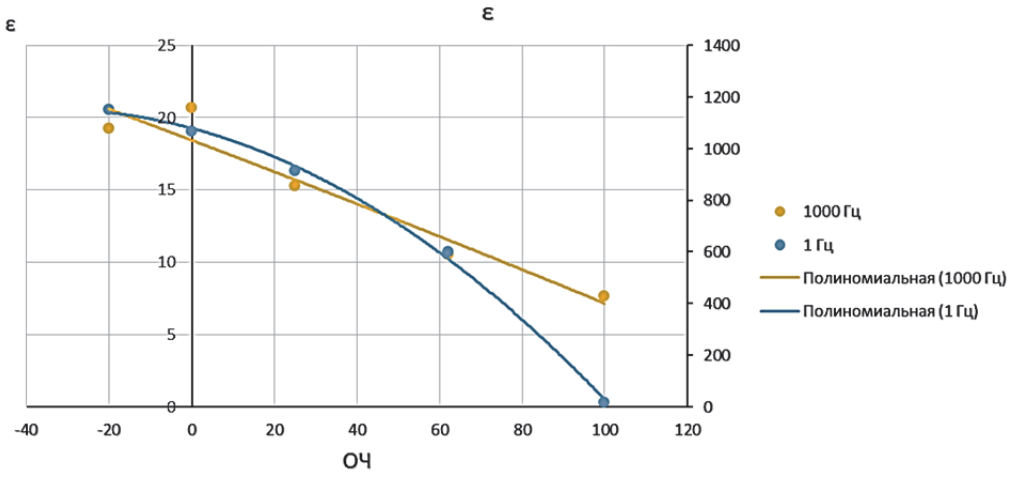


Рис. 1. Зависимость октанового числа от диэлектрической проницаемости

После выведения зависимости диэлектрических параметров и детонационной стойкости был проведен эксперимент по практическому применению метода диэлектрической спектроскопии, а затем исследование процесса изомеризации н-гексана (легкой бензиновой фракции) с применением катализатора на основе хлорокомплекса кобальта $(L)_2[CoCl_4]$ с органическим катионом 2,3,5-трифенитетразолием (L^+). Эксперимент проводили при температуре 160 °С. В ходе измерения был получен график изменения диэлектрической проницаемости и температуры в течение процесса изомеризации (рис. 2). Для сравнения было проведено измерение диэлектрической проницаемости в процессе нагревания н-гексана (рис. 3):

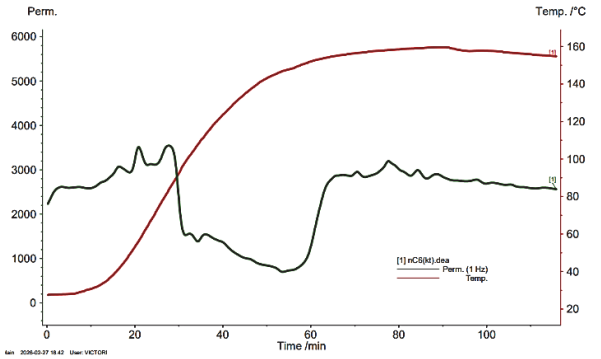


Рис. 2. Изменение диэлектрической проницаемости в процессе изомеризации

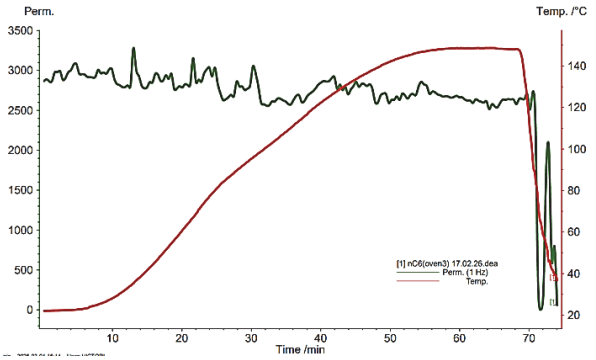


Рис. 3. Изменение диэлектрической проницаемости н-гексана при нагревании

При приведении графиков к общим условиям получили кривую изменения диэлектрической проницаемости от температуры в ходе процесса изомеризации и в процессе нагревания н-гексана (рис. 4 и 5) относительно начального значения диэлектрической проницаемости н-гексана:

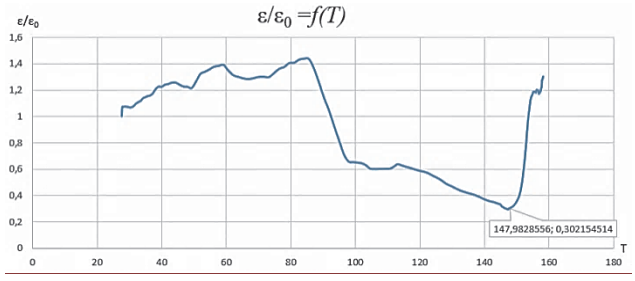


Рис. 4. Изменение диэлектрической проницаемости н-гексана относительно начального значения в ходе изомеризации от температуры

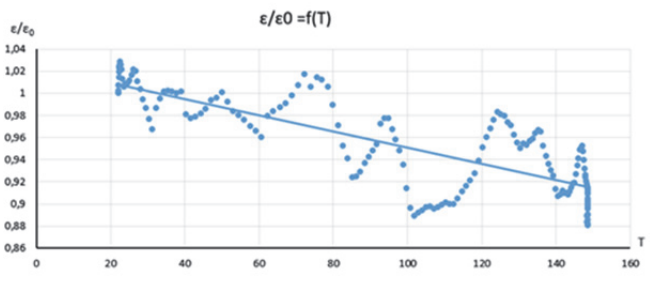


Рис. 5. Изменение диэлектрической проницаемости н-гексана относительно начального значения при нагревании от температуры

Были получены также зависимости диэлектрической проницаемости относительно начального значения диэлектрической проницаемости н-гексана от октанового числа в ходе процесса изомеризации и в процессе нагревания н-гексана (рис. 6 и 7):

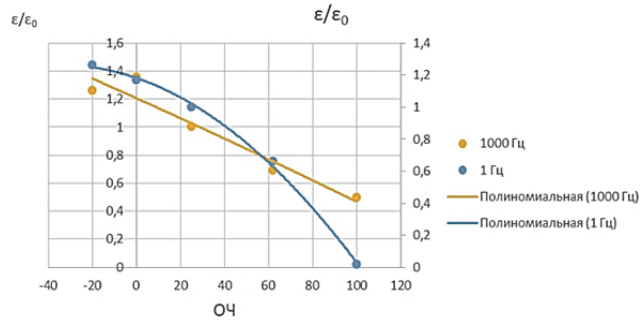


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости относительно значения диэлектрической проницаемости н-гексана от октанового числа в ходе изомеризации

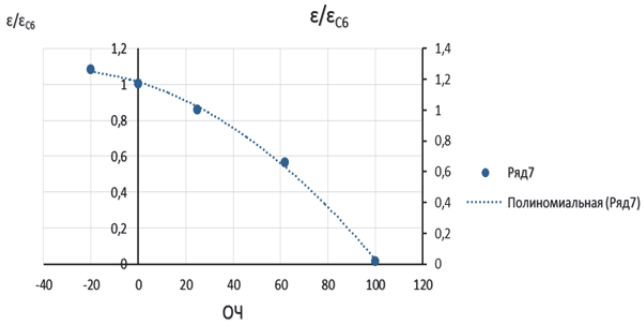


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости относительно значения диэлектрической проницаемости н-гексана от октанового числа в ходе нагревания

По полученным данным можно прогнозировать октановое число продукта изомеризации. Так, в минимуме графика изменения диэлектрической проницаемости (диэлектрическая проницаемость = 0,30; температура = 150 °С) в процессе изомеризации наблюдается максимальное значение октанового числа (около 85 единиц).

В дальнейших работах планируется варьировать условия процесса изомеризации, для выявления более эффективного режима с помощью метода диэлектрической спектроскопии.

Заключение

Таким образом, в данной работе были изучены методы контроля важнейших характеристик бензина процесса изомеризации. Проведен подробный анализ методик исследования детонационной стойкости бензина. Проведена калибровка прибора NETZSCH DEA 230/10 и определена зависимость между октановым числом и диэлектрическими параметрами исследуемого образца. Также была проведена апробация практического применения метода диэлектрической спектроскопии для наблюдения за процессом изомеризации в режиме реального времени. По полученным в процессе измерения графикам спрогнозировано, что продукт изомеризации при 150 °С имеет наибольшее значение октанового числа, составляющее около 85 единиц. В дальнейшем предполагается использование этой методики в выпускной квалификационной работе для контроля течения процесса изомеризации.

Благодарности

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупарев Е. В. Изомеризация лёгкой бензиновой фракции в колонне реакционно-ректификационного типа: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.17.07 /; [Место защиты: С.-Петерб. гос. технол. ин-т]. — Санкт-Петербург, 2014. — 20 с. – EDN ZPOPRD.

2. Al Ibrahim E., Farooq A. Octane Prediction from Infrared Spectroscopic Data // Energy Fuels – 2020 – 34, 817-826 – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b02816. – EDN UONPTW.

3. Guan L., Feng X.L., Li Z.C., Lin G.M. Determination of octane numbers for clean gasoline using dielectric spectroscopy / // Fuel –2009– 88– 1453-1459 – DOI:10.1016/j.fuel.2009.02.017.

УДК 621.9:519.8
Чжао Цзыдун, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zhao Zidong, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Люй Лань, кандидат технических наук, начальник международного отдела, Хэйлунцзянский научно-технический университет
Lyu Lan, Candidate of Engineering Sciences, Head of the International Department, Heilongjiang University of Science and Technology
Башкова Татьяна Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bashkova Tatyana Igorevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Materials Science, Komsomolsk-na-Amure State University
Башков Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и материаловедение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bashkov Oleg Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Materials Science, Komsomolsk-na-Amure State University

ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ НА ХАРАКТЕР ФОРМИРОВАНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

INFLUENCE OF INDUCTANCE ON THE NATURE OF OXIDE COATING FORMATION DURING MICRO-ARC OXIDATION OF ALUMINUM ALLOY

Аннотация. Микродуговое оксидирование – это технология поверхностного модифицирования, при которой на вентильных металлах (таких как алюминий, магний, титан и их сплавы) формируется керамическая оксидная пленка. Индуктивность может являться регулирующим параметром процесса микродугового оксидирования и напрямую влиять на микроструктуру, механические свойства и функциональные характеристики покрытия. В настоящем исследовании изучено влияние индуктивности на шероховатость поверхности, толщину и твердость покрытия. Экспериментальные результаты показывают, что индуктивность существенно влияет на морфологию поверхности – с увеличением значения индуктивности размер пор в покрытии возрастает, что приводит к повышению шероховатости. Микротвердость покрытия достигает максимального значения при индуктивности 39 мГн. Зависимость микротвердости от индуктивности является нелинейной. Полученные данные представляют теоретическую основу для промышленного применения технологии микродугового оксидирования, особенно в таких областях, как авиационная промышленность, биомедицина и ядерная энергетика.
Abstract. Micro-arc oxidation is a surface modification technology that forms a ceramic oxide film on valve metals (such as aluminum, magnesium, titanium, and their alloys). Inductance can be a controlling parameter of the micro-arc oxidation process and directly affects the microstructure, mechanical properties, and functional characteristics of the coating. In this study, the effect of inductance on the surface roughness, thickness, and hardness of the coating was studied. Experimental results show that inductance significantly affects the surface morphology. With increasing inductance, the pore size in the coating increases, leading to increased roughness. The micro hardness of the coating reaches its maximum value at an inductance of 39 mH. The dependence of micro hardness on inductance is nonlinear. The obtained data provide a theoretical basis for the industrial application of micro-arc oxidation technology, particularly in fields such as the aeronautic industry, biomedicine, and nuclear energy.
Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминиевый сплав, толщина, микротвердость, шероховатость, индуктивность.
Key words: micro-arc oxidation, aluminum alloy, thickness, micro hardness, roughness, inductance.

Введение

В связи с широким применением легких сплавов в высокотехнологичном производстве, традиционные технологии обработки поверхности оказываются недостаточными для удовлетворения эксплуатационных требований к таким материалам, как титановые магниевые алюминиевые сплавы, в условиях высоких нагрузок и интенсивного износа. Технология микродугового окисления, обладающая преимуществами роста, высокой прочностью сцепления и улучшением коррозионной и износостойкости, стала актуальной темой в исследованиях в области поверхностной инженерии. Индуктивность определяет распределение энергии разряда, тем самым влияя на механизм формирования и конечные характеристики покрытия [1,2]. Например, прерывистый импульсный разряд может рассеивать энергию, предотвращая образование дефектов покрытия, вызванные локальным перегревом. В настоящее время исследования в основном сосредоточены на составе электролита и материалах подложки, в то время как систематический анализ механизма оптимизации параметров импульса отсутствует. Цель данной работы – исследовать механизм влияния индуктивности на микроструктуру и характеристики покрытий, формируемых процессе МДО [3,4].

Материалы и методика испытания образцов

В качестве матричного материала в эксперименте использовался алюминиевый сплав 7075, благодаря его широкому промышленному применению. Состав сплава приведен в таблице 1. Размер образца составлял 30 мм × 20 мм × 2 мм [5]. Предварительная обработка включала механическую полировку, обезжиривание и очистку деионизированной водой. Оборудование для микродугового окисления состояло из программируемого импульсного источника питания, электролитической ячейки из нержавеющей стали и системы охлаждения. В качестве электролита использовали систему $(NaPO_3)_6$ + Na_2SiO_3 + NaOH + дистиллированная вода. Температуру электролита поддерживали в диапазоне 20-28 °C.

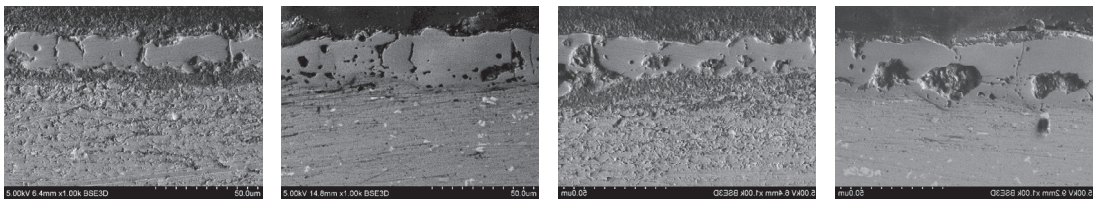
Таблица 1

Химический состав сплавов

Элемент	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
Состав, %	<0,5	<0,1	<0,03	<0,22	<0,02	1,2-2,0	<2,27	5,1-6,1	остальное

Результаты испытаний образцов

Индуктивность, стабилизируя характер разряда, концентрирует энергию, тем самым улучшая стабильность и однородность плазменного разряда. Это эффективно снижает локальный перегрев и реакцию окисления. В структурах оксидного слоя, сформированных при индуктивности 0,5 мГн и 4,8 мГн, наблюдались макропоры и сквозные каналы, не заполненные расплавленным оксидом (рис. 1). Толщина оксидного слоя увеличивается со временем окисления, но размер пор в покрытии также увеличивается, что приводит к увеличению шероховатости поверхности.



а) б) в) г)

Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения оксидных покрытий, сформированных на образцах сплава 7075 при индуктивности цепи: а), в) L = 0,52 мГн; б), г) L = 4,8 мГн, в течение t = 90 мин (а, б) и t = 120 мин (в, г)

Как показано на рисунке 2, микротвердость увеличивается пропорционально увеличению индуктивности от 0,5 мГн до 17,6 мГн при всех периодах окисления. Однако при измерении микротвердости покрытия, сформированного при индуктивности 28 мГн, микротвер-

дость резко снижается, достигая максимального значения при индуктивности 39 мГн. Это указывает на нелинейную зависимость микротвердости покрытия от индуктивности.

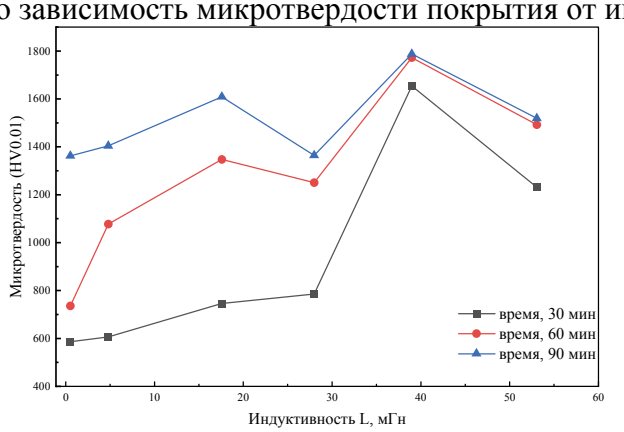


Рис. 2. Зависимость микротвердости от индуктивности L

Заключение

В экспериментах по микродуговому окислению алюминиевого сплава индуктивность, как ключевой один компонент импульсной системы питания, хотя и не принимает непосредственного участия в электрохимической реакции, может существенно влиять на процесс формирования и конечные свойства оксидного покрытия, контролируя ток и напряжение.

По мере непрерывного увеличения значения индуктивности значительно возрастает энергия импульса, что приводит к увеличению размера и уменьшению количества микропор разряда, а следовательно, и к увеличению шероховатости поверхности.

Исследование показало, что микротвердость покрытия достигает максимума при индуктивности 39 мГн, и установило, что микротвердость покрытия имеет нелинейную зависимость от индуктивности.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 24-29-00838).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ситникова, В. Г. Условия и механизм химического оксидирования алюминия и его сплавов / В. Г. Ситникова, М. Ю. Кузьмина // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 9, № 4. – С. 76-81.

2. Исследование влияния режимов микродугового оксидирования на морфологию и параметры оксидного покрытия, наносимого на алюминиевый сплав Д16АТ / Ф. Бао, О. В. Башков, Д. Чжан [и др.] // Frontier Materials & Technologies. – 2023. – № 1. – С. 7-21. – DOI 10.18323/2782-4039-2023-1-7-21.

3. Гордиенко, П. С. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов / П. С. Гордиенко, В. А. Достовалов, А. В. Ефименко. – Владивосток : Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2013. – 521 с. – ISBN 978-5-7444-3073-3.

4. Acoustic emission that occurs during the destruction of coatings applied by microarc oxidation on an aluminum alloy / O. Bashkov, F. Bao, V. A. Kim [et al.] // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2522-2525. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.08.174. – EDN NUWQBT.

5. Чжао Цзыдун. Формирование оксидных покрытий на алюминиевом сплаве 7075 методом микродугового оксидирования / О. В. Башков, Л. Люй, Ф. Бао, [и др.] // Цветные металлы 2025 № 10 с.45-53.

УДК 621.64
Шарифзода Худойдод Хамид студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sharifzoda Khudoydod Hamid, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ
IMPROVING THE EFFICIENCY OF OIL TRANSFER AT NEGATIVE TEMPERATURES

Аннотация: Проблема транспортировки нефти в условиях низких температур является актуальной задачей нефтедобывающей отрасли России. Негативные последствия замерзания нефти, образования парафина и изменения вязкости существенно снижают эффективность процесса транспортировки и увеличивают затраты на эксплуатацию трубопроводных систем. Данная статья посвящена изучению методов повышения эффективности перекачки нефти при отрицательных температурах, включая использование специальных присадок, технологий подогрева трубопроводов и модернизацию насосного оборудования.
Abstract. The problem of oil transportation in low-temperature conditions is a pressing issue for the Russian oil industry. The negative effects of oil freezing, paraffin formation, and viscosity changes significantly reduce the efficiency of the transportation process and increase the cost of operating pipeline systems. This article focuses on exploring methods to improve the efficiency of oil pumping in cold temperatures, including the use of special additives, pipeline heating technologies, and the modernization of pumping equipment
Ключевые слова: нефть, низкая температура, перекачка, трубопровод, присадки.
Key words: oil, low temperature, pumping, pipeline, additives.

Введение

Транспортировка нефти по трубопроводам является ключевым этапом в нефтегазовой отрасли, определяющим экономическую эффективность всего производственного цикла. Однако, в условиях низких температур (характерных для значительной части территории России – Сибири, Крайнего Севера, Арктической зоны) процесс перекачки сталкивается с серьёзными технологическими трудностями. Это делает актуальной задачу повышения эффективности транспортировки нефти в экстремальных климатических условиях.

При сниженных температурах нефть становится более вязкой, что увеличивает сопротивление течению жидкости внутри трубопровода. Это ведет к увеличению энергопотребления насосных станций и снижению пропускной способности данной системы. При определенных условиях возможно образование парафиновых отложений на стенках труб, что также снижает производительность и повышает риск возникновения аварийных ситуаций [1].

Основная часть

Комплекс проблем, возникающих при перекачке нефти в условиях низких температур, требует применения специальных технологий и методов для обеспечения надежной и экономичной транспортировки. Для решения этой проблемы применяют следующие методы:

1 Использование депрессорных присадок. Депрессорные присадки помогают снизить температуру застывания нефти, предотвращают образование кристаллов парафина и улучшают прокачиваемость нефти даже при значительных минусовых температурах. Эффективность метода зависит от состава нефти и правильности подбора присадки [2].

2 Подогрев трубопроводов. Поддержание нужной температуры транспортируемой нефти достигается путем обогрева трубопроводов различными способами электрическим обогревом, использованием тепловых изоляторов, применением теплоизоляционных матери-

алов. Данные меры помогают предотвратить затвердевание нефти и уменьшить потери тепла окружающей среды.

3 Модернизация насосного оборудования. Применение современных насосных агрегатов с повышенной производительностью позволяет увеличить скорость течения нефти и уменьшить время пребывания продукта в трубопроводе, снижая вероятность его охлаждения и увеличения вязкости.

4 Предварительный нагрев нефти перед подачей в магистраль позволяет поддерживать оптимальные условия транспортировки на протяжении всего маршрута [3]. Для этого применяются специальные установки для нагрева нефти, позволяющие регулировать степень прогрева в зависимости от погодных условий и характеристик сырья.

Анализ перечисленных методов показывает, что более производительным способом повышения эффективности перекачки нефти при отрицательных температурах является предварительный нагрев нефти перед закачкой в трубопровод. Этот метод дает стабильные условия транспортировки на всём маршруте, позволяя гибко регулировать температуру подачи в зависимости от погодных условий и свойств нефти [4]. Заранее нагретая нефть сохраняет свою подвижность, минимизирует риск образования парафина и уменьшает нагрузку на оборудование (рис. 1).

Применение предварительного подогрева позволяет эффективно решает проблемы перекачки. Нагрев нефти до температуры на 5–15 °С выше температуры застывания обеспечивает:

- снижение гидравлического сопротивления в трубопроводе на 25–40 %;
- сокращение энергопотребления насосных станций на 15–30 %;
- предотвращение образования парафиновых и асфальтено-смолистых отложений;
- восстановление и поддержание необходимой текучести нефти.



Рис. 1 – Повышение эффективности перекачки нефти

Заключение

Предварительный подогрев нефти является технологически обоснованным и практическим решением для повышения эффективности перекачки в условиях отрицательных температур. При комплексном подходе и проектировании он позволяет обеспечить надежную, бесперебойную и экономически целесообразную транспортировку нефти даже в экстремальных климатических условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хлутчин, С. В. Применение энергосберегающих технологий в системе нефтепроводного транспорта / С. В. Хлутчин // Наукосфера. – 2022. – № 5-1. – С. 86-89. – EDN PAFKBL.

2. Гончарова, В. В. Проблемы, связанные с эксплуатацией газо-нефтепроводов в условиях распространения многолетней мерзлоты / В. В. Гончарова // Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования : Сборник статей по материалам XCVI студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 06 июля 2020 года. Том 13 (96). – Новосибирск: Обще-

ство с ограниченной ответственностью "Сибирская академическая книга", 2020. – С. 55-59. – EDN NHYDHY.

3. Контроль и регистрация технологических параметров при добыче, транспорте и переработке углеводородов / И. И. Хасанов, Г. Ю. Колчина, Е. А. Логинова, О. Ю. Полетаева ; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Москва : Обракадемнаука, 2019. – 92 с. – ISBN 978-5-9904802-6-1. – EDN RWZMHL.

4. Ревель-Муроз, П. А. Методика оценки энергоэффективности объектов действующих магистральных нефтепроводов / П. А. Ревель-Муроз // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7, № 6. – С. 12-15. – EDN YNRSTT.

УДК 66.071.51

Шукюров Теймур Шариф Оглы, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shukyurov Teymur Sharif Ogly, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет

Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОСОБЕННОСТИ АБСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НИЗКОНАПОРНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МДЭА
FEATURES OF ABSORPTION PURIFICATION OF LOW-PRESSURE HYDROCARBON GASES USING MDEA

Аннотация. В статье рассмотрена технология аминовой очистки углеводородных газов низкого давления на примере работы абсорбера К-1-205. Рассмотрена основная проблема уноса амина с УВГ. Описаны конструктивные особенности аппарата переменного сечения с двумя слоями насадки. Приведены параметры технологического режима, схемы материальных потоков регенерированного и насыщенного раствора метилдиэтаноламина (МДЭА). Особое внимание уделено системам контроля, регулирования и противоаварийной защиты, включая контуры измерения температуры, давления, расхода и уровня. Представленные решения обеспечивают стабильность процесса очистки от сероводорода и надежность эксплуатации оборудования.

Abstract. The article discusses the technology of amine purification of low-pressure hydrocarbon gases using the example of the operation of the K-1-205 absorber. The design features of a variable-section column equipped with two layers of packing are described. The parameters of the process conditions, as well as the flow schemes of regenerated and rich methyldiethanolamine (MDEA) solution, are presented. Special attention is paid to the monitoring, control, and emergency protection systems, including control loops for temperature, pressure, flow rate, and level. The presented solutions ensure the stability of the hydrogen sulfide removal process and the reliability of equipment operation.

Ключевые слова: абсорбция, углеводородные газы низкого давления, МДЭА, аминовая очистка, сероводород, технологический режим, автоматизация, противоаварийная защита.

Key words: absorption, low-pressure hydrocarbon gases, MDEA, amine purification, hydrogen sulfide, process conditions, automation, emergency protection.

Введение

Установки гидроочистки на нефтеперерабатывающих предприятиях обеспечивают удаление нежелательных примесей из углеводородного сырья, что напрямую влияет на качество продукции и экологические показатели. Надежность и эффективность работы таких

установок во многом зависят от корректности проектных решений и соответствия оборудования фактическим условиям эксплуатации. Одной из существенных проблем является несоответствие диаметра колонны К-1-205 текущим технологическим нагрузкам.

Современная нефтегазоперерабатывающая промышленность сталкивается с возрастающими требованиями к качеству выпускаемой продукции и экологической безопасности производственных процессов. Одной из ключевых задач является глубокая очистка углеводородных газов от сероводорода (H_2S), присутствие которого приводит к коррозии оборудования, отравлению катализаторов последующих стадий переработки и, при сжигании газов, к образованию токсичных оксидов серы. В связи с ужесточением нормативов по содержанию сернистых соединений в товарных газах (в том числе в топливном газе, используемом для собственных нужд предприятия), развитие и совершенствование технологий сероочистки приобретает особую актуальность.

Среди существующих методов удаления сероводорода из углеводородных газов наиболее широкое распространение получила химическая абсорбция с использованием водных растворов алканоламинов. Данный метод характеризуется высокой селективностью, технологической гибкостью, возможностью регенерации поглотительного раствора и организации непрерывного цикла. Среди алканоламинов особое место занимает метилдиэтаноламин (МДЭА), который по сравнению с моноэтаноламином (МЭА) и диэтаноламином (ДЭА) обладает рядом преимуществ: более низкой коррозионной активностью, меньшей склонностью к деградации в присутствии кислородсодержащих соединений, повышенной устойчивостью к термическому разложению, а также способностью к селективному поглощению сероводорода в присутствии диоксида углерода.

Особую сложность представляет очистка газов низкого давления, где требуется тщательное поддержание гидродинамического и теплового режимов работы абсорбера, а также чёткое управление материальными потоками [1, 2].

Целью работы является детальный анализ технологического режима и системы автоматизации процесса абсорбционной очистки углеводородных газов низкого давления на примере абсорбера К-1-205 с использованием водного раствора метилдиэтаноламина.

Основная часть

В процессе эксплуатации колонны К-1-205 выявлено, что ее диаметр меньше, чем у аналогичных аппаратов, работающих в схожих условиях. Это особенно заметно в летний период, когда изменение температурных параметров приводит к росту объемного расхода газовой фазы. Основной проблемой является унос амина из-за недостаточного диаметра колонны при работе летом.

Абсорбер К-1-205 представляет собой вертикальный колонный аппарат переменного сечения, оснащённый двумя слоями регулярной или нерегулярной насадки. Такое конструктивное решение позволяет интенсифицировать массообменные процессы при сравнительно невысоких перепадах давления и обеспечить равномерное орошение по высоте колонны.

Одним из ключевых параметров колонного аппарата является линейная скорость газа, определяемая как отношение расхода к площади поперечного сечения аппарата. При уменьшенном диаметре колонны площадь сечения снижается, что приводит к следующим эффектам: резкое увеличение скорости газового потока, снижение времени контакта фаз, разрушение капель жидкости и их унос потоком газа и ухудшение работы контактных устройств (насадки или тарелок). При достижении критической скорости начинается интенсивный захват жидкости газом. Это сопровождается вспениванием аминового раствора, ростом гидравлического сопротивления и нарушением равномерности распределения потоков. В летний период данные явления усиливаются из-за уменьшения плотности газа и увеличения его объемного расхода.

Анализ показал, что проблема носит комплексный характер. Недостаточный диаметр аппарата изначально заложенные проектные параметры не соответствуют текущим нагруз-

кам. Увеличение производительности установки и ее пропускной способности приводит к превышению расчетных скоростей газа. Повышение температуры в летний период увеличивает объем газовой фазы. Возможные ограничения внутренних устройств (в конструкции насадки или тарелок) может не обеспечивать эффективное разделение при повышенных нагрузках.

В нижнюю часть аппарата поступает насыщенный раствор МДЭА из абсорбера высокого давления (К-1-201), что позволяет утилизировать остаточную поглотительную способность раствора и удалить растворённые углеводородные газы. В верхнюю часть подаётся тощий (регенерированный) раствор, обеспечивающий «жёсткую» доочистку газа от сероводорода, уносимого из предыдущих ступеней. Основные параметры работы абсорбера следующие: температура верха 40 °С; температура низа 45 °С; давление верха 0,2–0,38 МПа; давление низа 0,22–0,4 МПа. Производительность насосов регулируется контуром поз. FIC-4366 с перепуском избыточного раствора обратно в ёмкость, что предотвращает перегрузку абсорбера и стабилизирует орошение.

Для обеспечения эффективного удаления сероводорода необходим непрерывный контроль ключевых параметров [3]. Так, температура кислых газов на входе в абсорбер измеряется прибором поз. TI-1361. Поддержание температуры в заданном диапазоне важно, так как повышение температуры снижает растворимость сероводорода, а чрезмерное понижение может привести к увеличению вязкости раствора и ухудшению массопередачи. Перепад давления на слоях насадки контролируется приборами поз. PDIA-2361 и PDIA-2364 с сигнализацией максимально высокого значения. Резкий рост перепада указывает на возможное забивание насадки механическими примесями, солеотложениями или накопление жидкости. Давление в абсорбере регулируется двумя параллельными контурами: поз. PICA-2363 направляет очищенный газ в топливную сеть, а поз. PICA-2362 обеспечивает аварийный сброс на факел. Такая схема позволяет оперативно реагировать на колебания расхода газа и предотвращать превышение допустимого давления. Для оперативного контроля материального баланса установки предусмотрены приборы коммерческого и технологического учёта: поз. FQI-4370 - учёт количества регенерированного раствора МДЭА, поступающего на установку гидроочистки; поз. FQI-4380 - учёт насыщенного раствора, направляемого на регенерацию. Разница между этими показателями позволяет косвенно оценивать количество поглощённого сероводорода и эффективность работы абсорбера.

Очищенный от сероводорода углеводородный газ направляется в сепаратор С-1-212 для отделения унесённой капельной влаги, а затем в сепаратор топливного газа С-1-215. Такая двухступенчатая сепарация обеспечивает получение товарного топливного газа с содержанием сероводорода ниже нормативных требований, что способствует снижению выбросов оксидов серы при последующем сжигании [4].

Анализ приведённых технологических решений позволяет выделить следующие достоинства описанной схемы: гибкость управления за счёт разделения потоков регенерированного раствора между двумя абсорберами, многоуровневая система контроля с дублированием наиболее критических параметров (давление, уровень), наличие блокировок и сигнализации, минимизирующих вероятность аварийных ситуаций и энергоэффективность подогрева раствора с использованием водяного пара, что характерно для интегрированных нефтеперерабатывающих производств.

Вместе с тем, для дальнейшего повышения надёжности и экономичности процесса целесообразно внедрить автоматический контроль содержания сероводорода в очищенном газе с коррекцией расхода орошения, предусмотреть диагностику состояния насадки по динамике изменения перепада давления и организовать непрерывный мониторинг концентрации МДЭА в растворе для своевременной корректировки его состава.

Заключение

На примере абсорбера аминовой очистки углеводородных газов низкого давления К-1-205 показана эффективность использования раствора МДЭА в сочетании с современной системой автоматического регулирования. Чёткое разделение контуров управления температурой, давлением, уровнем и расходом, а также наличие защитных блокировок обеспечивают устойчивую работу установки в широком диапазоне нагрузок. Представленный опыт может быть использован при проектировании и модернизации аналогичных узлов на предприятиях нефтегазовой отрасли.

Увеличение диаметра приводит к росту площади поперечного сечения аппарата, что обеспечивает снижение линейной скорости газа, уменьшение уноса капель жидкости, стабилизацию гидродинамического режима и повышение эффективности массообмена. С инженерной точки зрения это решение устраняет первопричину проблемы, а не ее последствия.

Проведённый анализ позволяет утверждать, что надёжность и экономическая эффективность процесса аминовой очистки низконапорных газов определяются не только выбором абсорбента и конструкцией аппарата, но и степенью интеграции средств измерения, регулирования и противоаварийной защиты. Особую значимость приобретает многоуровневая система контроля критических параметров - давления в абсорбере и ёмкости регенерированного раствора, уровня в аппарате и ёмкости, расхода орошения, обеспечивающая как стабилизацию технологического режима, так и предотвращение аварийных ситуаций. Применение дублирующих контуров регулирования (например, по давлению с возможностью сброса на факел или подачи топливного газа на поддавливание) свидетельствует о высоком уровне проработки вопросов промышленной безопасности. Дальнейшее развитие подобных узлов целесообразно связывать с внедрением систем предиктивной диагностики состояния насадки, автоматизированного контроля состава газов на выходе из абсорбера и оптимизацией расхода регенерированного раствора на основе математического моделирования массообменных процессов. Реализация указанных направлений позволит не только повысить глубину очистки газов, но и снизить энергозатраты на регенерацию раствора, что в полной мере соответствует современным требованиям ресурсо- и энергоэффективности нефтегазоперерабатывающих производств [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савинов, Д. В. Методы очистки газов алканоламинами / Д. В. Савинов, И. Е. Кузора, Т. В. Раскулова // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 44-48. – EDN YPZSMZ.

2. Файзуллина, З. Р. Очистка водородосодержащего газа от кислых примесей / З. Р. Файзуллина, Д. В. Сидоров // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2024. – № 2(26). – С. 126-135. – EDN AMPBSV.

3. Хадиуллин, Н. Л. Автоматизация установки очистки углеводородных газов от сероводорода раствором этаноламина / Н. Л. Хадиуллин // Научный аспект. – 2024. – Т. 13, № 5. – С. 1714-1720. – EDN MMTEJB.

4. Ресурсосберегающая технология сокращения потерь алканоламина и воды при газоочистке / В. А. Сыроватка, Ю. П. Ясьян, И. А. Голубева [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 10(130). – С. 86-90. – EDN VEXNMF.

5. Котов, Д. В. Технико-экономические аспекты ресурсо- и энергосбережения на предприятиях нефтегазового комплекса / Д. В. Котов, А. Ф. Ахметов, И. Р. Фасхутдинов // Актуальные вопросы экономики и управления в нефтегазовом бизнесе и строительстве : Сборник научных трудов XII Всероссийской НПК, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 16 ноября 2024 года. – Уфа: УГНТУ, 2024. – С. 153-156. – EDN NXXSKQ.

УДК 669.213
Щербов Арсений Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Scherbov Arseniy Sergeervich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет
Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩЕГО РЕАГЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В КИСЛОЙ СРЕДЕ ВМЕСТО ЦИАНИДА НАТРИЯ, В ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ПО МЕТОДУ АВТОКЛАВНОГО ОКИСЛЕНИЯ
USING A LEACHING AGENT THAT OPERATES IN AN ACIDIC ENVIRONMENT INSTEAD OF SODIUM CYANIDE IN PRESSURE OXIDATION GOLD RECOVERY TECHNOLOGY

Аннотация. В исследовательской работе был рассчитан процесс сорбционного выщелачивания золота с помощью экологически чистого аналога цианида натрия – дихлоризоцианурата натрия. В данной работе описан принцип действия данного соединения при технологическом процессе, его физические свойства, влияние на окружающую среду и человека.
Abstract. In the research work, the process of sorption leaching of gold was calculated using an environmentally friendly analogue of sodium cyanide – sodium dichloroisocyanurate. This work describes the principle of action of this compound in the technological process, its physical properties, and its impact on the environment and human.
Ключевые слова: золото, сорбционное выщелачивание, дихлоризоцианурат натрия, гидрометаллургия золота, адсорбция, органический хлор.
Key words: gold, sorption leaching, sodium dichloroisocyanurate, gold hydrometallurgy, adsorption, organic chlorine.

Введение

Один из основных процессов гидрометаллургического извлечения золота – процесс сорбционного выщелачивания. Заключается он в растворении мелкодисперсных золотосодержащих частиц в определённом растворе, а затем адсорбции этого раствора на поверхности ионообменной смолы или активированного угля. Из-за малой активности золота как металла, для этого процесса подходит лишь небольшое количество химических веществ. Основной их критерий – способность образовывать с золотом растворимые комплексные соединения. Одним из таких является дицианоаурат натрия $Na[Au(CN)_2]$. Образование данного соединения достигается за счёт добавления к перерабатываемой пульпе цианида натрия – опасного при неправильной эксплуатации соединения, образующего при гидролизе синильную кислоту, которая является сильнодействующим ядовитым веществом [1].

В данной работе рассмотрен альтернативный вариант замены цианида натрия на более экологически чистое соединение.

Основная часть

В последние несколько десятилетий запасы самородного золота на Земле практически истощились, и возможность его добывать осталась только из золотосодержащих пород. В таких породах золото часто бывает скрыто сульфидными и углеродистыми оболочками, что затрудняет процесс его извлечения. Один из гидрометаллургических способов разрушения таких оболочек – автоклавное окисление. В его процессе оболочка разрушается, и золото высвобождается в свободном виде. После того, как золото переходит в свободное состояние, необходимо его перевести в раствор для того, чтобы отделить его от основной породы. Для этого подходит лишь небольшое количество соединений из-за очень низкой активности золота как металла. Для этого подходят различные галогенсодержащие соединения, тиосуль-

фаты, роданиды и прочие, но самое распространённое на данный момент – цианид натрия NaCN [2].

Впервые возможность растворения золота в цианидном растворе была обнаружена русским учёным П.Р. Багратионом в 1843 г. Спустя десять лет М. Фарадей объяснил эту реакцию и дал ей химическое уравнение:

$$4Au + 8NaCN + 2O_2 + 4H_2O \rightarrow 4Na[Au(CN)_2] + 4NaOH.$$

В этой реакции цианогруппа является лигандом, кислород – окислителем. В конце XIX века Д. Стюартом-Макартуром был разработан способ извлечения золота из пиритных руд, тогда с помощью этого способа удалось извлечь до 96% чистого золота из суспендированной руды.

На данный момент способ цианирования является одним из самых распространённых, несмотря на свою опасность. Во-первых, цианид натрия ядовит, так как при уменьшении кислотности среды повышается шанс гидролиза соединения до синильной кислоты по следующим реакциям:

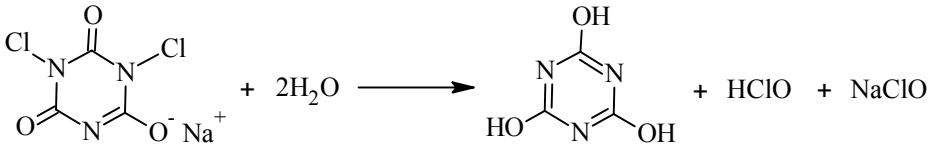
$$NaCN + H_2O \leftrightarrows NaOH + HCN \quad \text{и} \quad NaCN + H_2O + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + 2HCN.$$

Образующая кислота представляет опасность как для персонала золотоизвлекательных фабрик, так и для окружающей среды, даже несмотря на низкую концентрацию вещества в 0,5-1 г/л. Во-вторых, хвосты сорбционного выщелачивания требуют дополнительного обезвреживания, что создаёт дополнительные затраты. В-третьих, некоторая часть цианидных хвостов так или иначе остаётся не обезвреженной.

В качестве замены цианиду натрия предлагается использовать смесь следующих соединений: натриевая соль дихлоризоцианурата (натриевая соль 1,3-дихлор-1,3,5-триазинтриона) как донор активного хлора, за счёт которого создаётся окислительное действие и комплексообразование, натриевые соли карбонатов, соляная кислота как донор хлорид-ионов, а также тиомочевина для процесса выщелачивания золота. Подобная смесь производится фирмой Флотент Кемикалс и продаётся под маркой FlotentGL3G.

Несмотря на то, что изоциануровая кислота – соединение, относящееся к III классу опасности химических веществ по СТО 14175996-202009, что говорит о низкой токсичности, её хлорированный аналог находится в реестре ядов (S5 по Австралийскому коду транспорта опасных товаров по авто- и ЖД-дорогам), поэтому дихлоризоцианурат должен храниться в сухом прохладном месте без попадания прямых солнечных лучей. При этом «минусе», есть и несомненные «плюсы» – растворы органического хлора быстро гидролизуются, чем обеспечивают лучшие конкурентоспособные показатели скорости по сравнению с различными прочими выщелачивающими системами [3]. Например, по эффективности хлорирования превосходят неорганические аналог «хлорную известь» в 10-12 раз.

В ходе растворения действующего соединения в воде проходит следующая реакция:



Получается малорастворимая цианурoвая кислота (классифицируется как «практически нетоксичное вещество», её добавляют в корм животным как источник азота), а также растворимые гипохлорит калия и хлорноватистая кислота, которые диссоциируют, образуя при этом смесь различных сильных окислителей ClO^-, Cl_2 и O_2, способных окислить даже золото. При выщелачивании золото(I) является комплексообразователем, а роль лигандов играют хлорид ионы (как образующиеся при восстановлении окислителей, так и поставляемые соляной кислотой). Происходит следующая реакция образования комплекса:

$$2Au + 3HClO + 5Cl^- + 3H^+ = 2[AuCl_4]^- + 3H_2O.$$

Аналогично растворяются и прочие металлы, такие как серебро, железо, медь, что может создавать дополнительный расход выщелачивающего реагента, однако благодаря его селективности, такие реакции имеют крайне низкий выход. При этом реакция протекает, в

отличие от цианирования, в кислой среде. Скорость реакции возрастает с понижением кислотности. Максимальная скорость растворения достигается при концентрации кислоты в 0,4 г-ион/л, достигая при этом значения в 0,005 г-ион/($см^2$×мин). Однако достигать слишком низких значениях pH не следует, так как происходит разложение изохлорцианурата.

По существующим исследованиям [3], степень извлечения золота с использованием FlotentGL3G по сравнению с цианированием достигает более высокого показателя.

В результате был разработан план технологической схемы извлечения золота для Амурского Гидрометаллургического Комбината. Так, для сорбционного выщелачивания с помощью хлорсодержащих органических реагентов потребуется следующее оборудование:

– каскад ёмкостей для сорбционного выщелачивания (пачуки) – цилиндрические ёмкости из устойчивых к окислению материалов, снабжённые механическими перемешивающими устройствами. В них проводится реакция перевода золота в раствор, а также адсорбция образованного раствора на активированном угле;

– грохоты-щепоуловители – устройства, отделяющие пульпу, поступающую на участок, и различный мусор. Служат для защиты от попадания в ёмкости посторонних вещей;

– погружные грохоты – необходимы для перекачки пульпы из одной ёмкости в другую, а также препятствуют уносу угля вместе с пульпой;

– насосы перемещения угля – с их помощью реактивированный уголь поступает обратно в процесс;

– насосы дренажные – для обеспечения циркуляции оборотной воды в процессе;

–различные дополнительные ёмкости хранения угля.

Метод, используемый при выщелачивании, называется CIL, он заключается в одновременном переходе золота в хлорсодержащий раствор и адсорбцией на активированном угле. Насыщенный золотосодержащим раствором уголь поступает десорбцию (элюирование) в замкнутом цикле с электролизом, а затем регенерируется на участке термической регенерации угля. Хвосты хлорирования отправляются при этом на фильтрацию и обезвреживание, с последующим образованием кека [4].

Заключение

В данной работе проанализирована возможность использования экологически чистого аналога цианида натрия – дихлоризоцианурата натрия – в процессе сорбционного выщелачивания в гидрометаллургии золота. Были рассмотрены свойства соединения, его влияние на окружающую среду. Также было приведено необходимое оборудование для работы с реагентом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности экологически чистого способа растворения золота / Р. Э. Хабибулина, В. Г. Лобанов, Э. Б. Колмачихина [и др.] // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : Материалы XXX Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXIII Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: ООО "Типография ФортДиалог", 2025. – С. 127-130. – EDN BUAAKD.

2. Чугаев Л.В., Масленицкий И.Н., Борбат В.Ф., Никитин М.В. Металлургия благородных металлов. Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия. – 1987. – 432 с.

3. Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения "Быньговское" / В. Г. Лобанов, Р. Э. Хабибулина, О. Б. Колмачихина, О. Ю. Маковская // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 688-696. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-4-688-696. – EDN HXXKFQ.

4. Технологическая инструкция по переработке золотосодержащих концентратов: технологическая документация: разработчик и изготовитель Акционерное общество «Полиметалл Инжиниринг». – Санкт-Петербург. – 2019.– 278 с.

УДК 663.18 : 669.213 : 65.011.56
Ясинская Софья Валентиновна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Yasinskaya Sofya Valentinovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и материаловедение», Комсомольский-на Амуре государственный университет
Shakirova Olga Grigorievna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Chemistry and Materials Science”, Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА ПРИ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИИ УПОРНЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ
INCREASING THE STABILITY OF THE MICROBIAL COMMUNITY DURING BIO-LEACHING OF STUBBORN ORES USING AUTOMATED NUTRIENT CONTROL

Аннотация. В работе изучена проблема снижения активности ацидофильных хемолитоавтотрофных микроорганизмов при биовыщелачивании упорных золотосодержащих руд с высокими концентрациями мышьяка и тяжёлых металлов. Предложен подход к стабилизации сообщества Acidithiobacillus ferrooxidans через автоматизированное регулирование состава питательной среды. Поддержание сублетальных концентраций токсикантов и адаптивная подача энергетического субстрата предотвращают фазовый коллапс популяции и сохраняют окислительную активность микроорганизмов. Описана конфигурация системы автоматического управления (с датчиками pH, окислительно-восстановительного потенциала и соотношения форм железа) и показана целесообразность её внедрения для переработки токсичного минерального сырья.
Abstract. The study addresses the issue of reduced activity of acidophilic chemolithoautotrophic microorganisms in the bioleaching of refractory gold-bearing ores with high concentrations of arsenic and heavy metals. An approach to stabilising the Acidithiobacillus ferrooxidans community via automated regulation of the nutrient medium composition is proposed. Maintaining sublethal concentrations of toxicants combined with adaptive supply of the energy substrate prevents population phase collapse and preserves microbial oxidative activity at a technologically acceptable level. The configuration of an automatic control system (featuring sensors for pH, redox potential, and iron species ratio) is described, and the feasibility of implementing such systems for processing highly toxic mineral raw materials is demonstrated.
Ключевые слова: биовыщелачивание, Acidithiobacillus ferrooxidans, упорные руды, автоматизированное регулирование, сублетальные концентрации, мышьяк, окисление железа.
Key words: bioleaching, Acidithiobacillus ferrooxidans, refractory ores, automated control, sublethal concentrations, arsenic, iron oxidation, chemical technology.

Введение

Переработка упорных руд, содержащих золото в тонкодисперсной форме, ассоциированной с сульфидными минералами (арсенопирит, пирит), требует предварительного разрушения минеральной матрицы. Биовыщелачивание с использованием ацидофильных бактерий, преимущественно Acidithiobacillus ferrooxidans, рассматривается в мировой практике как экономически и экологически обоснованная альтернатива пирометаллургическим и автоклавным методам. Однако промышленная реализация данного метода сталкивается с фундаментальным ограничением. Высокая токсичность флотационных концентратов и руд по мышьяку и тяжелым металлам (цинк, медь, кадмий) приводит к ингибированию бактериальной окислительной активности и, в ряде случаев, к полной гибели микробного сообщества при попытках работы на плотных пульпах.

Анализ литературных данных показывает, что традиционный подход к культивированию предполагает использование периодических реакторов, где концентрация токсичных

ионов нарастает по мере протекания процесса, достигая значений, превышающих порог толерантности микроорганизмов [1, 2]. Как следствие, технологический цикл характеризуется длительными лаг-фазами и низкой удельной скоростью окисления железа и сульфидной серы. Современные тенденции в области химической технологии микроорганизмов указывают на необходимость перехода от статичных методов культивирования к динамическим системам с автоматизированным управлением параметрами среды [3]. Ключевая гипотеза, рассматриваемая в данной работе, заключается в том, что поддержание токсикантов в строго определенном сублетальном диапазоне, а не их удаление или игнорирование, позволяет сохранить высокую метаболическую активность сообщества за счет реализации адаптационного потенциала бактерий.

Обоснование необходимости автоматизированного регулирования

Для понимания роли автоматизированного регулирования в процессах биовыщелачивания необходимо рассмотреть физиолого-биохимические особенности Acidithiobacillus ferrooxidans в условиях воздействия токсичных компонентов упорных руд. Согласно данным, представленным в работах российских исследователей Кондратьевой и соавторов [2], основными механизмами токсического действия мышьяка на данный вид микроорганизмов являются ингибирование ферментов, содержащих железо-серные кластеры, а также конкурентное замещение фосфата в процессах энергетического метаболизма. При этом способность бактерий к адаптации определяется возможностью конститутивного синтеза белков теплового шока и систем активного выведения токсикантов, что требует определенного уровня стрессового воздействия.

В периодических системах культивирования, широко применяемых в лабораторной практике и на пилотных установках, концентрация растворенного мышьяка и ионов тяжелых металлов изменяется во времени неравномерно. На начальном этапе процесса, при низкой плотности популяции и незначительной окислительной активности, токсиканты находятся преимущественно в твердой фазе и слабо влияют на метаболизм. Однако по мере окисления сульфидных минералов происходит массовый переход токсичных компонентов в раствор, что создает пиковую нагрузку, с которой микроорганизмы часто не справляются. В результате наблюдается явление, описываемое в литературе как «кислотный шок» или «токсический коллапс» культуры [1].

Использование автоматизированного регулирования позволяет принципиально изменить характер взаимодействия микроорганизмов с токсичными компонентами. В отличие от периодического режима, где параметры среды являются следствием протекающих реакций, в автоматизированной системе они становятся управляемыми переменными. Это дает возможность поддерживать pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и концентрацию ключевых ионов в диапазонах, которые, с одной стороны, достаточны для протекания целевых реакций окисления, а с другой, предотвращают резкие скачки, губительные для микробного сообщества.

Концептуальная схема системы автоматизированного регулирования

На основе анализа технических решений, описанных в работе Шестакова и Павленко [4], может быть предложена следующая конфигурация системы автоматизированного регулирования питательной среды для процесса биовыщелачивания упорных руд. Основу системы составляют три контура управления, интегрированных в единую программируемую логическую платформу.

Первый контур отвечает за поддержание кислотности среды в заданном диапазоне. Датчик pH, установленный непосредственно в биореакторе, передает сигнал на контроллер, который при отклонении от уставки инициирует подачу разбавленного раствора серной кислоты или, в случае закисления, раствора известкового молока. Поддержание pH на уровне 1,6–1,8 является критически важным, поскольку именно в этом интервале достигается оптимальное соотношение между активностью бактерий и минимальной растворимостью арсенатов железа, что позволяет снижать биодоступность мышьяка.

Второй контур управления ориентирован на контроль окислительно-восстановительного потенциала. Платиновый электрод в комбинации с электродом сравнения позволяет непрерывно отслеживать ОВП пульпы. Для Acidithiobacillus ferrooxidans характерен узкий диапазон потенциала, при котором сохраняется максимальная активность ферментов цепи переноса электронов. Превышение верхней границы этого диапазона свидетельствует о преобладании абиотического окисления и накоплении трехвалентного железа, тогда как снижение потенциала указывает на дефицит окисленного субстрата или накопление восстановленных форм токсикантов (например, арсенита). Алгоритм регулирования предусматривает корректировку интенсивности аэрации и дискретную подачу раствора сульфата железа (II) для удержания ОВП в технологически оптимальном интервале.

Третий контур, являющийся наиболее сложным с точки зрения инструментального обеспечения, предназначен для контроля соотношения двухвалентной и трехвалентной форм железа. Данный параметр может определяться с использованием спектрофотометрических анализаторов или косвенно рассчитываться на основе данных ОВП и температуры. Соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} напрямую связано с энергетическим состоянием микробного сообщества, двухвалентное железа является донором электронов, а трехвалентное - продуктом метаболизма и одновременно окислителем для сульфидных минералов. Поддержание этого соотношения на уровне 0,3–0,5 позволяет обеспечить баланс между потребностью бактерий в субстрате и предотвращением избыточного гидролитического осаждения солей железа на поверхности клеток и минеральных частиц.

Технологические преимущества предлагаемого подхода

Внедрение системы автоматизированного регулирования в процесс биовыщелачивания упорных руд, согласно расчетным данным и результатам моделирования, представленным в открытой литературе [3, 5], позволяет достичь ряда значимых технологических эффектов.

Прежде всего, поддержание сублетальных концентраций токсикантов (мышьяка, тяжелых металлов) создает условия для направленной адаптации микробного сообщества. В отличие от ситуаций острого токсического воздействия, когда бактерии переходят в состояние покоя или гибнут, постоянное присутствие малых доз токсичных ионов стимулирует синтез белков-шаперонов, ферментов антиоксидантной защиты и систем активного транспорта. Такое состояние, описываемое в микробиологии как «гормезис», позволяет сообществу сохранять высокий окислительный потенциал даже при работе с сырьем, которое в традиционных условиях считается непригодным для биовыщелачивания.

Кроме того, автоматизированное регулирование позволяет существенно повысить долю биогенного окисления в общем балансе процесса. В периодических системах без контроля параметров значительная часть сульфата железа(II) окисляется абиотически под действием растворенного кислорода, особенно при повышенных значениях pH и ОВП. Это приводит к нецелевому расходу реагента и образованию пассивирующих пленок ярозита и других вторичных минералов на поверхности рудных частиц. При точном поддержании оптимальных условий удается сместить баланс в сторону биотического окисления, что снижает удельный расход субстрата и улучшает кинетику процесса.

Следует также отметить положительное влияние автоматизации на стабильность работы оборудования. Резкие колебания pH и окислительно-восстановительного потенциала создают агрессивные условия для сенсоров, трубопроводов и самого биореактора. Поддержание параметров в узких диапазонах снижает коррозионную нагрузку и продлевает межремонтный интервал работы установки.

Заключение

Проведенный аналитический обзор литературных источников позволяет заключить, что применение автоматизированного регулирования питательной среды является перспективным направлением повышения технологической устойчивости процессов биовыщелачивания упорных руд. Переход от статического культивирования к динамическому управлению параметрами (ОВП, pH, соотношение форм железа) позволяет не только нивелировать нега-

тивное влияние высоких концентраций мышьяка и тяжелых металлов, но и, согласно современным представлениям, использовать токсиканты в качестве модулятора метаболической активности, поддерживая микробное сообщество в физиологически оптимальном состоянии.

Для подготовки инженеров-технологов по направлению «Химическая технология» данный подход представляет интерес с точки зрения интеграции знаний в области микробиологии, процессов и аппаратов химической технологии и систем автоматического управления. Разработанная концепция системы автоматизированного регулирования может быть положена в основу дальнейших проектных работ, направленных на создание промышленных установок биовыщелачивания для переработки труднообогатимого минерального сырья. Внедрение подобных систем позволит снизить длительность технологического цикла, уменьшить расход реагентов и повысить экономическую эффективность переработки упорных руд, что соответствует современным требованиям ресурсосбережения и экологической безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саралов, А. И. Адаптивность экстремофилов Archaea и Bacteria / А. И. Саралов // Микробиология. – 2019. – Т. 88, № 4. – С. 377-400. – DOI 10.1134/S0026365619040104. – EDN MUJFMN.

2. Лубенцов, В. Ф. САУ режимом охлаждения сред в биореакторах периодического действия / В. Ф. Лубенцов, Е. В. Лубенцова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 6. – С. 1-4. – EDN KPUEKP.

3. Лубенцова, Е. В. Системы автоматического управления процессами непрерывной стерилизации питательных сред и ферментации микробиологических производств : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лубенцова Елена Валерьевна. – Новочеркасск, 2004. – 19 с. – EDN NJQLEB.

4. Nutrient optimization in bioleaching: are we overdosing? / C. Falagán, T. Sbaffi, G. B. Williams [et al.] // Frontiers in Microbiology. – 2024. – Vol. 15. – DOI 10.3389/fmicb.2024.1359991. – EDN WEQSDR.

5. Четверикова, Д. В. Технология биологического выщелачивания металлов из отходов горнообогатительных производств : специальность 03.01.06 "Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Четверикова Дарья Владимировна. – Щёлково, 2013. – 23 с. – EDN SVGRWF.

СЕКЦИЯ
ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.313.8
Ашрафджонзода Шамситабрези, магистр, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Ashrafdzhonzoda Shamsitabrezi, Master's student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сухоруков Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sukhorukov Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ
COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROL METHODS FOR LOW-POWER BRUSHLESS DC MOTORS

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ основных методов управления бесколлекторными двигателями постоянного тока (БДПТ) малой мощности. Такие двигатели широко применяются в робототехнике, беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и приводах медицинского оборудования. В работе рассмотрены основные методы управления БДПТ, такие как трапецеидальный, синусоидальный и векторный. Выявлены преимущества и недостатки каждого метода, а также определены области их применения в зависимости от требований к точностным и динамическим характеристикам привода.
Abstract. This article presents a comparative analysis of the main control methods for low-power brushless DC motors (BLDC). These motors are widely used in robotics, unmanned aerial vehicles (UAVs), and medical equipment drives. The paper examines the main BLDC control methods, including trapezoidal, sinusoidal, and vector. The advantages and disadvantages of each method are identified, and their application areas are defined based on the requirements for the drive's precision and dynamic performance.
Ключевые слова: БДПТ, трапецеидальное управление, синусоидальное управление, векторное управление, маломощные двигатели, вентильный двигатель.
Key words: BLDC motor, trapezoidal control, sinusoidal control, vector control, low-power motors, valve motor.

Введение

Бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ), также называемые вентильными двигателями малой мощности, в последнее время получили широкое распространение в различных отраслях техники. Высокая удельная мощность, большой ресурс работы, отсутствие искрения и низкий уровень электромагнитных помех делают их востребованными для электроприводов БПЛА, промышленных и бытовых роботов, станков с ЧПУ, компьютерной техники и автомобильных систем [1]. Однако эффективность такого электродвигателя зависит от выбранного метода управления, который определяет качество регулирования скорости и момента, энергетические показатели, массогабаритные параметры силовой части, а также стоимость системы.

БДПТ представляет собой синхронную электрическую машину с постоянными магнитами на роторе и трёхфазной обмоткой статора. В отличие от коллекторных двигателей, коммутация обмоток в БДПТ осуществляется электронным способом с помощью инвертора напряжения на транзисторах. Для создания вращающего момента необходимо в каждый момент времени подавать напряжение на соответствующие фазы в зависимости от текущего углового положения ротора [2]. Определение углового положения ротора осуществляется двумя основными способами:

- прямым измерением с помощью датчиков (например, датчиков Холла, энкодеров или резольверов)
- косвенным методом (бессенсорное управление), при котором положение ротора определяется путём анализа электрических параметров.

Методы управления БДПТ

Существует три основных метода управления БДПТ, которые отличаются сложностью реализации и получаемыми характеристиками.

Трапецеидальное управление. Трапецеидальное (шестишаговое) управление считается самым простым методом управления электродвигателями. Суть метода заключается в том, что в каждый момент времени активны только две из трех фаз двигателя, а третья остается обесточенной. За один оборот происходит шесть переключений, формирующих ток, близкий по форме к прямоугольнику или трапецеидальному. При наличии датчиков Холла этот алгоритм управления прост и даже реализуется в обычных 8-битных микроконтроллерах. Если датчики Холла отсутствуют, то управление осуществляется путем определения момента, когда противо–ЭДС в отключенной фазе становится равной нулю. Основной проблемой данного метода является пульсация электромагнитного момента при коммутации, что приводит к вибрациям и шуму, особенно на малых скоростях [3].

Синусоидальное управление. При синусоидальном управлении используются напряжения синусоидальной формы, формируемые с помощью широтно – импульсной модуляции. Это позволяет обеспечить более плавное изменение токов в обмотках и уменьшить колебания крутящего момента по сравнению с трапецеидальным методом. Однако, для эффективной работы требуется более точная информация о положении ротора.

Векторное управление. Векторное управление в настоящее время считается наиболее совершенным методом. Оно основано на представлении токов статора в виде векторов во вращающейся системе координат, ориентированной по полю ротора. С помощью математических преобразований Парка – Кларка ток статора разделяется на две части: одна часть отвечает за формирование магнитного потока – это продольная составляющая, а вторая часть за создание крутящего момента, поперечная составляющая. Это позволяет управлять моментом двигателя независимо от потока. Такой принцип работы аналогичен принципу работы двигателей постоянного тока с независимым возбуждением [4]. Благодаря этому, векторное управление обеспечивает максимальную плавность хода, высокий КПД во всех диапазонах скоростей и возможность точного регулирования момента вплоть до нулевой скорости. Основным недостатком такого метода являются сложные программы управления и необходимость использования мощных микроконтроллеров для расчетов.

На рисунке 1 представлена структура применения рассмотренных методов управления в зависимости от типа устройств.

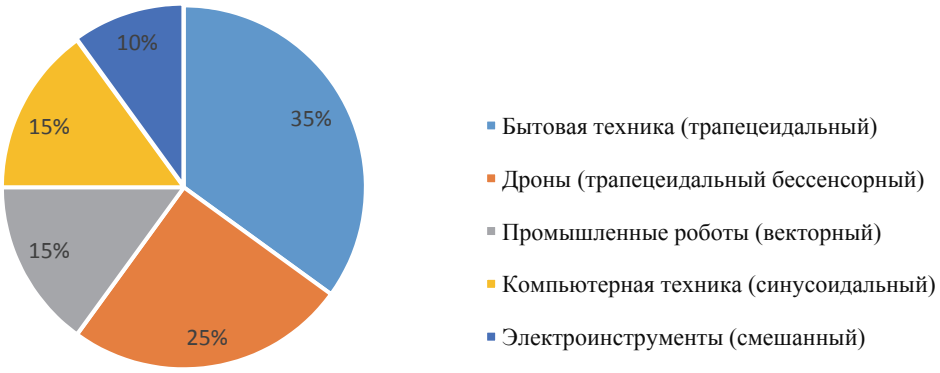


Рис. 1. Структура применения методов управления БДПТ малой мощности в современных технических устройствах

Сравнительный анализ методов

Трапецеидальный метод с датчиками Холла целесообразно применять в устройствах, где нет высоких требований к плавности хода и отсутствуют значительные ограничения по шуму. Такой метод часто используют в таких устройствах, как вентиляторы, насосы, компрессоры и некоторые виды инструментов. Бессенсорный трапецеидальный метод часто используют для управления двигателями мультикоптеров. Это объясняется тем, что данный

метод хорошо подходит для работы в средних и высоких скоростях, а также позволяет значительно снизить затраты на контроллер, что является важным решающим фактором при проектировании таких устройств.

Синусоидальное управление создает оптимальный баланс между производительностью и стоимостью. Оно обеспечивает двойное качество управления, то есть минимизирует шум и вибрации, и при этом остается экономически выгодным. Метод идеально подходит для тех случаев, когда важен низкий уровень шума и вибраций, а высокая скорость не является приоритетной задачей. Такой метод рекомендуется для применения в приводах вентиляции, систем кондиционирования и бытовой техники.

Векторное управление является оптимальным вариантом для систем, требующих высокой динамики и работы в широком диапазоне скоростей, включая точное позиционирование и удержание момента на нулевой скорости. Применение такого метода оправдано в таких областях, как промышленная робототехника, сервоприводы, станки с числовым программным управлением (ЧПУ), а также в электромобилях и гибридных силовых установках.

Заключение

Проведенный анализ показал, что выбор метода управления БДПТ малой мощности всегда является компромиссом между достижимым качеством регулирования и затратами на реализацию. Если приоритет – низкая стоимость, а требования к плавности хода минимальны, оптимальным будет трапецеидальный метод. Если важно снижение шума и повышение качества регулирования, но бюджет ограничен, стоит обратить внимание на синусоидальное управление. В случае, когда требуются максимальные динамические и точностные характеристики, векторное управление не имеет альтернатив. Таким образом, при выборе необходимо исходить из конкретных условий применения, поскольку универсального решения в данной области не существует.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И. Е. Овчинников. - СПб.: Корона – Век, 2020. - 336 с.

2. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учебник для студентов вузов / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2010. - 320 с.

3. Сонных М. Основные технические особенности вентильных двигателей / М. Сонных, Л. Ганнель // РИТМ. – 2010. – №11. – С. 14-16.

4. Анучин А. С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А. С. Анучин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373. с.

УДК 621.396

Бабушкин Вадим Павлович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Babushkin Vadim Pavlovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Марущенко Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Marushenko Sergey Grigorevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ РАДИОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА В СРЕДЕ MULTISIM
MODELING RADIO RECEIVER UNITS IN THE MULTISIM ENVIRONMENT

Аннотация. В статье рассматривается проблема недостаточной наглядности при изучении студентами принципов работы радиоприёмных устройств. Наибольшие затруднения обычно вызывает понимание функционирования отдельных высокочастотных узлов, в которых происходит генерация и преобразование сигналов. Цель работы состоит в построении и анализе моделей гетеродина и смесителя в среде Multisim. В ходе исследования сформированы учебные схемы указанных узлов.

Abstract. The article addresses the problem of insufficient visualization in teaching students the operating principles of radio receivers. The greatest difficulties are usually associated with understanding individual high-frequency units in which signal generation and frequency conversion take place. The aim of the work is to build and analyze models of a local oscillator and a mixer in the Multisim environment. During the study, educational circuit models of these units were developed.
Ключевые слова: радиоприёмное устройство, гетеродин, смеситель, промежуточная частота, схемотехническое моделирование, учебный процесс.
Key words: radio receiver, local oscillator, mixer, intermediate frequency, circuit simulation, educational process.

Введение

Современные радиоприёмные устройства включают ряд функциональных узлов, работа которых связана с генерацией, усилением, селекцией и преобразованием сигналов. При изучении этих устройств у студентов нередко возникают трудности, обусловленные тем, что многие процессы в высокочастотных каскадах недостаточно наглядны. Исследования, посвящённые использованию учебных программных средств для освоения супергетеродинного приёма, показывают, что визуализация сигналов и функциональных преобразований способствует более глубокому пониманию принципов работы радиоприёмных систем [1]. При этом среда Multisim является удобным инструментом для построения и анализа электрических схем, так как совмещает создание модели с возможностью наблюдения результатов её работы [2].

Несмотря на наличие теоретических описаний отдельных каскадов радиоприёмника, в учебной практике по-прежнему актуальна задача создания простых и понятных моделей, позволяющих наглядно продемонстрировать работу конкретных узлов. В связи с этим целью данной статьи является моделирование отдельных узлов радиоприёмного устройства в среде Multisim.

Материалы и методы

В работе использована среда схемотехнического моделирования Multisim, предназначенная для разработки, настройки и анализа электрических схем [2]. В качестве объектов исследования выбраны два узла радиоприёмного устройства: гетеродин и смеситель. На первом этапе была разработана электрическая схема гетеродина. В качестве основы использовался принцип автогенерации. Подобный подход широко применяется при разработке генераторов синусоидальных сигналов и показал свою эффективность в схемах, моделируемых в среде Multisim [3].

На втором этапе была построена модель смесителя. Для исследования принципа преобразования частоты в схему были введены два входных воздействия: входной радиосигнал и сигнал гетеродина. Работа смесителя рассматривалась как нелинейное взаимодействие этих сигналов.

Результаты и обсуждение

В результате моделирования была получена схема гетеродина, обеспечивающая формирование устойчивого высокочастотного сигнала. Электрическая схема данного узла представлена на рисунке 1. Построенная модель позволяет наглядно показать, как в цепи с положительной обратной связью возникают автоколебания и каким образом формируется опорный сигнал.

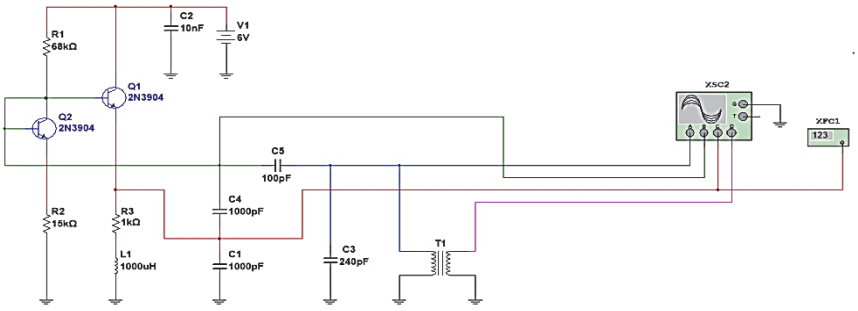


Рис. 1. Электрическая схема гетеродина, реализованная в среде Multisim

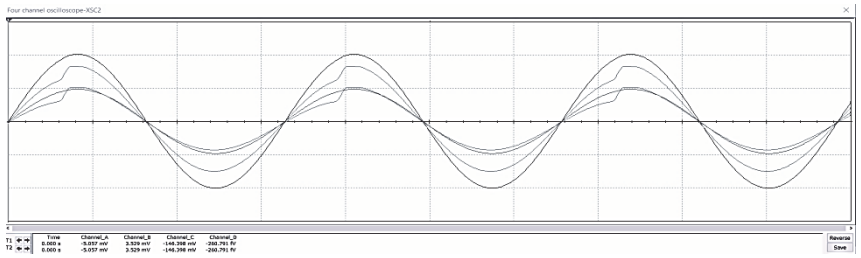


Рис. 2. Временная диаграмма работы схемы гетеродина

Полученная модель смесителя представлена на рисунке 3. В данной схеме один вход используется для подачи входного радиосигнала, а второй — для подачи сигнала гетеродина. При совместном воздействии этих сигналов на выходе формируется преобразованное колебание, содержащее новые частотные составляющие (рис.4). Таким образом, модель позволяет проследить основной принцип работы преобразовательного каскада супергетеродинного приёмника. Современные исследования смесителей и узлов понижающего преобразования частоты подтверждают важность таких каскадов для обеспечения стабильной и эффективной обработки радиосигналов [4].

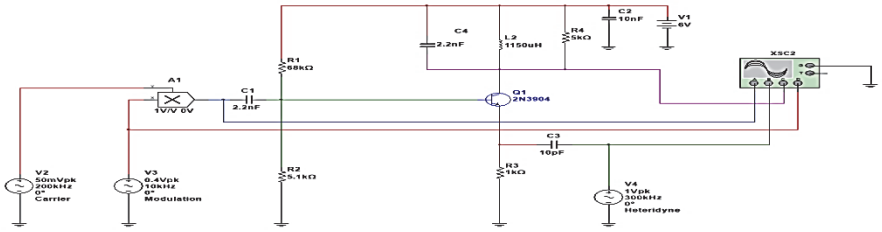


Рис. 3. Электрическая схема смесителя

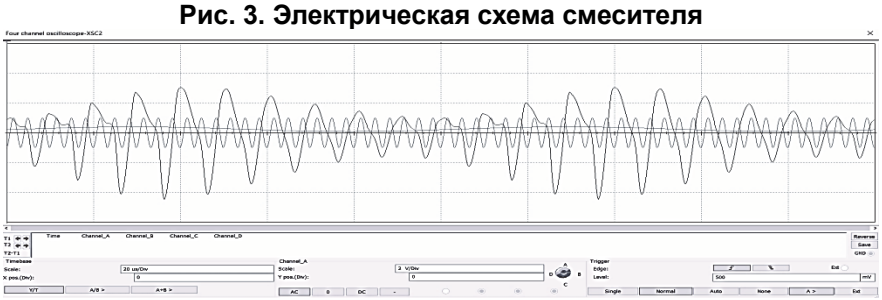


Рис. 4. Временная диаграмма работы схемы смесителя

Сравнение двух рассмотренных моделей показывает, что гетеродин и смеситель целесообразно изучать в логической связи друг с другом. Гетеродин формирует опорное колебание, а смеситель использует его для преобразования частоты входного сигнала

Практическая ценность предложенного подхода состоит в том, что студент получает возможность не только видеть схему, но и анализировать её поведение.

Заключение

В статье рассмотрено моделирование отдельных узлов радиоприёмного устройства в среде Multisim. В качестве основных объектов исследования выбраны гетеродин и смеситель.

Применение таких моделей способствует лучшему пониманию принципов работы радиоприёмных устройств, помогает связать теоретические положения с их схемной реализацией и формирует у студентов практические навыки анализа радиотехнических схем. Полученные результаты могут быть использованы при подготовке лабораторных работ, практических занятий и учебно-методических материалов по дисциплинам радиотехнического профиля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pardo-Quiles, D. Improving the Learning of Superheterodyne Demodulation of Frequency-Division Multiplexing Signals via the Educational Software Tool DOSHER / D. Pardo-Quiles, J.-V. Rodríguez, L. Juan-Llácer, J. Morales-Sánchez, I. Rodríguez-Rodríguez // Electronics. – 2023. – Vol. 12, no. 16. – Art. 3381. – https://doi.org/10.3390/electronics12163381. (дата обращения: 19.03.2026).

2. What Is NI Multisim? // NI : сайт. – URL: https://www.ni.com/tutorial/3192/en/ (дата обращения: 19.03.2026).

3. Говоров, А. В. Разработка автогенератора синусоидальных сигналов с перестройкой частоты / А. В. Говоров, С. Н. Шабунин // ИНТЕР – Информационные технологии и радиоэлектроника. – 2025. – С. 12–17. (дата обращения: 19.03.2026).
4. Yoo, I.-C. A Millimeter-Wave CMOS Down-Conversion Mixer with Transformer-Based Harmonic Suppression / I.-C. Yoo, C.-W. Byeon // Electronics. – 2025. – Vol. 14, no. 5. – Art. 943. – https://doi.org/10.3390/electronics14050943. (дата обращения: 19.03.2026).

УДК 621.3
Барников Владимир Вячеславович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Barnikov Vladimir Vyacheslavovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Aleksey Valerievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics and Innovative Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC TEMPERATURE CONTROLLER FOR OPTICAL ELEMENTS OF ROLLING STOCK

Аннотация. В статье представлены результаты разработки электронной системы регулирования температуры оптических элементов подвижного состава железнодорожных транспортных средств. Цель работы заключается в повышении безопасности передвижения путем разработки эффективного и надежного устройства обогрева осветительного оборудования, позволяющего поддерживать необходимую температуру стекол фар даже в сложных климатических условиях. Рассматриваются современные способы организации подогрева, предлагаются оптимальные технические решения и разрабатывается новая автоматизированная система, соответствующая актуальным стандартам качества и надежности, применимым к железнодорожному транспорту. Результаты работы демонстрируют потенциал предложенной системы для повышения эффективности эксплуатации и снижения рисков, вызванных неблагоприятными погодными условиями.
Abstract. The article presents the results of the development of an electronic system for regulating the temperature of the optical elements of railway vehicles. The purpose of the study is to improve the safety of transportation by developing an efficient and reliable heating device for lighting equipment that can maintain the required temperature of the headlight glasses even in challenging climatic conditions. The article discusses modern methods for heating, proposes optimal technical solutions, and develops a new automated system that meets current quality and reliability standards for railway transport. The results demonstrate the potential of the proposed system to improve operational efficiency and reduce risks caused by adverse weather conditions.
Ключевые слова: регулятор, электрическая схема, оптические элементы, поддержание температуры, безопасность движения.
Key words: regulator, electrical circuit, optical elements, temperature maintenance, and traffic safety.

Введение

Вопрос обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте является одним из приоритетных направлений развития современных технологий. Важным аспектом этой безопасности является прозрачность стекол фар подвижного состава, которая напрямую влияет на видимость и своевременное обнаружение препятствий на пути следования. На сегодняшний день одной из значимых проблем, отрицательно влияющих на работу осветительного оборудования, является обледенение и запотевание фар, особенно это характерно для LED-оптики, которая подвержена быстрому формированию конденсата и ледяных образований.

Традиционные методы борьбы с этими явлениями, такие как обогрев зеркал заднего вида и окон [1, 2], неэффективны для фар ввиду их специфических конструктивных особенностей и уязвимости к влаге и холоду. Другие решения, такие как использование антифризов или покрытий, не решают проблему полностью и зачастую ухудшают эксплуатационные характеристики самих фар. Таким образом, назрела необходимость разработки системы обогрева осветительного оборудования подвижного состава на основе поддержания заданной температуры внутри корпуса осветительного прибора, которая обеспечит прозрачность стекол фар, предотвратит их обледенение и запотевание, благодаря чему повысит безопасность движения в неблагоприятных погодных условиях. При этом значение поддерживаемой температуры должно определяется климатическими условиями эксплуатации осветительного прибора (влажностью, температурой наружного воздуха и др. факторами).

Целью данной работы является разработка системы обогрева осветительного оборудования подвижного состава с целью поддержания прозрачности стекол фар вне зависимости от погодных условий.

Функциональная схема

Для решения поставленной задачи была разработана электрическая схема регулятора температуры (рис. 1). Схема работает следующим образом [3].

Аналоговые сигналы с трёх терморезисторов BT типа PT1000 поступают на преобразователь сопротивления в напряжение U1, который формирует аналоговый сигнал в диапазоне 0 – 5 В. Фильтр нижних частот (ФНЧ) Z1 необходим для фильтрации высокочастотных помех от работы генератора, преобразователей напряжения и коммутационной аппаратуры тепловоза. Преобразование аналогового сигнала в цифровой выполняется с помощью аналого-цифрового преобразователя из состава микроконтроллера (МК) DD.

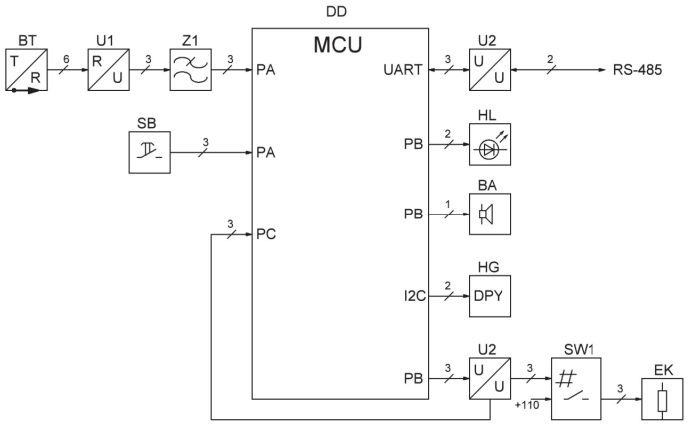


Рис. 1. Функциональная схема

МК сравнивает заданную температуру с сигналами термодатчиков и формирует сигналы управления драйверами силовых ключей U2. Эти драйверы управляют твердотельными коммутаторами SW1, выполненными на IGBT транзисторах. Коммутаторы SW1 управляют нагревательными элементами EK.

Для управления системой предусмотрено три клавиши управления SB.

Для настройки системы, отображении информации о режимах работы и об авариях предусмотрен дисплей HG. Система сигнализации включает в себя два световых индикатора HL красного и зелёного цветов, а также звуковой извещатель BA.

Для интеграции в бортовые компьютеры и удалённого доступа к системе предусмотрен преобразователь интерфейсов UART-RS485 (U2).

Управление нагревателями осуществляется ШИМ способом. Сигнал управления нагревателем формируется программно с использованием алгоритма пропорционально-интегрального регулятора.

Каналы управления нагревателями функционально эквивалентны. Электрические параметры каналов идентичны. Регулирование нагрева по каждому каналу изделия осуществляться независимо.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана система автоматического регулирования температуры оптических элементов подвижного состава.

Основные технические характеристики устройства:

- напряжение питания: 110В постоянного тока;
- микроконтроллер: ATmega324PB-AN;
- каналы измерения температуры: 3 независимых канала;
- разрешение АЦП: 10 бит;
- система удаленного мониторинга через интерфейс RS-485.

Система может быть рекомендована к внедрению на подвижном составе железнодорожного транспорта. Дальнейшее развитие проекта может включать расширение функционала системы и интеграцию с бортовыми системами управления поездом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Манойлина, С. З. Усовершенствование конструкций систем обогрева ветровых стекол / С. З. Манойлина, В. В. Шмыглев // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 25 ноября 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 101-106. – EDN HHACPB.
2. Игнатьев, В. В. Способы борьбы с запотеванием ветрового стекла автомобиля перед началом движения / В. В. Игнатьев, В. Н. Антошина // Известия МГТУ МАМИ. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 319-327. – DOI 10.17816/2074-0530-101415. – EDN SIPRHB.
3. Марченко, А. Л. Электроника : учебное пособие / А.Л. Марченко. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 242 с.

УДК 621.438

Бедина Полина Викторовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bedina Polina Viktorovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Рубашова Виктория Андреевна студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Rubashova Victoria Andreevna, student, Komsomolsk- na -Amur State University
Козлович Вячеслав Дмитриевич студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kozlovich Viacheslav Dmitrievich student, Komsomolsk- na -Amur State University
Катунцева Наталья Леонидовна, Старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Katuntseva Natalia Leonidovna, Senior Lecturer, Komsomolsk- na -Amur State University

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ: МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ
ENERGY EFFICIENCY: METHODS OF WASTE GAS HEAT RECOVERY IN GAS TURBINE INSTALLATIONS

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу и сравнительной оценке методов утилизации тепла отходящих газов газотурбинных установок (ГТУ). Рассматриваются циклы с рекуперацией, котлы-утилизаторы для парогазовых установок (ПГУ) и применение органического цикла Ренкина (ORC) для низкопотенциального тепла. Опираясь на современные термодинамические и эксергетические исследования, в статье приводятся количественные показатели эффективности различных схем утилизации, включая данные о чистой выходной мощности, снижении выбросов CO_2 и экономических показателях, таких как срок окупаемости и чистая приведенная стоимость.

Abstract. This study focuses on the analysis and comparative evaluation of methods for utilizing the waste heat of gas turbine units (GTUs). It examines cycles with heat recovery, waste heat boilers for combined-cycle power plants (CCPs), and the use of the organic Rankine cycle (ORC) for low-

grade heat. Based on modern thermodynamic and exergetic studies, the article provides quantitative indicators of the efficiency of various recycling schemes, including data on net power output, CO_2 emission reduction, and economic indicators such as payback period and net present value.
Ключевые слова: газотурбинная установка, утилизация тепла, цикл Ренкина, органический цикл, рекуперация.
Keywords: gas turbine plant, heat recovery, Rankine cycle, organic cycle, and recuperation.

Введение

Газотурбинные установки являются основой современной энергетики, авиации и морского транспорта благодаря высокой удельной мощности и надежности. Однако их ключевым недостатком является значительный сброс тепла с выхлопными газами. Температура выхлопа современных ГТУ составляет 450–600°C, что соответствует потерям до 70% от энергии сожженного топлива. В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения экологических норм утилизация этого вторичного теплового ресурса превращается из опционального улучшения в критически важный фактор конкурентоспособности. Повышение общей эффективности (КПД) установки позволяет не только экономить топливо, но и пропорционально сокращать углеродный след.

1. Прямая рекуперация: Оптимизация эффективности для систем малой мощности

Прямая рекуперация представляет собой фундаментальный термодинамический подход к повышению эффективности газотурбинных циклов. Механизм заключается в утилизации тепловой энергии отработанных газов для предварительного нагрева воздуха, поступающего в камеру сгорания, что приводит к сокращению удельного расхода топлива, необходимого для достижения заданной температуры на входе в турбину.

Функциональный принцип и конструктивные особенности: Процесс теплообмена осуществляется в рекуператоре (газовоздушном теплообменнике), где тепловая энергия горячих выхлопных газов передается сжатому воздуху, направляющемуся от компрессора к камере сгорания. Типичные конструктивные решения включают пластинчатые и трубчатые теплообменники. Актуальные исследования, обобщенные в специализированной литературе [1, 2], подчеркивают критическую роль выбора оптимальной геометрии и материалов (например, с использованием аддитивных технологий для создания сложных поверхностей) в минимизации гидравлических потерь и максимизации коэффициента теплопередачи.

Эффективность и потенциал: Внедрение рекуперации обеспечивает увеличение КПД газотурбинного цикла на 3-5 процентных пунктов. В некоторых специфических конфигурациях, таких как закрытые циклы с турбокомпрессором, синергетический эффект от применения рекуперации в сочетании с промежуточным охлаждением позволяет достичь базового КПД порядка 37-37.5%, формируя прочную основу для последующих этапов оптимизации.

2. Парогазовый цикл (ПГУ): Золотой стандарт большой энергетики.

Наиболее эффективным методом утилизации тепла высокопотенциальных газов (450–600°C) является бинарный парогазовый цикл. В этом случае ГТУ работает как надстройка (topping cycle), а паровая турбина – как донный (bottoming cycle).

- Принцип работы: Котел-утилизатор (Heat Recovery Steam Generator, HRSG) устанавливается на пути выхлопа ГТУ. В нем за счет тепла газов генерируется пар высокого давления, который приводит в действие паровую турбину. Согласно современным данным, при температуре выхлопа ~509°C и использовании только парового цикла (Steam Rankine Cycle, SRC) можно добиться чистой выходной мощности более 3 МВт при термическом КПД цикла около 19%.

- Рекордная эффективность: Комбинированный цикл позволяет достичь впечатляющих результатов. КПД современных парогазовых установок на базе мощных ГТУ достигает 60%, что является недостижимым показателем для любых других типов тепловых машин на органическом топливе.

3. Органический цикл Ренкина: Эффективное использование низкотемпературного тепла

Даже после прохождения через котел-утилизатор, дымовые газы сохраняют значительную температуру (часто ниже 200°C). Использование такого теплового потенциала в стандартных паровых циклах становится невыгодным и технически сложным из-за низких параметров пара. Именно здесь находит применение Органический цикл Ренкина (ORC). В отличие от традиционного цикла, где используется вода, в ORC применяются органические вещества с более низкой температурой кипения (например, R245fa, R1233zd, пентан) [3].

Принцип работы: ORC-установка функционирует по схожему с паровым циклом принципу, однако рабочее тело в ней испаряется при значительно более низких температурах.

Актуальные направления исследований:

Повышение производительности газотурбинных установок (ГТУ): Интеграция ORC-модуля после котла-утилизатора позволяет дополнительно извлекать тепловую энергию, увеличивая общий коэффициент полезного действия (КПД) ГТУ на величину до 1.4%. Исследование на примере турбины Solar Centaur 40 показало, что такое совместное использование приводит к экономии около 400 000 кубических метров природного газа ежегодно. Это эквивалентно снижению выбросов CO_2 на 810 тонн и финансовой выгоде в 269 000 евро в год.

Комплексные решения: Наиболее перспективными считаются каскадные схемы, где за основным паровым циклом (SRC) следуют один или несколько ORC-циклов (последовательные или каскадные ORC). Исследование, проведенное с помощью программы DWSIM, выявило, что конфигурация, объединяющая паровой цикл, последовательный и каскадный ORC (SRC + S-ORC + C-ORC), демонстрирует наилучшие результаты по совокупности показателей. Такая система способна генерировать чистую выходную мощность 3532,14 кВт, имеет чистую приведенную стоимость (NPV) в размере 1,478 млн евро и срок окупаемости 8 лет. Экологический эффект также впечатляет: ежегодное сокращение выбросов CO_2 составляет 12 452 тонны.

Инновационные расширители: Эффективность ORC напрямую зависит от характеристик используемой турбины или расширителя. Эксперименты с безлопаточными турбинами Тесла в микро-ORC-системах, предназначенных для работы с низкотемпературным теплом (90–130°C), показали изоэнтропийный КПД до 62.28%. Это открывает новые перспективы для развития децентрализованной энергетики и эффективного использования тепла с очень низким потенциалом.

Интеграция с системами охлаждения: Производительность ГТУ во многом зависит от температуры поступающего воздуха. ORC может быть задействован для привода абсорбционной холодильной машины, охлаждая воздух на входе в турбину и тем самым дополнительно повышая общий КПД установки. Исследования показывают, что комбинация утилизации тепла от выхлопных газов и тепла от промежуточного охладителя компрессора с помощью ORC может увеличить термодинамическую эффективность установки на 7.8–15.2% по сравнению с базовым вариантом.

- Экономика: Экономическая целесообразность ORC сильно зависит от масштаба. Для крупных проектов, как в случае с интеграцией в ПГУ, срок окупаемости может составлять 8-10 лет. Для более мелких проектов, например, утилизации тепла рубашки охлаждения двигателя, период окупаемости может составлять 4.6 года при использовании стандартного промышленного оборудования, что делает такие инвестиции весьма привлекательными.

Заключение

Оптимальный метод утилизации тепла отходящих газов ГТУ не является универсальным и определяется технико-экономическими показателями конкретного проекта. В крупной энергетике парогазовые установки остаются лучшим выбором, обеспечивая максимальный прирост КПД и окупаемость за счет масштаба. Однако для малой и средней энергетики, а также для повышения эффективности существующих объектов, наиболее перспективны гибридные решения. Компактные высокоэффективные рекуператоры [1, 2] и ORC-модули [3], особенно в каскадном исполнении, позволяют децентрализованно повышать эффективность, утилизируя тепло, которое ранее просто выбрасывалось в атмосферу. Развитие технологий, таких как турбины Тесла и поиск новых рабочих тел, обещает дальнейшее снижение стоимости и повышение рентабельности ORC-систем, что делает их неотъемлемой частью энергетики будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ардатов К. В., Нестеренко В. Г., Равикович Ю. А. Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2013. – № 71. – URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=46706 (дата обращения: 08.03.2026).
2. Чу В. Ч., Рассохин В. А., Барсков В. В., Матвеев Ю. В., Лаптев М. А., Басати Панах М. Использование высокоэффективных биметаллических рекуператоров малогабаритных газотурбинных установок мощностью до 100 кВт // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 5–16. – DOI: 10.17816/2074-0530-106091.
3. Жинов А. А., Кочетов А. А. Особенности теплоутилизационной энергоустановки на органическом цикле Ренкина // Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : материалы Региональной научно-технической конференции (Калуга, 23-25 апреля 2024 года). – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. – Т. 1. – С. 201–204.

УДК 621.317

Борисова Ольга Константиновна, студентка, Комсомольский-на-Амуре государственный университет.
Borisova Olga Konstantinovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Скрипилев Александр Александрович, канд. технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Skripilyov Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА ПОСРЕДСТВОМ АСКУЭ
INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY TRANSPORTATION IN THE KOMSOMOLSKY DISTRICT USING A METERS AND EQUIPMENT SYSTEM

Аннотация. Энергетическая отрасль Хабаровского края, включая Комсомольский район, сталкивается с задачами модернизации электросетей и снижения потерь электроэнергии. Внедрение автоматизированных систем коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ) становится ключевым инструментом для повышения эффективности транспорта электроэнергии. Интеллектуальные системы позволяют не только точно фиксировать потребление электроэнергии, но и оперативно управлять электрическими сетями, снижая как технические, так и коммерческие потери.

Abstract. The energy sector in Khabarovsk Krai, including the Komsomolsky District, is facing challenges in modernizing its power grids and reducing electricity losses. The implementation of automated commercial electricity metering systems (ACMS) is becoming a key tool for improving the efficiency of electricity transmission. Intelligent systems not only accurately record electricity consumption but also efficiently manage power grids, reducing both technical and commercial losses.

Ключевые слова: потери электроэнергии, учёт электроэнергии, прибор учёта электроэнергии, модернизация.
Keywords: electricity losses, electricity metering, electricity metering device, modernization.

Введение

В современном мире энергетика занимает ключевое место в обеспечении стабильного развития экономики и социальной сферы. Эффективное управление транспортом электроэнергии является важнейшим аспектом повышения надёжности электроснабжения, снижения потерь и оптимизации затрат. В условиях роста потребления электроэнергии и увеличения нагрузки на электросетевые системы, вопросы повышения эффективности транспортировки электроэнергии приобретают особую актуальность. Особенно актуально это для районов с интенсивным развитием промышленности и жилого фонда, таких как Комсомольский район, где качество электроснабжения напрямую влияет на социально-экономическую стабильность региона.

Основная часть

Проблематика транспорта электроэнергии в регионе

Комсомольский район характеризуется развитой, но местами устаревшей сетью электроснабжения. Современная система транспортировки электроэнергии сталкивается с рядом проблем, которые снижают её стабильность и увеличивают издержки. Одной из ключевых проблем является недостаточная автоматизация и недостаточный уровень мониторинга электросетей. В большинстве случаев существующие системы контроля и управления не позволяют своевременно выявлять и устранять аварийные ситуации, что ведёт к длительным отключениям и снижению качества электроснабжения. Это особенно актуально в условиях увеличения нагрузки и расширения сети, когда ручные методы управления становятся недостаточно эффективными.

Многие трансформаторные подстанции и линии электропередачи эксплуатируются уже много лет и требуют модернизации. Изношенные кабели, трансформаторы и другие элементы системы электроэнергии увеличивают риск аварийных ситуаций и снижают общую надёжность системы. В результате возрастает вероятность коротких замыканий, повреждений и отключений, что негативно сказывается на стабильности электроснабжения потребителей. Кроме того, устаревшие компоненты зачастую не позволяют интегрировать современные системы автоматизации и учёта, что ограничивает возможности оптимизации транспортировки электроэнергии.

АСКУЭ как инструмент модернизации

Многие потребители не имеют доступа к актуальной информации о потреблении электроэнергии, что мешает им более рационально использовать ресурсы и снижать нагрузку на сеть. Отсутствие системы обратной связи и информационной поддержки затрудняет внедрение энергосберегающих технологий и снижение затрат.

Отсутствие единой информационной платформы и механизма обмена данными приводит к дублированию усилий, задержкам в реагировании на аварийные ситуации и снижению общей эффективности системы. Это особенно актуально в условиях необходимости быстрого реагирования на изменения нагрузки и обеспечения стабильности электроснабжения.

АСКУЭ представляет собой совокупность счётчиков, каналов связи (PLC, GPRS, RS-485) и программного обеспечения, собирающих данные автоматически. Внедрение АСКУЭ обеспечивает ряд преимуществ[1,2]:

- Точность учёта: автоматизированный сбор данных исключает ошибки, связанные с человеческим фактором.
- Снижение коммерческих потерь электроэнергии: система позволяет выявлять безучётное потребление электроэнергии и незаконные подключения.
- Оперативное информирование: возможность моментального получения информации о неисправностях оборудования, что критически важно для надёжности электроснабжения в районе.

Преимущества внедрения АСКУЭ для Комсомольского района

Благодаря автоматизации процесса сбора данных, исключается человеческий фактор, что снижает вероятность ошибок и повышает точность учёта. Это, в свою очередь, позволяет энергоснабжающим организациям более точно определять объёмы потребления, что способствует правильному расчёту платежей и оптимизации тарифных решений.

АСКУЭ обеспечивает непрерывный мониторинг состояния оборудования и линий электропередачи в режиме реального времени. В случае возникновения аварии или отклонения от нормальных параметров система автоматически фиксирует проблему и передаёт сигнал операторам или автоматическим системам управления, что позволяет быстро локализовать неисправность, минимизировать время простоя и снизить возможные материальные потери. В результате повышается надёжность электроснабжения и снижается риск возникновения масштабных аварийных ситуаций.

Автоматизированные системы позволяют оптимизировать режимы работы оборудования, регулировать напряжение и мощность в зависимости от текущих потребностей, а также управлять распределением электроэнергии между различными участками сети.

Безопасность и защита данных являются неотъемлемой частью функционирования АСКУЭ. Современные системы используют методы шифрования, аутентификации и контроля доступа, что предотвращает несанкционированное вмешательство и обеспечивает целостность информации[3,4].

Автоматизированные системы позволяют своевременно выявлять и устранять неисправности, планировать профилактические мероприятия и оптимизировать режимы работы оборудования. В результате эксплуатационные расходы сокращаются, а надёжность и долговечность оборудования увеличиваются.

Заключение

Внедрение АСКУЭ в Комсомольском районе является необходимым шагом для модернизации энергетической инфраструктуры [5]. Это позволяет перейти от «пассивного» учёта к «активному» управлению сетями, обеспечивая снижение коммерческих и технических потерь, что в итоге повышает общую эффективность транспорта электроэнергии и надёжность энергоснабжения потребителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабенко, В. И., Шаповалов, А. В. (2020). Модернизация систем учёта электроэнергии в условиях цифровизации энергетики. Энергетика и Электрификация, 45-52.
2. Оценка рисков внедрения АСКУЭ в электрических сетях г. Иванова / И.О. Волкова, А.В. Малков, В.И. Рясин, Е.Б. Малкова // Вестник ИГЭУ. –2004. – Вып. 4 – С. 50–52.
3. Кузнецов, А. А.,Петрова, Е. В. (2019). Кибербезопасность в автоматизированных системах учёта электроэнергии. Электротехника и Электроэнергетика, 33-40.
4. Министерство энергетики Российской Федерации. (2021). Приказ № 1036 "Об утверждении требований к автоматизированным системам учёта электрической энергии".
5. Россети. (2023). Отчёт о деятельности компании за 2022 год. Россети.

УДК 621.317

Борисова Ольга Константиновна, студентка, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Borisova Olga Konstantinovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Скрипилев Александр Александрович, канд. технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Skripilyov Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

СНИЖЕНИЕ КОММЕРЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ МОДЕРНИЗАЦИИ УЧЁТА В С. ХУРБА КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА
REDUCING COMMERCIAL ELECTRICITY LOSSES USING THE EXAMPLE OF METERING MODERNIZATION IN THE VILLAGE OF KHURBA, KOMSOMOLSKY DISTRICT

Аннотация. В материале рассматривается кейс контрольного участка в селе Хурба, где за два года было модернизировано почти 20% приборов учета. Статья наглядно демонстрирует, как замена старых счётчиков на интеллектуальные системы позволяет снизить потери электроэнергии в три раза и какие перспективы это открывает для энергетической инфраструктуры поселения.
Abstract. This article examines the case of a control site in the village of Khurba, where nearly 20% of the meters were modernized over two years. The article clearly demonstrates how replacing old meters with smart systems can reduce electricity losses by a factor of three and the potential this offers for the village's energy infrastructure.

Ключевые слова: Интеллектуальные системы учёта (ИСУЭ), снижение коммерческих потерь, потери электроэнергии, энергоэффективность, модернизация электросетей, АСКУЭ.

Key words: Intelligent metering systems (IMSUE), reduction of commercial losses, energy efficiency, modernization of power grids, automated metering system.

ВведениеВопрос снижения коммерческих потерь в электрических сетях низкого напряжения остаётся одной из самых острых задач современной энергетики. Особенно актуально эта проблема стоит в сельской местности, в отдаленных регионах Сибири и ДВ, где износ приборов учёта и сложность контроля за потреблением электроэнергии традиционно приводят к высокому уровню неучтенного расхода электроэнергии.

Основная часть

В настоящее время модернизация электросетевого хозяйства в Хабаровском крае переходит на новый этап. На контрольном участке в селе Хурба, Комсомольского района подведены промежуточные итоги внедрения интеллектуальных приборов учёта (ИПУ) за 2024–2025 годы. Результаты показывают, что даже частичное обновление счётчиков способно радикально снизить потери электроэнергии.

Контрольный участок в с. Хурба, насчитывающий 698 потребителей, был выбран в качестве площадки для поэтапного внедрения интеллектуальных систем учёта электроэнергии (ИСУЭ). Процесс модернизации, стартовавший в 2024 году, преследовал две ключевые цели:

- обеспечить стопроцентную прозрачность расчётов.
- минимизировать разрыв между отпущенной и оплаченной электроэнергией.

Если в 2024 году проект носил точечный характер (установка 14 ПУ), то в 2025 году объем работ увеличился в разы — было смонтировано ещё 116 интеллектуальных приборов учёта, а именно:

- НАРТИС-И300-SP31-A1R1-230-5-100A-SN-RF433/1-P1-EHKMOQ1V3-D – 29шт.
- Нартис-И100-SP1-A1R1-230-5-100A-SS-RF433/1-P1-EHKMOQ1V3-D – 26шт.
- МИРТЕК-212-РУ-SP3-A1R1-230-5-80A-ST-RF433/1-G/5-P2-HKMOV3-D –**22**шт.
- МИРТЕК-232-РУ-SP31-A1R1-230-5-100A-T-RF433/1-G/5-P2-HKMOV3-D – 5шт.
- Мир С-05.10-230-5(80) PZF-KN-E-D Кл(1.0) 5(80)А 230В Ф(1) Ц(6) Д(2)- **32** шт.
- CE208 C4.846.2.OGR1.QYUDVFZ GB01 SPDS – **2** шт.

Для создания системы учёта в частном секторе применялись опорные приборы учёта электроэнергии, монтирующиеся на ВЛ опорах.

На сегодняшний день интеллектуальными приборами учёта охвачено 18,6% участка (130 домохозяйств). Это помогло собрать достаточно данных, чтобы оценить результат.

На текущий момент накопленный объём данных позволяет не просто фиксировать количество установленного оборудования, но и предметно оценивать эффективность потребления электроэнергии среди пользователей.

На рисунке 1 наглядно показано, как значительно увеличилось электропотребление благодаря модернизации счётчиков электроэнергии.

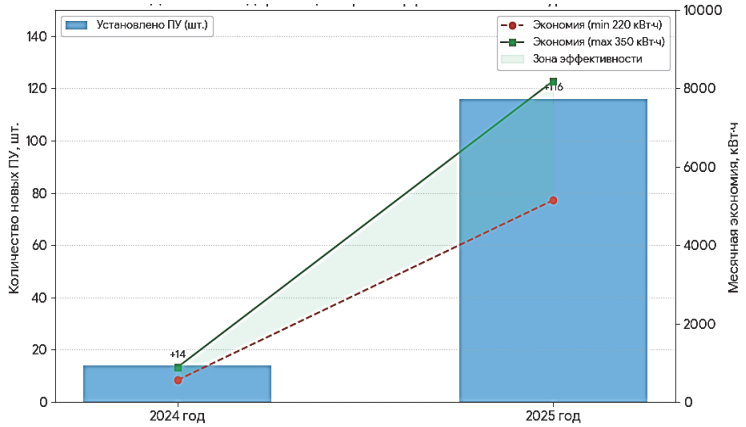


Рис. 1. Эффективность потребления электроэнергии среди пользователей контрольного участка с. Хурба, у которых оборудование для учёта было модернизировано в 2024-2025 годах

Исследование результата реализации автоматизированной информационной системы коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ) на примере филиала АО «ДРСК» «Северные электрические сети» продемонстрировало её значительную эффективность.

Для оценки эффективности потребления электроэнергии нами использовались два сценария потребления в частном секторе. Разница в цифрах обусловлена сезонностью и наличием энергоёмкого оборудования (насосы, электрообогрев) в домах жителей с. Хурба:

1) Мы предположили, что каждый дом потребляет всего 220 кВт·ч. Когда сравнили эту цифру с тем, сколько энергии реально ушло с подстанции (ПС Хурба), благодаря точности новых приборов учёта в провода, выяснилось, что «в никуда» улетает 5 148 кВт·ч в месяц. Проще говоря, это объём, который удалось «вывести из тени». В годовом исчислении это свыше 61 000 кВт·ч, которые ранее уходили в «небаланс».

2) Во втором, случае мы взяли более правдоподобную цифру — 350 кВт·ч на дом (ведь у людей есть холодильные камеры, насосы, обогреватели). При таком расчёте оказалось, что масштабы электроэнергии в сетях ещё выше — мимо счётчиков уходит 8 190 кВт·ч в месяц. Это почти 98 000 кВт·ч спасённой электроэнергии в год.

Цифры «5 148» и «8 190» — это объёмы электроэнергии, которую удалось обнаружить и вернуть в систему (сделать оплачиваемой) благодаря наведению порядка с приборами учёта.

Как видно из проведённого анализа основная эффективность достигается за счёт снижения коммерческих потерь с 25% до технологического минимума в 7%.

Кроме того, внедрение АСКУЭ делает несанкционированные подключения практически невозможными, т.к. новые приборы устанавливаются на опорах, на границе балансовой принадлежности и в недосягаемости вмешательства в него (прибор учёта) потребителя.

Автоматическая передача показаний в систему АСКУЭ исключает ошибки «ручного» ввода и человеческий фактор, что тоже немаловажно.

Потребители получают возможность контролировать свой расход и переходить на более выгодные многотарифные планы.

Заключение.

Подводя итог анализу модернизации контрольного участка в с. Хурба, можно сделать следующие выводы:

Высокая динамика внедрения: За два года (2024–2025) количество интеллектуальных точек учёта выросло с 14 до 130. Увеличение темпов работ в 8 раз в 2025 году позволило охватить критически важную часть участка — 18,6% от общего числа потребителей.

Доказанная эффективность: Даже при консервативном расчете (220 кВт·ч на абонента) проект уже обеспечивает экономию более 61 тысячи кВт·ч в год. В условиях реального потребления частного сектора (350 кВт·ч) этот показатель достигает 98 тысяч кВт·ч, что эквивалентно существенному снижению коммерческих потерь — с 25% до технологического минимума в 7%.

Потенциал масштабирования: Текущий опыт подтверждает, что интеллектуальный учёт является единственным эффективным инструментом борьбы с небалансом в частном секторе. Оставшиеся 568 потребителей (81,4% участка) представляют собой основной резерв для дальнейшего снижения потерь.

Для достижения максимального сетевого эффекта необходимо продолжить плановую замену приборов учёта. Полная цифровизация участка в 698 абонентов позволит не только исключить хищения, но и значительно снизить операционные расходы на обслуживание сетей в с. Хурба.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Методика определения коммерческих потерь в электрических сетях 0,4–10 кВ / под ред. А. В. Иванова. — Энергоиздат, 2021. С. 27-29

2. Оценка рисков внедрения АСКУЭ в электрических сетях г. Иванова / И.О. Волкова, А.В. Малков, В.И. Рясин, Е.Б. Малкова // Вестник ИГЭУ. –2004. – Вып. 4 – С. 50–52.

3. Корнилов С. С. Опыт внедрения автоматизированных систем контроля и учёта электроэнергии в сельских распределительных сетях // Вестник энергетики. — 2023. — Т. 12, № 4.

4. РД 34.09.101-94 Типовая инструкция по учёту электроэнергии при её производстве, передачи и распределении

5. Железко Ю. С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчётов. — М.: ЭНАС, 2005.

УДК 629.066

Бородин Михаил Александрович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Borodin Mikhail Alexandrovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Serikov Alexander Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State University

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО АССИСТЕНТА
DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE CAR ASSISTANT

Аннотация. В работе рассматривается разработка автономного электронного устройства – интерактивного автомобильного ассистента, предназначенного для повышения вовлечённости водителя и снижения негативных эффектов, возникающих при длительном управлении транспортным средством. Объектом исследования является процесс обработки инерционных и акустических данных с последующим формированием визуальных анимаций. Предметом работы выступают схемотехнические и программные решения, обеспечивающие функционирование устройства в режиме реального времени при ограниченных ресурсах. В ходе работы предложена архитектура устройства, обоснован выбор аппаратных компонентов, включая микроконтроллер, инерциальный датчик, акустический тракт и дисплей, а также рассмотрены принципы построения программной системы с использованием операционной системы реального времени. Дополнительно затронуты вопросы организации хранения анимаций и реализации механизма беспроводного обновления программного обеспечения.

Abstract. The paper considers the development of an autonomous electronic device – an interactive car assistant aimed at increasing driver engagement and reducing negative effects associated with prolonged driving. The object of the study is the processing of inertial and acoustic data followed by the generation of visual animations. The subject of the research includes hardware and software solutions that ensure real-time operation under limited computational resources. The proposed work describes the system architecture, justifies the selection of hardware components such as a microcontroller, inertial sensor, acoustic subsystem, and display, and outlines the principles of software design based on a real-time operating system. Additionally, the issues of animation storage and wireless firmware update mechanisms are addressed.

Ключевые слова: интерактивный автомобильный ассистент, автономное устройство, обработка сигналов, инерциальный измерительный блок, микроконтроллер, визуальные анимации.

Key words: interactive car assistant, autonomous device, signal processing, inertial measurement unit, microcontroller, visual animations.

Введение

В современных условиях развития автомобильной электроники наблюдается рост интереса к компактным автономным устройствам, направленным на повышение вовлечённости водителя и снижение негативных эффектов, возникающих при длительном управлении транспортным средством. Одним из таких эффектов является туннельное зрение, проявляющееся в сужении поля восприятия и снижении уровня концентрации внимания. В связи с

этим актуальной становится разработка технических решений, способных обеспечивать дополнительную сенсорную стимуляцию и поддерживать когнитивную активность водителя.

К существующим аналогам относятся такие устройства, как Poki Car Robot, Dasai Mochi и NIO NOMI. Устройство Poki Car Robot представляет собой компактный автомобильный аксессуар с анимационным отображением, реагирующий на динамику движения. Dasai Mochi реализует сходный подход, обеспечивая визуальную реакцию на ускорения и манёвры транспортного средства. Более функциональным решением является NIO NOMI — интегрированная система с элементами голосового управления и визуального интерфейса. Вместе с тем, указанные устройства либо обладают ограниченной вариативностью визуальных сценариев, либо требуют интеграции в автомобильную инфраструктуру. Кроме того, данные решения практически не представлены на российском рынке, что ограничивает их доступность.

В работе рассматриваются вопросы схемотехнического и аппаратного проектирования автономного электронного устройства, ориентированного на обработку инерционных и акустических данных с последующим формированием визуальных анимаций. В отличие от существующих аналогов, в разрабатываемой системе предусматривается возможность смены наборов визуальных состояний и «эмоций», что позволяет адаптировать поведение устройства под пользователя и расширяет сценарии взаимодействия.

Постановка задачи

Разрабатываемая система ориентирована на обработку сигналов различной физической природы, поступающих от инерционного и акустического каналов. В качестве источника информации о динамике движения используется инерциальный измерительный блок (IMU), предоставляющий данные о линейных ускорениях и угловых скоростях. Акустическая составляющая регистрируется с помощью микрофона, сигнал с которого должен быть предварительно усилен и стабилизирован по амплитуде.

Результатом работы устройства является вывод анимаций на дисплей, в соответствии с событиями, регистрируемыми датчиками. Таким образом, система выполняет преобразование сенсорных данных в визуально воспринимаемую форму.

Помимо базовой обработки сигналов, в рамках проектирования решается задача организации эффективного хранения анимаций в памяти устройства. Стандартные подходы оказываются неприменимыми ввиду ограничений вычислительных ресурсов, что требует разработки специализированного формата хранения. Дополнительно предусматривается возможность обновления встроенного программного обеспечения по беспроводному каналу, что накладывает требования на архитектуру системы хранения и загрузки прошивки.

Работа устройства должна осуществляться в режиме реального времени при ограниченном объёме памяти и вычислительной мощности, что определяет выбор как аппаратных компонентов, так и программных решений. На рисунке 1 приведена блок-схема устройства.

Аппаратная реализация

Аппаратную часть устройства планируется реализовать в виде единой печатной платы, на которой размещены все функциональные узлы. Такой подход позволит минимизировать габариты, сократить количество соединений и повысить надёжность системы в условиях эксплуатации.

В качестве центрального вычислительного элемента выбран микроконтроллер ESP32-S3, обладающий достаточной производительностью для обработки потоков данных в реальном времени. Наличие встроенного модуля Wi-Fi обеспечит возможность беспроводного взаимодействия и реализации механизма обновления прошивки. Дополнительным преимуществом является двухъядерная архитектура и поддержка многозадачности на уровне операционной системы реального времени.

Для регистрации параметров движения планируется использовать инерциальный измерительный блок LSM6DS3 [1], объединяющий акселерометр и гироскоп в одном корпусе. Применение данного компонента позволит получать информацию о характере движения с достаточными частотой обновления и точностью.

Акустическая подсистема проектируется с использованием аналогового предусилителя MAX9814 [2], оснащённого системой автоматической регулировки усиления. Это позво-

лит поддерживать стабильный уровень сигнала при изменении условий окружающей среды и упростит последующую цифровую обработку.



Рис. 1. Блок-схема устройства

Для отображения информации выбран жидкокристаллический дисплей на базе драйвера GC9A01 с разрешением 240×240 пикселей. Дисплей относится к классу IPS TFT LCD и поддерживает сигнал синхронизации обновления (TE), что позволит согласовать процесс передачи данных с моментом обновления экрана и снизить вероятность появления визуальных артефактов при выводе анимации.

Программная архитектура

Программную часть устройства планируется реализовывать с использованием операционной системы реального времени FreeRTOS [3], входящей в программную экосистему микроконтроллеров ESP32. Применение данной системы позволяет организовать параллельное выполнение задач с учётом их приоритетов.

В рамках программной архитектуры выделяются задачи, отвечающие за опрос сенсоров, обработку сигналов, формирование и вывод анимаций, сетевое взаимодействие. Разделение функциональности на независимые задачи позволяет повысить устойчивость системы и обеспечить выполнение критических операций без значительных задержек.

В проектируемой системе предусматривается возможность обновления встроенного программного обеспечения по беспроводному каналу с использованием интерфейса Wi-Fi. Реализация данного механизма предполагает загрузку новой версии прошивки во flash-память устройства с последующим переключением на обновлённый программный образ.

Одним из распространённых подходов является использование раздельных областей памяти для хранения текущей и обновляемой версии прошивки, что позволяет обеспечить корректное завершение обновления и при необходимости выполнить возврат к предыдущей версии. Такой механизм повышает надёжность системы и снижает риск потери работоспособности устройства при сбоях в процессе обновления.

Существенным преимуществом выбранной аппаратно-программной платформы является наличие встроенной поддержки OTA-обновлений [4] в микроконтроллерах семейства ESP32, а также в среде разработки ESP-IDF. Наличие готовых программных компонентов и API значительно упрощает реализацию данного функционала и снижает сложность разработки.

Таким образом, использование штатных средств платформы позволяет реализовать механизм обновления программного обеспечения с минимальными затратами и обеспечить гибкость дальнейшего развития системы.

Подсистема отображения и хранения анимаций

Формирование визуальной информации является ключевым элементом работы устройства, что предъявляет требования к эффективности обработки графических данных. Использование стандартных форматов анимации, таких как GIF, оказывается нецелесообразным ввиду высокой вычислительной сложности их декодирования, что приводит к снижению частоты кадров при работе на микроконтроллере до недопустимых значений. В связи с этим разрабатывается специализированный формат хранения анимаций, ориентированный на

минимизацию вычислительных затрат при воспроизведении. Основное внимание уделяется снижению объёма операций декодирования и оптимизации доступа к данным в памяти, что позволяет обеспечить плавное отображение анимации при ограниченных ресурсах.

Заключение

В ходе работы была разработана архитектура автономного электронного устройства, определены основные аппаратные компоненты и сформированы принципы обработки сенсорных данных. Особое внимание уделено вопросам организации визуального отображения и хранения анимаций, а также реализации механизма обновления программного обеспечения.

Предложенные решения позволяют создать компактную систему, способную функционировать в режиме реального времени и эффективно использовать доступные ресурсы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Садриев А. Г., Шамсутдинов Д. М., Вильцын С. А., Низамутдинов М. Х., Иванова О. В. Система определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания на основе измерения и анализа вибрации // Транспорт и информационные технологии. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 32–50.

2. Журавлев А. В., Ковалев С. П. Об использовании микроконтроллеров для обработки речевых сигналов // Информационные технологии. – 2015. – № 6. – С. 45–50.

3. Espressif Systems FreeRTOS (ESP-IDF Programming Guide) : документация. – URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/system/freertos.html (дата обращения: 04.04.2026).

4. Over-The-Air Updates (OTA) (ESP-IDF Programming Guide) : документация. – URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/system/ota.html (дата обращения: 04.04.2026).

УДК 621.316.72

Бутко Владимир Павлович, аспирант, ассистент кафедры «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Butko Vladimir Pavlovich, postgraduate student, assistant of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amure State University

Кузьмин Роман Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kuzmin Roman Vyacheslavovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amure State University

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКОЙ МИКРОГЭС НА ОСНОВЕ ДУГОСТАТОРНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ
BALLAST LOAD CONTROL DEVICES FOR MICROHYDRO POWER PLANTS BASED ON AN ARC-STATOR INDUCTOR GENERATOR AND THEIR CHARACTERISTICS

Аннотация. В работе рассматриваются устройства управления балластной нагрузкой микроГЭС на основе дугостаторного индукторного генератора, а также их характеристики. Были выбраны следующие устройства управления балластной нагрузкой: тиристорный мост, выпрямительно-инверторный преобразователь, тиристорный регулятор переменного напряжения. Определены время быстродействия системы стабилизации и суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения при использовании предложенных устройств управления.

Abstract. This paper examines ballast load control devices for microhydroelectric power plants based on an arc-stator inductor generator, as well as their characteristics. The following ballast load control devices were selected: a thyristor bridge, a rectifier-inverter converter, and a thyristor AC voltage regulator. The response time of the stabilization system and the total harmonic distortion coefficients of the voltage using the proposed control devices were determined.

Ключевые слова: дугостаторный индукторный генератор, микрогидроэлектростанция, система стабилизации, выходные электрические параметры, балластная нагрузка.
Key words: arc-stator inductor generator, microhydroelectric power station, stabilization system, output electrical parameters, ballast load.

Введение

При исследовании системы регулирования и стабилизации выходных электрических параметров с одним из устройств управления балластной нагрузкой микроГЭС на основе дугостаторного индукторного генератора [1] было выявлено, что необходимым является поддержание коэффициента активной мощности (cosφ) суммарной нагрузки на уровне равном 0,8. Это условие является необходимым для устойчивой работы системы стабилизации в пределах 0,05-1,185 о.е. по полной мощности, то есть обеспечение перегрузочной способности генератора в пределах 18,5%. Рассмотренный в публикации [2] классический подход к управлению данное условие обеспечить не может, в связи с чем возникает необходимость поиска и исследования дополнительных устройств управления балластной нагрузкой микроГЭС на основе дугостаторного индукторного генератора, а также их характеристик.

Цель работы: поиск, описание и исследование устройств управления балластной нагрузкой микроГЭС на базе дугостаторного индукторного генератора.

Задачи работы:

- на основе критического анализа литературы произвести поиск и описание устройств управления балластной нагрузкой, соответствующих определенным критериям;
- исследование предложенных устройств управления балластной нагрузкой с помощью тестовых испытаний на имитационной модели системы электроснабжения с микроГЭС, включающей дугостаторный индукторный генератор.

Устройства управления балластной нагрузкой микроГЭС

Для определения устройств управления необходимо обозначить критерии, которым они должны соответствовать. Были выбраны следующие критерии:

- простота конструкции и схемотехники;
- низкая инерционность элементной базы, соответственно, высокое быстродействие;
- низкая стоимость.

Первому и третьему обозначенным критериям соответствуют достаточно большое количество устройств. Второй критерий в данном случае является определяющим, поскольку достаточно сильно сужает круг устройств.

В соответствии с определенными критериями выбраны три устройства на основе полупроводниковой элементной базы (табл. 1).

Таблица 1

Преимущества и недостатки полупроводниковых устройств управления

Устройство	Основные преимущества	Основные недостатки
Тиристорный мост	Простота схемотехники	Генерация высших гармоник
Тиристорный регулятор переменного напряжения (ТРН)	Компактность и простая схемотехника	Возможные электромагнитные помехи
Выпрямительно-инвенторный преобразователь (ВИП)	Широкий диапазон регулирования	Сложность схемы и высокая стоимость

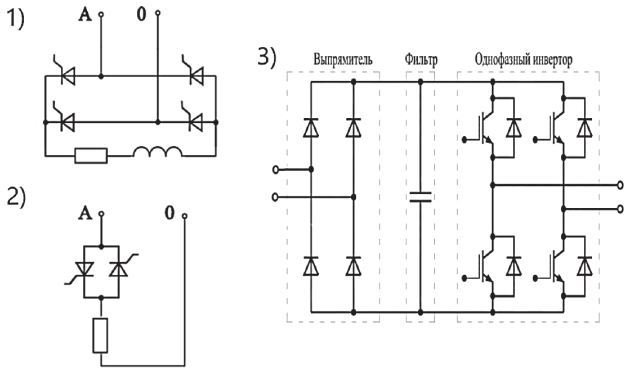


Рис. 1. Принципиальные схемы устройств управления:
1 – тиристорный мост; 2 – ТРН; 3 – ВИП

Для выбранных устройств управления (рис.1) необходимо провести дополнительные исследования с помощью тестовых испытаний на имитационной модели системы электроснабжения с микроГЭС, включающей дугостаторный индукторный генератор.

Результаты исследований имитационной модели с выбранными устройствами управления

Основными исследуемыми показателями при оценке возможности использования предложенных устройств в составе систем управления балластной нагрузкой микроГЭС на основе дугостаторного индукторного генератора были: время быстродействия системы с предложенным устройством (динамическая характеристика) и коэффициент суммарных высших гармонических составляющих напряжения (K_{UH}) (статическая характеристика).

Время быстродействия системы всех предложенных устройств в условиях имитационного моделирования [3,4] лежит в пределах 0,025 с ± 10%, что соответствует достаточному времени стабилизации выходных электрических параметров. Суммарные коэффициенты высших гармонических составляющих в зависимости от величины полной мощности полезной нагрузки ($S_п$) при cosφ=0,8 представлены на рис. 2.

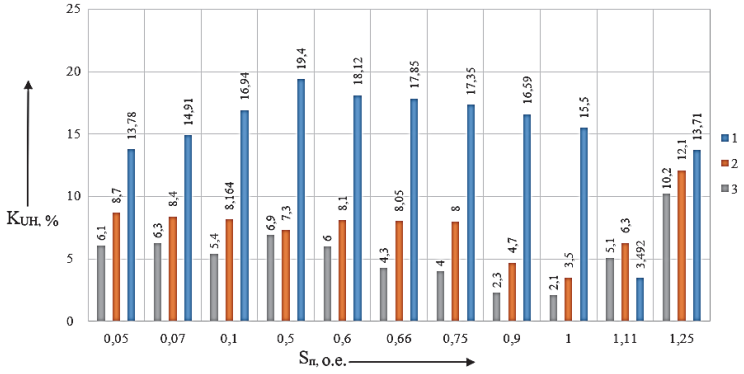


Рис. 2. Зависимость $K_{UH} = f(S_п)$:
1 – тиристорный мост; 2 – ТРН; 3 – ВИП

Заключение

Работа выполнена в рамках поставленных задач. Произведен поиск и краткое описание устройств управления балластной нагрузкой, предложены следующие устройства управления: тиристорный мост, ТРН и ВИП. Проведены тестовые испытания предложенных устройств на имитационной модели системы электроснабжения с микроГЭС, включающей дугостаторный индукторный генератор. Определены статические и динамические характеристики предложенных устройств. Время быстродействия рассмотренной системы с предложенными устройствами соответствует достаточному значению до 0,05 с. Суммарные коэффициенты высших гармонических составляющих напряжения не превышали 20 % на всем диапазоне исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Бутко В.П., Кузьмин Р.В. Система децентрализованного электроснабжения на базе микроГЭС с автобалластной системой стабилизации выходных параметров // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 1(38). С. 26-30. EDN FISDXQ.
2. Бутко В.П., Кузьмин Р.В. Исследование децентрализованной системы электроснабжения на основе микроГЭС // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 3, С. 59-65. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.007.
3. Черный С.П., Савельев Д.О., Сбитнев Н.Р., Саяпина П.О. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2024. № 1(73). С. 4-10. EDN WKOYPI.
4. Иванов С.Н., Ким К.К., Приходченко О.В., Просолович А.А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. Т. 1, № 1(41). С. 37-44. EDN AKBSNQ.

УДК 621.31
Винтоняк Виктория Михайловна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Vintonyak Victoria Mikhailovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бузикаева Алина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Buzikaeva Alina Valerievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State University

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ МОНТАЖНОГО КРАНА НА БАЗЕ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ANALYSIS OF THE ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF THE BOOM LIFTING MECHANISM OF AN ASSEMBLY CRANE BASED ON SCALAR CONTROL

Аннотация. В статье представлен анализ системы управления электроприводом механизма подъема стрелы монтажного крана. Рассмотрен скалярный метод управления асинхронным двигателем с акцентом на их применение в данном механизме. Представлены результаты моделирования, позволяющие оценить динамические характеристики и эффективность применяемого метода управления. Результаты исследования могут быть использованы для выбора оптимальной системы управления электроприводом подъема стрелы.
Abstract. This article presents an analysis of the control system for the electric drive of a boom hoist mechanism for an assembly crane. A scalar method for controlling an asynchronous motor is considered, with an emphasis on its application in this mechanism. Simulation results are presented, allowing one to evaluate the dynamic characteristics and effectiveness of the applied control method. The results of the study can be used to select the optimal control system for the boom hoist electric drive.
Ключевые слова: монтажный кран, механизм подъема стрелы, асинхронный двигатель, скалярное управление, системы автоматического регулирования.
Key words: mounting crane, boom lifting mechanism, asynchronous motor, scalar control, automatic control systems.

Введение

Монтажные краны, являясь ключевыми грузоподъемными механизмами, требуют надежных и эффективных электроприводов. Электропривод с частотным регулированием широко применяется в этой области, обеспечивая экономичность, надежность и широкий

диапазон регулирования скорости. В механизмах подъема стрелы преимущественно используются асинхронные двигатели переменного тока, характеризующиеся повторно-кратковременным режимом работы, широкими диапазонами регулирования скорости и значительными перегрузками при пуске и торможении. Для управления такими приводами разработаны различные методы частотного регулирования, включая скалярное и векторное управление, каждое из которых имеет свои особенности и области применения. В данной статье будет рассмотрен скалярный принцип управления.

Основная часть

Скалярный метод управления базируется на одновременном изменении частоты и амплитудных значений модулируемых переменных двигателя (таких как напряжение, магнитный поток, потокосцепление и токи в обмотках статора). Управляемость асинхронной машины достигается за счет согласованной регулировки либо частоты вместе с напряжением, либо частоты совместно с током статора. Первый подход классифицируется как частотное управление, а второй – как частотно-токовое управление [1, 2].

В качестве базовой рассматривается структура «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД), дополненная обратной связью по скорости, что позволяет расширить диапазон регулирования [3]. На рис. 1 представлена функциональная схема такой системы, где преобразователь частоты выступает в роли источника напряжения.

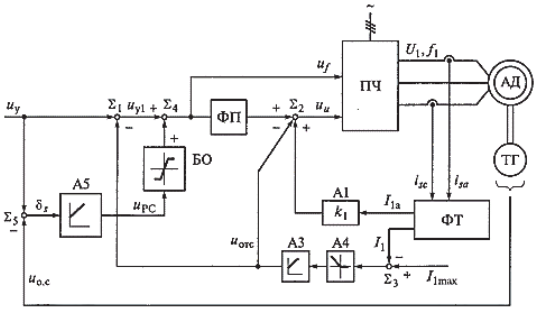


Рис. 1. Функциональная схема системы ПЧ-АД с обратной связью по скорости

Исходя из требований к регулятору, настройка системы осуществляется на модульный оптимум.

Как следует из приведенной функциональной схемы, электропривод представляет собой одноконтурную систему, замкнутую по скорости вращения. Основная задача такой структуры – формирование статических механических характеристик, гарантирующих требуемую перегрузочную способность двигателя во всем спектре рабочих частот и нагрузочных моментов [4].

Сделаем допущение, что двигатель работает на линейном участке механической характеристики, тогда:

$$\begin{cases} (1 + \mathrm{T_э})\mathrm{M} = \beta(\omega_0 - \omega); \\ \mathrm{M} - \mathrm{M_c} = J_\Sigma p\omega. \end{cases}$$

На рис. 2 представлена структурная схема линеаризованной системы, функциональная схема которой приведена на рис. 1, при работе АД на участке механической характеристики в пределах значений абсолютного скольжения $s_a < s_k$.

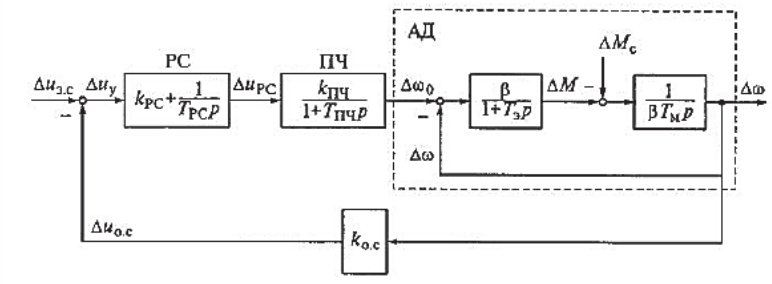


Рис. 2. Структурная схема системы ПЧ – АД с обратной связью по скорости

Имитационная модель системы ПЧ-АД с обратной связью по скорости построена в среде Simulink и изображена на рис. 3.

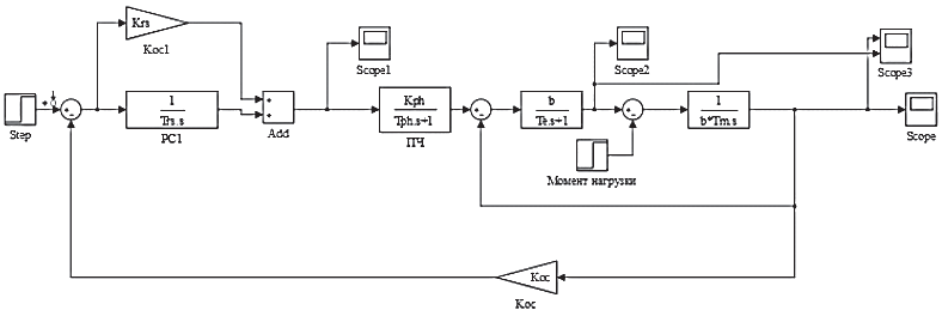


Рис. 1. Имитационная модель системы ПЧ-АД с обратной связью по скорости

Подадим на вход системы регулирования единичный ступенчатый сигнал и проследим изменения выходной координаты. График переходного процесса представлен на рис. 4.

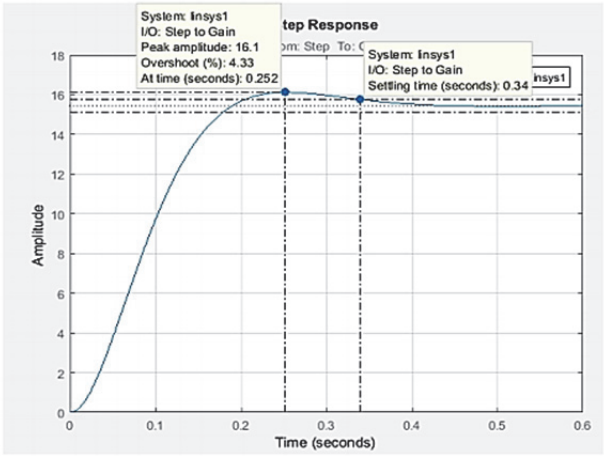


Рис. 2. Переходная характеристика

По рис. 4 определяем основные показатели качества переходного процесса: время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 0{,}34$ с, перерегулирование $\sigma = 4{,}33$ %.

На рис. 5 представлена реакция системы на возмущающее воздействие. При подаче номинального возмущающего воздействия, в качестве которого выступает номинальный момент, система отрабатывает возмущающее и возвращается в состояние равновесия. Однако, видно на рис. 6, что пусковой момент крайне велик, что может отрицательно сказаться на ресурсе оборудования, а также привести к существенным перегрузкам (рывки, люфт в передачах), поэтому существует необходимость в применении задатчика интенсивности, что будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

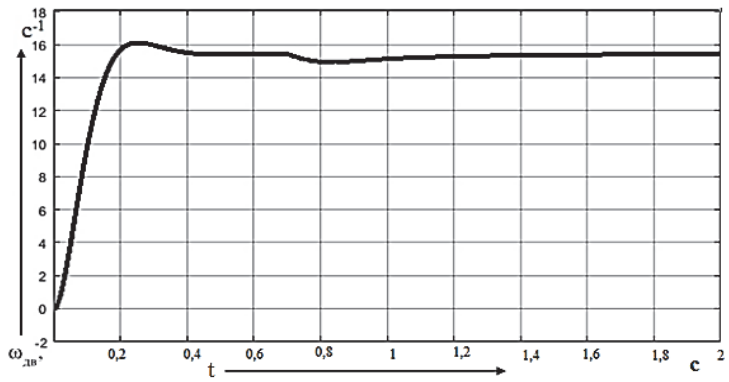


Рис. 3. Реакция системы на возмущающее воздействие

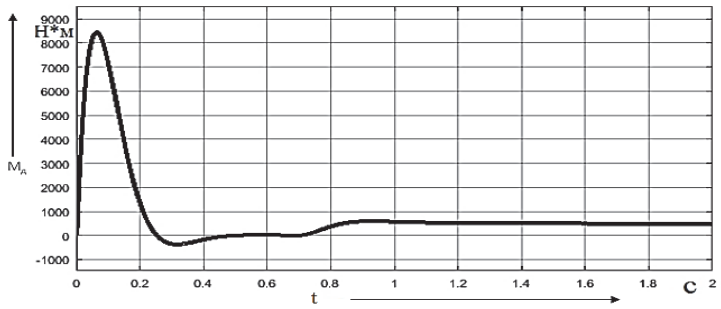


Рис. 4. Переходной процесс по координате $M_д$

Заключение

В заключение необходимо отметить, что основным преимуществом скалярного управления является простота реализации таких систем регулирования. Также такие системы автоматического управления обеспечивают достаточный диапазон регулирования, перегрузочную способность. При корректном выборе параметров регулятора и мощности двигателя скалярная система автоматического управления способна демонстрировать желаемые показатели качества регулирования. С экономической точки зрения такое решение является оправданным, поскольку затраты на его реализацию невелики относительно простоты использования и обслуживания. Однако кроме положительных сторон можно выявить и ряд недостатков такого принципа управления: невозможность регулирования момента на валу двигателя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Терехов, В. М. Система управления электроприводов / В. М. Терехов. – М.: Машиностроение, 2005. – 299 с.

2. Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

3. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров / С. П. Черный, Д. О. Савельев, Н. Р. Сбитнев, П. О. Саяпина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 1(73). – С. 4-10. – EDN WKOYPI.

УДК 621.31

Винтоняк Виктория Михайловна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Vintonyak Victoria Mikhailovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Бузикаева Алина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Buzikaeva Alina Valerievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State University

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА МОНТАЖНОГО КРАНА
DEVELOPMENT AND MODELING OF AN ELECTRIC CRANE LIFTING DRIVE

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки и анализа электропривода механизма подъема стрелы монтажного крана, являющегося ключевым элементом для обеспечения точности, плавности и безопасности работы грузоподъемных механизмов. Обосновывается выбор асинхронного электропривода с частотным регулированием как наиболее перспективного решения, благодаря его экономичности, надежности и широкому диапазону регулирования скорости. Проведен сравнительный анализ различных методов управления

асинхронным электроприводом (скалярное, векторное, частотно-токовое), с акцентом на их применимость в условиях работы монтажного крана. На основе проведенных расчетов и анализа параметров выбрано конкретное электрооборудование, а также предложены решения для настройки системы автоматического регулирования, включая использование задатчика интенсивности для исключения перегрузок. Представлен сравнительный анализ типов крюковых подвесок и схема установки ограждения на канатном блоке.
Abstract. This article examines the development and analysis of an electric drive for a boom hoist mechanism for an erecting crane, a key element in ensuring the precision, smoothness, and safety of lifting mechanisms. The choice of an asynchronous electric drive with variable frequency drive (VFD) is justified as the most promising solution due to its cost-effectiveness, reliability, and wide speed control range. A comparative analysis of various asynchronous electric drive control methods (scalar, vector, and frequency-current) is conducted, with an emphasis on their applicability to erecting crane operating conditions. Based on calculations and parameter analysis, specific electrical equipment was selected, and solutions for adjusting the automatic control system are proposed, including the use of an intensity controller to prevent overloads. A comparative analysis of hook suspension types and a diagram for installing a guardrail on a rope block are presented.
Ключевые слова: монтажный кран, асинхронный двигатель, скалярное управление, векторное управление, частотно-токовое управление, грузоподъемные механизмы.
Keywords: crane, asynchronous motor, scalar control, vector control, frequency-current control, lifting mechanisms.

Введение

Современные грузоподъемные механизмы, такие как монтажные краны, требуют более эффективных, а также надежных электроприводов, которые должны обеспечивать максимально возможную точность управления, плавность хода, безопасность работы. На текущий момент времени в мире, электрический привод, с использованием частотного регулирования, является одним из самых распространенных и востребованных решений в этой области, благодаря своей экономичности, надежности, широкому диапазону регулирования скорости и простоте управления [1].

В электроприводах грузоподъемных машин, наиболее часто применяются различные двигатели переменного или постоянного тока. В механизмах подъема, для обеспечения плавности пуска и широкого диапазона регулирования скорости часто применяют двигатели постоянного тока. Щеточно-коллекторный узел является слабым местом, и требует периодического технического обслуживания. Для настоящего времени
механизмов подъема наиболее предпочтительным вариантом является асинхронный электропривод с частотным регулированием. Особенностью работы этих приводов является повторно-кратковременный режим работы, широкие диапазоны регулирования скорости и значительные перегрузки при пуске и торможении механизмов. Различают несколько основных метода частотного управления асинхронным электроприводом - это векторный и скалярный. Скалярное управление в свою очередь характеризуется простотой реализации, а векторное управление обеспечивает более высокую точность при регулировании скорости и момента.

Цель - разработка электропривода механизма подъема стрелы монтажного крана, а также выполнение сравнительного анализа различных принципов управления электроприводом.

В задачи исследования входит:

1 изучение устройства и конструкции механизма подъема стрелы;

2 анализ приводов, используемых в механизмах подъема стрелы;

3 расчет и выбор основного электрооборудования для разрабатываемой системы;

4 расчет и настройка систем автоматического регулирования (САР) с применением различных принципов управления;

5 сравнительная оценка используемых САР.

Основная часть

Рассмотрим методы имитационного и математического моделирования, а также методы настройки САР. Существенное количество грузоподъемных машин имеет электропривод основных рабочих механизмов, поэтому работа таких машин качественно зависит от показателей используемого электропривода [2].

Рассмотрим кинематическую схему механизма подъема стрелы монтажного крана (рис. 1), которая состоит из стрелового полиспаста, стреловой лебедки, барабана, редуктора и электродвигателя. Также рассмотрены типы крюковых подвесок (нормальная и укороченная), и показана схема установки ограждения на канатном блоке (рис. 2, рис. 3).

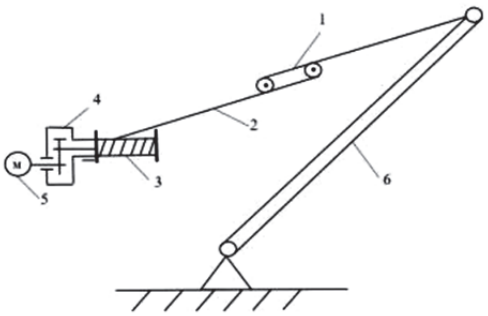


Рис. 1. Кинематическая схема механизма подъема стрелы: 1 – стреловой полиспаст; 2 – стреловая лебедка; 3 – барабан; 4 – редуктор; 5 – двигатель; 6 – стрела

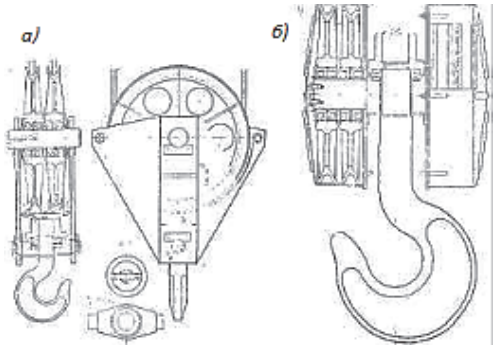


Рис. 2. Типы крюковых подвесок: а) нормальная; б) укороченная

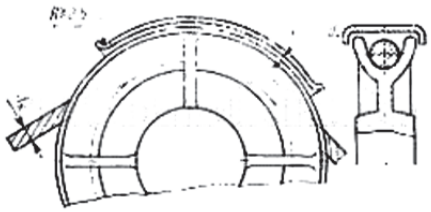


Рис. 3. Установка ограждения на канатном блоке

Механизм подъема стрелы обязательно должен иметь в первую очередь устройства электрической защиты, механические тормоза, обеспечивать плавность пуска, регулирования скорости, а также определенные ограничения максимального значения момента [3]. В монтажных кранах наиболее распространены электропривод ТП-ДП, ТРН-АДФ и ПЧН-АДД. Для механизма подъема стрелы применяются электроприводы переменного тока (асинхронные двигатели) с частотным управлением, обеспечивающие широкие диапазоны регулирования скорости, а также большую надежность и меньшие массогабаритные характеристики, чем двигатели постоянного тока [4-5].

При определении необходимого типа электропривода, учитывались следующие факторы: такие как мощность двигателя, требования к регулированию скорости и момента, экономичность, надежность. На основе анализа для магистерской диссертации был выбран асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в комплекте с частотным преобразователем, как наиболее соответствующий требованиям к электроприводу кранового оборудования.

В результате проведенных расчетов и анализа параметров было принято следующее оборудование - двигатель серии 4МТКФ (рис. 4), а также частотный преобразователь Micromaster 430 фирмы Siemens (рис. 5).



Рис. 4. Двигатель 4МТКФ2П280SB4



Рис. 5. Преобразователь частоты Micromaster 430

Заключение

Самым оптимальным для рассматриваемого механизма подъема можно считать САР со скалярным управлением. Для исключения перегрузок, в системе управления следует использовать задатчик интенсивности, что позволяет ограничить максимальный момент и мощность.

Система управления с векторным управлением имеет высокий уровень точности, быстро реагирует на нагрузку, а также обладает высоким КПД. При все при этом, метод векторного управления имеет большую сложность вычислений, для работы необходимо знание параметров двигателя и механизма.

Система с частотно-токовым управлением имеет хорошие динамические показатели, но является довольно сложной в реализации по сравнению со скалярным управлением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горюнов, Н.Н. Строительные машины / Н.Н. Горюнов. – М.: Машиностроение, 1978. – 237 с.

2. Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины: учеб. пособие / А.А. Вайнсон – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.

3. Анализ задачи исследования электромагнитного ускорителя / П.О. Саяпина, Р.Ф. Крупский, С.П. Черный, Д.О. Савельев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 3(75). – С. 97-102. – EDN AMDYDK.

4. Терехов, В.М. Система управления электроприводов / В.М. Терехов. – М.: Машиностроение, 2005. – 299 с.

5. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

УДК 004.021

Ворощенко Василий Даниилович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Voroschenko Vasily Danilovich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NONLINEARITIES ON THE POSITIONING ACCURACY OF A MOBILE ROBOT UNDER TECHNOLOGICAL PROCESS CONDITIONS

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения точности позиционирования мобильной платформы, используемой в составе транспортно-манипуляционной робототехнической системы, предназначенной для обработки и сборки корпусных сборочных единиц. Показано, что применение стандартной одометрической оценки по кинематической модели платформы приводит к накоплению ошибки позиционирования вследствие неучтённых

нелинейных эффектов взаимодействия колёс с опорной поверхностью. Был предложен подход к формированию обучающей выборки и разработке алгоритма коррекции закона управления с использованием нейросетевой модели.
Abstract. This paper examines the problem of improving the positioning accuracy of a mobile platform used in a robotic handling system for handling and assembling subassemblies. It is shown that using a standard odometer estimate based on the platform's kinematic model leads to accumulating positioning errors due to unaccounted nonlinear effects of wheel interaction with the ground. An approach to generating a training set and developing a control law correction algorithm using a neural network model is proposed.
Ключевые слова: Интеллектуальное управление, робототехнические системы, технологический процесс, нейросетевые модели, одометрия, оценка состояния, нелинейные эффекты, компенсация ошибок позиционирования, цифровой двойник.
Key words: Intelligent control, robotic systems, technological process, neural network models, odometry, state assessment, nonlinear effects, positioning error compensation, digital twin.

Введение

В рамках данной работы рассматривается технологический процесс (ТП) сборки корпусной сборочной единицы (КСЕ) беспилотной системы, размеры которой сопоставимы с рабочей зоной манипулятора, на базе транспортно-манипуляционной робототехнической системы (ТМРС). В базовом варианте процесс реализуется с участием оператора, который вручную позиционирует изделие, доставляемое к рабочей зоне мобильной платформой (МП), в стационарной оснастке между операциями сверления, клёпки и нанесения герметизирующего материала, что снижает воспроизводимость геометрических параметров изделия и увеличивает трудоёмкость. Предлагается модернизировать ТП путем наделения МП функциями активной оснастки: перемещение изделия и обеспечения его непрерывного позиционирования при одновременном движении с манипулятором, что исключает ручные операции и обеспечивает достижимость пространственного расположения рабочего органа в пределах заданной рабочей зоны.

Ключевым условием реализации такого процесса является точность позиционирования МП: ошибка её положения непосредственно входит в суммарную погрешность взаимного расположения инструмента и изделия и определяет соответствие результата сборки требованиям конструкторской документации [1]. Базовым инструментом локализации МП является стандартная одометрическая оценка по кинематической модели робота, однако её применение приводит к накоплению ошибки позиционирования вследствие неучтённых нелинейных эффектов (НЭ) – конструктивного характера и обусловленных взаимодействием колёс с опорной поверхностью. Совокупность указанных эффектов формирует отклонение фактического движения платформы от расчётного, не компенсируемое в рамках стандартной одометрической оценки.

Таким образом, анализ и компенсация НЭ, влияющих на точность позиционирования МП в условиях рассматриваемого ТП, представляет актуальную задачу. Целью работы является концептуальное обоснование подхода повышения точности позиционирования МП в составе ТМРС за счёт идентификации и компенсации НЭ, возникающих при её движении в условиях ТП.

Классификация режимов движения МП в рамках технологического процесса

Для корректной постановки задачи исследования необходимо систематизировать режимы движения МП в контексте выполняемого ТП. Иллюстрация режимов приведена на рис. 1.

Предлагается выделить три характерных режима:

1 Транспортировка между участками (режим I). Перемещение между производственными участками или помещениями. Протяжённость – десятки метров, скорость максимально разрешенная. Характер траектории преимущественно прямолинейный. Требования к точности умеренные: критична точность прибытия в целевую

зону, основное ограничение – исключение столкновений с объектами среды. В данном режиме приоритет отдаётся колесной одометрии с коррекцией по напольной разметке или датчикам расстояния;

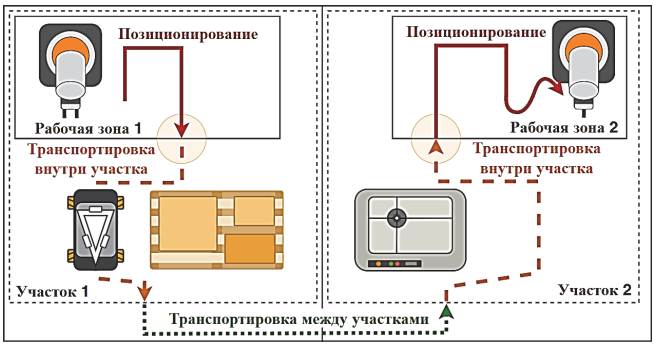


Рис. 1. Режимы работы мобильной платформы в производственной среде

2 Транспортировка внутри участка (режим II). Движение от точки входа на участок до рабочей зоны. Протяжённость – единицы метров, скорость средняя, характер траектории смешанный. Требования к точности повышенные: платформа должна войти в рабочую зону с точностью, достаточной для перехода к режиму III, не нарушив работу смежных рабочих зон. В данном режиме приоритет отдаётся лидарной одометрии;

3 Позиционирование в рабочей зоне (режим III). Точные малые перемещения при одновременном функционировании с манипулятором. Протяжённость – единицы сантиметров и миллиметров, скорость минимальная. Требования к точности максимальные: ошибка положения МП непосредственно входит в суммарную погрешность расположения инструмента относительно изделия. В данном режиме используется совокупность средств одометрии [3].

Для ограничения переноса накопленной ошибки между режимами предусматривается применение внешних корректирующих измерений в опорных точках маршрута. Данная классификация служит основой для обоснования состава тестируемых траекторий и задаёт требования к точности корректирующей модели применительно к каждому режиму.

Систематизация нелинейных эффектов, влияющих на точность одометрической оценки

Стандартная одометрическая оценка по кинематической модели строится на допущении идеального качения без проскальзывания и точно известных геометрических параметров МП. В реальных условиях эксплуатации оба допущения нарушаются, что приводит к накоплению ошибки одометрической оценки. НЭ систематизируются по природе происхождения на два класса:

- Внутренние НЭ обусловлены конструктивными особенностями МП: люфты в трансмиссии, упругие деформации привода, кинематическая несимметрия колёсной базы, погрешности энкодеров. Данный класс эффектов относительно стабилен во времени и не зависит от характера опорной поверхности;

- Внешние НЭ определяются взаимодействием колёс с опорной поверхностью: проскальзывание, пробуксовка, изменение эффективного радиуса колеса под нагрузкой, влияние неровностей и стыков напольного покрытия. В условиях производственной среды данный класс эффектов носит непостоянный характер;

Для формирования корректирующей модели, работоспособной во всех режимах движения, необходим спланированный эксперимент, обеспечивающий раздельную идентификацию внутренних и внешних эффектов.

Концептуальный план эксперимента для исследования нелинейных эффектов

Для количественной идентификации и раздельной оценки вкладов внутренних и внешних НЭ в одометрическую оценку предлагается трёхэтапный план эксперимента, основанный на последовательном сопоставлении данных имитационной модели и реальной МП в контролируемо изменяемых условиях.

1 Испытания в имитационной среде. В среде Webots на базе кинематической модели KUKA YouBot формируется набор тестовых траекторий, соответствующих трём режимам движения. Для каждой траектории фиксируются: одометрическая оценка положения и ориентации МП, угловые скорости колёс и их производные. Поскольку имитационная модель реализует идеальное качение без НЭ, полученные данные образуют эталонный набор.

2 Испытания реальной платформы на ровной поверхности. МП KUKA YouBot выполняет идентичный набор траекторий при тех же управляющих воздействиях, исключающих влияние внешних эффектов. Отклонение реальных одометрических данных от эталонного набора обусловлено преимущественно внутренними НЭ. Результаты этапа позволяют идентифицировать и количественно охарактеризовать систематическую составляющую ошибки.

3 Испытания в условиях нарушения опорной поверхности проводятся на поверхности с искусственными дефектами, имитирующими условия производственного участка. Дополнительное отклонение относительно результатов этапа 2 характеризует вклад внешних НЭ и образует переменную составляющую суммарной ошибки.

По результатам экспериментов формируется структурированный набор данных, отражающий отклонение фактического движения от расчётного для различных режимов и типов эффектов и используемый для синтеза корректирующей модели.

Концептуальный алгоритм коррекции одометрической оценки

На основе проведённого анализа формулируется концептуальный алгоритм коррекции одометрической оценки состояния, встраиваемый в контур управления МП. Алгоритм предполагает непрерывный анализ данных о движении платформы с помощью нейросетевой модели, формирование корректирующей поправки и её использование в управляющих воздействий.

Кинематическая модель на каждом шаге вычисляет базовую одометрическую оценку состояния МП $q = (x, y, \theta)^{\mathrm{T}}$ по данным энкодеров колёс, включающую координаты положения платформы в плоскости и её ориентацию. Нейросетевая модель на основе MLP, обученная на данных экспериментального исследования, анализирует текущие и предшествующие значения угловых скоростей колёс, ускорения и положения, управляющие воздействия и их производные и вырабатывает корректирующую поправку $\Delta q=(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta)^{T}$, характеризующую отклонение фактического состояния МП от расчётного вследствие НЭ [3]. Скорректированная оценка состояния формируется как:

$$q^{*} = q + \Delta q.$$

Значение q^{*} передаётся в систему управления ТМРС и используется для коррекции управляющих воздействий на платформу. Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает замкнутый контур компенсации накапливаемой одометрической ошибки и формирует основу для последующей экспериментальной верификации и настройки нейросетевой модели.

Заключение

В работе выполнено концептуальное обоснование подхода к повышению точности одометрической оценки состояния МП KUKA YouBot в составе ТМРС. Систематизированы режимы движения МП в условиях технологического процесса, классифицированы внутренние и внешние нелинейные эффекты, предложена технология их экспериментальной идентификации и обоснован выбор нейросетевого инструмента синтеза корректирующей поправки. Научная новизна работы состоит в том, что задача компенсации нелинейных эффектов одометрии рассматривается применительно к ТМРС с одновременным движением МП и манипулятора в условиях ТП, где корректирующая модель должна обеспечивать соблюдение требований точности в различных технологических режимах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-21-00292).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots. – MIT press, 2011.
2. Howard A. Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles //2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. – IEEE, 2008. – С. 3946.
3. Farina B. et al. Improving odometric model performance based on LSTM networks //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 2. – С. 961.

УДК 62-503.56
Грабарь Даниил Михайлович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Grabar Daniil Mikhailovich, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Иванов Юрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре Государственный Университет
Ivanov Yuri Sergeevich Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amure State University

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ
EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHMS IN OPTIMAL CONTROL PROBLEMS FOR A ROBOTIC MANIPULATOR

Аннотация. В работе рассматривается задача обучения стратегии управления для коллаборативного робота-манипулятора KUKA iiwa 7 методами обучения с подкреплением. Предметом исследования является сравнение on-policy алгоритмов, A2C, PPO, TRPO, RPO и PPG, в симуляционной среде MovePoint-v0, разработанной при помощи ManiSkill. Целью работы является выявление наиболее эффективного алгоритма для последующей интеграции в систему ситуационного управления манипулятором. По результатам экспериментов алгоритм RPO обеспечил наибольшую эффективность в позиционировании центральной точки инструмента, превзойдя алгоритмы PPO и PPG, тогда как A2C и TRPO не справились с поставленной задачей.
Abstract. The article addresses the problem of learning a control strategy for the KUKA iiwa 7 collaborative robot manipulator using reinforcement learning methods. The research focuses on comparing on-policy algorithms, such as A2C, PPO, TRPO, RPO, and PPG, in a simulation environment called MovePoint-v0, which is developed using ManiSkill. The goal of the paper is to identify the most effective algorithm for subsequent integration into the manipulator's situational control system. According to the results of the experiments, the RPO algorithm provided the highest efficiency in positioning the center point of the tool, surpassing the PPO and PPG algorithms, while A2C and TRPO failed to meet the task.
Ключевые слова: оптимальное управление, обучение с подкреплением, коллаборативный робот, интеллектуальное управление, цифровой двойник, виртуальная среда.
Key words: optimal control, reinforcement learning, collaborative robot, intelligent control, digital twin, virtual environment.

Введение

Роботы-манипуляторы широко применяются в задачах промышленной автоматизации, где требуется высокая точность и устойчивость управления. Методы оптимального управления, такие как модельно-предиктивное управление и регуляторы на основе обратной динамики, демонстрируют эффективность в условиях точно известной математической модели, однако существенно теряют в качестве при наличии параметрической неопределённости, нелинейных взаимодействий с окружающей средой и изменяющихся условий эксплуатации. Для решения таких проблем применяются методы обучения с подкреплением (RL), которые позволяют производить синтез стратегии управления непосредственно из опыта взаимодействия агента со средой, не требуя явного задания полной динамической модели объекта.

Среди алгоритмов RL, обновляющих стратегию исключительно на основе опыта, собранного текущей же стратегией управления (on-policy), и ориентированных на непрерывное пространство действий, широкое распространение получил PPO [1], обеспечивающий стабильное обновление стратегии за счёт отсечения суррогатной функции потерь. TRPO [2] решает схожую задачу через явное ограничение на дивергенции Кульбака-Лейблера между последовательными итерациями стратегии. A2C [3] представляет более лёгкую версию алгоритма RL на основе синхронного актор-критика, но уступает по устойчивости в многомерных задачах. PPG [4] является улучшенным алгоритмом PPO за счёт периодических вспомогательных фаз, разделяющих обновление стратегии и функции вознаграждения. RPO [5] вводит робастную стохастичность стратегии путём добавления шума к параметрам распределения действий, препятствуя преждевременной сходимости. Вместе с тем прямое сопоставление перечисленных методов в задаче управления роботами манипуляторами остаётся не изученными. Большая часть работ сосредоточены либо на одном алгоритме, либо используют среды, не отражающие физических ограничений промышленных платформ.

В работе проводится систематическое сравнение on-policy алгоритмов RL: A2C, PPO, TRPO, RPO и PPG, применительно к задаче управления коллаборативным роботом-манипулятором KUKA iiwa 7. Эксперименты выполняются в симуляционной среде, реализованной при помощи ManiSkill. Целью исследования является выявление наиболее эффективных алгоритмов для последующей интеграции в систему ситуационного управления, предполагающей динамический выбор режима управления в зависимости от текущего состояния рабочей задачи.

Постановка задачи и методология исследования

Задача управления манипулятором формулируется в рамках марковского процесса принятия решений с непрерывным пространством состояний и действий. Агент на каждом шаге получает вектор наблюдений, включающий позицию инструмента (TCP) и конечной позиции в системе координат робота, где формирует управляющее воздействие в виде приращений обобщённых координат суставов. Основной задачей является позиционирование TCP в заданной точке рабочего пространства. Задачу будем считать успешно выполненной, если расстояние от TCP до цели не превышает 0.05 м. (допустимое расстояние при позиционировании промышленных деталей) Функция вознаграждения построена как взвешенная сумма компонент, широкого градиентного сигнала на основе гиперболического тангенса, острого экспоненциального сигнала вблизи цели, штрафа за отклонение ориентации TCP от вертикальной оси и аддитивного бонуса за успешное выполнение эпизода. Для обеспечения переносимости результатов экспериментов на физическое оборудования, шаг управления по суставам ограничен значением 0.005 рад.

Сравнение алгоритмов проводится в одинаковых экспериментальных условиях. Виртуальная среда MovePoint-v0 реализована при помощи ManiSkill и включает разработанный авторами агент KukaIIWA на базе URDF-модели манипулятора iiwa 7, сцену со столом, а также случайно инициализируемую целевую точку в рабочем пространстве. Обучение выполнялось с использованием 8192 параллельных сред (за исключением TRPO - 1024 среды, вследствие вычислительных ограничений алгоритма). Тестирование проводилось в 16 параллельных средах для статистически достоверной оценки качества полученных политик. Сравнение осуществляется по четырём критериям: времени обучения, среднему вознаграждению на тесте, доле успешных эпизодов и визуальному характеру кривых обучения.

Решение задачи

Обучение каждого алгоритма проводилось до достижения 45–50 миллионов шагов взаимодействия со средой. В качестве режима наблюдений использовался векторный режим состояния, включающий позицию TCP и целевой точки в системе координат основания манипулятора. Начальная конфигурация суставов задавалась вектором [0, 0, 0, -1.57, 0, 1.57, 0] рад. Управление осуществлялось в режиме инкрементального изменения позиции суставов с шагом ±0.005 рад. Данное значение выбрано не произвольно, а согласно документации интерфейса внешнего управления KUKA iiwa 7, минимально допустимый шаг составляет 0.001

рад. При этом шаг 0.005 рад обеспечивает достаточную скорость сходимости в симуляции при сохранении физически реализуемого профиля движения на реальной платформе.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 1. На левом графике (рис. 1 (1)) представлены кривые нормированного вознаграждения в ходе обучения. Алгоритм RPO демонстрирует наиболее устойчивую сходимость: рост начинается уже с первых миллионов шагов и к 45 млн., шагам достигает значения порядка 0.75. PPO показывает схожую тенденцию с несколько меньшей скоростью роста, стабилизируясь на уровне 0.82 к концу обучения. PPG обеспечивает умеренный монотонный прирост, однако к завершению обучения выходит на значение около 0.3. Кривые алгоритмов A2C и TRPO остаются практически плоскими на всём горизонте обучения.

По завершении обучения каждый алгоритм тестировался в 16 параллельных независимых средах. Правый график (рис. 1 (2)) отражает суммарное вознаграждение за тестовый эпизод. Наилучший результат продемонстрировал алгоритм RPO. Алгоритмы PPO и PPG также подтвердили способность к решению задачи позиционирования. TRPO и A2C не справились с задачей: их показатели вознаграждения во время тестирования сопоставимы с уровнем необученной стратегии управления, ни одного успешного эпизода зафиксировано не было.

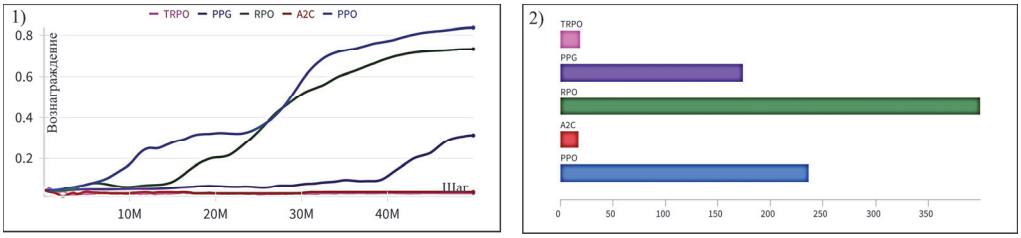


Рис. 1. Динамика среднего вознаграждения on-policy алгоритмов обучения с подкреплением в задаче позиционирования манипулятора KUKA iiwa 7:
1 - В процессе обучения; 2 - По результатам тестирования в 16 параллельных средах

Результаты сравнения алгоритмов представлены в таблице 1. Высокая эффективность RPO, достигшего среднего вознаграждения 399.47 при 100% успешных эпизодов, объясняется механизмом робастной стохастической стратегии. Алгоритм PPO, в свою очередь, демонстрирует ожидаемо стабильное поведение со средним вознаграждением 236.41 и успешностью 62.5% благодаря механизму отсечения, ограничивающему слишком резкие изменения стратегии. Алгоритм PPG, набравший среднее вознаграждение 173.81 при успешности 81.25%, несмотря на концептуальное преимущество в виде раздельного обновления стратегии и ценностной функции, что может свидетельствовать о чувствительности алгоритма к подбору гиперпараметров в задачах с высокоразмерным пространством действий.

Неустойчивость A2C в данной конфигурации обусловлена синхронной агрегации градиентов из параллельных сред, которая приводит к высокой дисперсии оценок преимущества, что негативно сказывается на качестве обновлений в высокоразмерном пространстве координат суставов. Результат TRPO во многом определяется вычислительными ограничениями алгоритма: процедура сопряжённых градиентов и точный поиск вдоль границы доверительной области не допускают эффективного масштабирования на большое число параллельных сред.

Таблица 1

Сравнительные характеристики on-policy алгоритмов RL

Алгоритм	Время обучения	Среднее вознаграждение на тесте	Успешность выполнения задания, %	Количество параллельных сред
A2C	15 мин, 54 сек.	17.43	0	8192
PPO	18 мин., 52 сек.	236.41	62.5	8192
TRPO	2 ч., 14 мин., 40 сек.	18.57	0	1024
RPO	19 мин., 2 сек.	399.47	100	8192
PPG	18 мин., 21 сек.	173.81	81.25	8192

Заключение

В работе проведено сравнение on-policy алгоритмов RL (A2C, PPO, TRPO, RPO и PPG) в задаче позиционирования коллаборативного робота манипулятора KUKA iiwa 7 в среде MovePoint-v0. Все алгоритмы обучались в одинаковых условиях: 45–50 млн шагов, 8192 параллельных среды (1024 для TRPO), шаг управления ±0.005 рад. Тестирование проводилось в 16 независимых средах по завершении обучения.

Алгоритм RPO показал наилучший результат, у которого среднее вознаграждение составило 399.47 при 100% успешных эпизодов за 19 минут обучения. PPG и PPO также справились с задачей, набрав 173.81 (81.25%) и 236.41 (62.5%) соответственно. A2C и TRPO не выработали результативной стратегии: успешных эпизодов зафиксировано не было, а время обучения TRPO превысило 2 часа без какого-либо прироста качества.

На основании полученных результатов алгоритм RPO выбран в качестве основного для интеграции в систему ситуационного управления манипулятором. Следующим этапом является перенос обученной политики на физическую платформу KUKA iiwa 7 через интерфейс внешнего управления и проверка её работоспособности в реальных условиях эксплуатации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25–21–00292).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Schulman J. et al. Proximal policy optimization algorithms //arXiv preprint arXiv:1707.06347. – 2017.
2. Schulman J. et al. Trust region policy optimization //International conference on machine learning. – PMLR, 2015. – С. 1889-1897.
3. Mnih V. et al. Asynchronous methods for deep reinforcement learning //International conference on machine learning. – PmLR, 2016. – С. 1928-1937.
4. Cobbe K. W. et al. Phasic policy gradient //International Conference on Machine Learning. – PMLR, 2021. – С. 2020-2027.
5. Rahman M. M., Xue Y. Robust policy optimization in deep reinforcement learning //arXiv preprint arXiv:2212.07536. – 2022.

УДК 681.5

Деркач Илья Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Derkach Ilya Yurievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сухоруков Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sukhorukov Sergei Ivanovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА RRT В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ СРЕДСТВАМИ MATLAB
MODELING THE OPERATION OF THE RRT ALGORITHM IN THE TASK OF TRAJECTORY PLANNING FOR A WORKPIECE MOVED BY AN INDUSTRIAL ROBOT USING MATLAB

Аннотация. Рассмотрена задача планирования траектории перемещения трёхмерной модели заготовки относительно имитатора сварочной машины промышленным роботом с шестью степенями свободы. Для поиска допустимого пути без столкновений предложен алгоритм RRT. Выполнено имитационное моделирование в MATLAB, включающее импорт геометрии, выпуклую декомпозицию и проверку столкновений. Результаты подтвердили работоспособность подхода. Для практического внедрения требуется учёт ограничений робота и оптимизация траектории.

Abstract. The problem of path planning for the movement of a three-dimensional workpiece model relative to a welding machine simulator using an industrial robot with six degrees of freedom is considered. To find a feasible collision-free path, the RRT algorithm is proposed. Simulation modeling was performed in MATLAB, including geometry import, convex decomposition, and collision checking. The results confirmed the feasibility of the approach. For practical implementation, consideration of robot constraints and trajectory optimization is required.
Ключевые слова: имитационное моделирование, планирование траектории, алгоритм RRT, MATLAB, трёхмерные модели STL обнаружение столкновений.
Key words: simulation modeling, trajectory planning, RRT algorithm, MATLAB, STL 3D models, collision detection.

Введение

В рамках предлагаемой концепции рассматривается задача автоматизированного позиционирования трёхмерной модели заготовки относительно имитатора сварочной машины. Исходное и целевое положения заготовки определяются вектором из шести параметров: трёх линейных координат (x, y, z) и трёх углов ориентации (a1, a2, a3). На основе этих данных осуществляется расчёт пространственной траектории перемещения заготовки, обеспечивающей отсутствие столкновений с геометрией электродов. При этом траектория формируется как последовательность промежуточных положений.

Перед внедрением алгоритма на реальном промышленном оборудовании требуется предварительное моделирование в виртуальной среде. Это позволяет проверить корректность построенной траектории, выявить возможные столкновения с препятствиями, оценить влияние ориентации заготовки на возможность прохождения заданного маршрута и подтвердить работоспособность алгоритма без риска повреждения оборудования или заготовки. Таким образом, имитационное моделирование является обязательным этапом при разработке системы траекторного управления.

Алгоритм планирования траектории

В качестве метода решения задачи был выбран алгоритм RRT (Rapidly-exploring Random Tree) [1], относящийся к вероятностным алгоритмам планирования движения. Данный алгоритм осуществляет поиск допустимой траектории путем случайной генерации конфигураций в пространстве состояний с последующим построением дерева достижимых положений. На каждой итерации производится выбор случайной конфигурации, поиск ближайшей вершины дерева и попытка расширения дерева в направлении новой точки.

Алгоритм RRT ориентирован на быстрый поиск допустимого пути в сложных пространствах с препятствиями. В отличие от оптимизационных методов, он не гарантирует получение оптимальной траектории, однако позволяет эффективно находить решение задачи перемещения при наличии сложной геометрии препятствий. Каждая новая допустимая конфигурация добавляется только при проверке столкновений с препятствиями.

Используемые средства MATLAB

Для реализации описанного подхода использовался ряд встроенных функций MATLAB. Ниже кратко охарактеризованы основные из них, применяемые на ключевых этапах обработки геометрических моделей и проверки столкновений.

Для загрузки STL-моделей заготовки и имитатора сварочной машины использована функция stlread. Она считывает STL-файл и формирует объект triangulation, содержащий геометрическое описание модели в виде вершин и треугольных граней, которое далее применяется для последующей обработки. Возможно использование начиная с версии MATLAB R2018b [2].

Для представления полученных объектов triangulation в виде набора выпуклых многогранников использована функция collisionVHACD. Это необходимо для вогнутых моделей (для уже выпуклых – можно использовать другую функцию). Функция производит разложение объекта triangulation в набор выпуклых многогранников типа collisionMesh. Возможно использование начиная с версии MATLAB R2023b [3].

Для пошаговой проверки допустимости каждой новой конфигурации использована функция checkCollision. Она определяет наличие столкновения между объектами collisionMesh и позволяет выявлять столкновения при перемещении заготовки. Данная функция применялась на каждом шаге построения траектории: если после преобразования положения заготовки происходило пересечение с геометрией имитатора сварочной машины, такая конфигурация исключалась из дерева поиска. Возможно использование начиная с версии MATLAB R2019b [4].

Для визуального оформления и отображения результатов работы алгоритма были применены стандартные функции работы с трехмерными графическими объектами, подробное описание которых в данной статье приводить не будем.

Структура имитационной модели

Имитационная модель была построена таким образом, чтобы максимально приблизить условия моделирования к реальной производственной задаче. Заготовка рассматривалась как подвижное жесткое тело с шестью степенями свободы, включающими линейные перемещения и вращения. Имитатор сварочной машины рассматривался как статическое препятствие, положение которого оставалось неизменным в процессе моделирования. Для обеспечения корректной проверки столкновений сложная геометрия объектов была представлена в виде набора выпуклых тел (рис. 1).

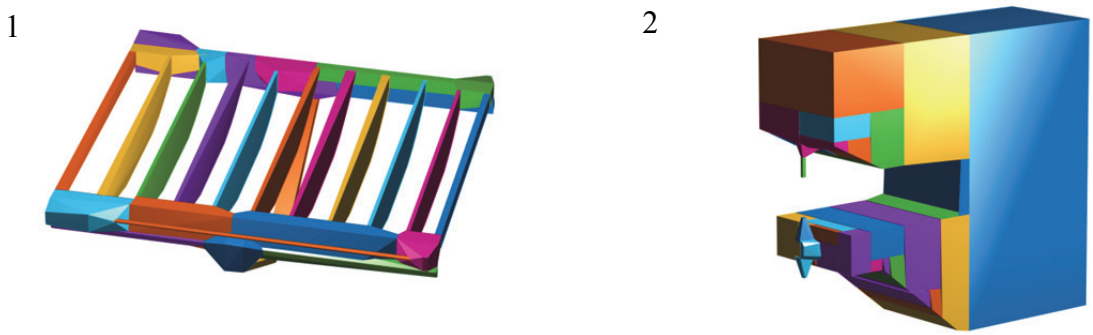


Рис. 1. Визуализация выпуклой декомпозиции при помощи collisionVHACD: 1 – модель заготовки; 2 – имитатор сварочной машины

Поиск траектории осуществлялся в 6D конфигурационном пространстве. Для каждой новой конфигурации выполнялось преобразование положения заготовки и проверка столкновений с препятствием. В случае обнаружения столкновения такая конфигурация исключалась из дальнейшего рассмотрения. Таким образом обеспечивалось построение только допустимых траекторий перемещения.

Результаты моделирования

Алгоритм позволил получить последовательность допустимых конфигураций, обеспечивающих перемещение объекта из начального положения в конечное без столкновений.

Построенная траектория учитывает как пространственное положение, так и ориентацию заготовки, что позволяет использовать результаты моделирования для дальнейшего анализа. Визуализация движения заготовки по найденной траектории (рис. 2), наглядно подтверждает корректность работы алгоритма и отсутствие столкновений с препятствием.

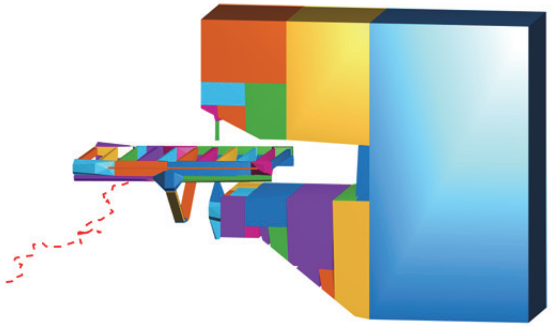


Рис. 2. Визуализация построенного пути

Заключение

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода на уровне имитационного моделирования. Использование алгоритма RRT в сочетании с трехмерной моделью заготовки и препятствия позволило сформировать траекторию, обеспечивающую достижение целевого положения при обходе статического объекта. Это показывает, что метод применим для решения задач планирования движения в производственной среде.

Вместе с тем для окончательного практического применения модель требует дальнейшей доработки. Необходимо учитывать реальные ограничения промышленного робота. Дополнительно целесообразно выполнить оптимизацию траектории с целью устранения рывков, повышения плавности движения и улучшения технологической пригодности полученного маршрута, например модифицировав алгоритм до RRT* (Rapidly-exploring Random Tree Star).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Деркач, И. Ю. Исследование вариантов математического описания пространства для решения задачи планирования траектории перемещения роботом оснастки с деталью / И. Ю. Деркач, С. И. Сухоруков // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 180-182. – EDN GWTNYU.

2. stlread // MathWorks Help Center. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/stlread.html (дата обращения: 18.11.2025).

3. collisionVHACD // MathWorks Help Center. URL: https://www.mathworks.com/help/nav/ref/collisionvhacd.html (дата обращения: 18.11.2025).

4. checkCollision // MathWorks Help Center. URL: https://www.mathworks.com/help/nav/ref/collisionbox.checkcollision.html (дата обращения: 18.11.2025).

УДК 621.389

Дулепина Ольга Андреевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Dulepina Olga Andreevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Любушкина Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Liubushkina Nadezhda Nikolaevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА
DEVELOPMENT OF AN AIR QUALITY ANALYZER

Аннотация. Работа связана с необходимостью обеспечения санитарно-гигиенической безопасности труда в условиях производственных помещений, где проводятся работы с лакокрасочными материалами. В процессе нанесения и сушки покрытий в воздух выделяются летучие органические соединения – ксилол, толуол, бензол, формальдегид, этилацетат и другие вещества, способные вызывать острые и хронические интоксикации. Стационарные газоанализаторы зачастую громоздки и дороги, что делает актуальной разработку компактного и доступного устройства для локального контроля качества воздуха. Стационарные станции мониторинга, обеспечивающие высокую точность измерений, обладают недостаточной плотностью размещения для оценки загрязнения на локальном уровне, что делает актуальной разработку доступных и компактных устройств анализа воздуха.

Abstract. The work is related to the need to ensure sanitary and hygienic safety in production facilities where paint and varnish materials are used. During the application and drying of coatings, volatile organic compounds such as xylene, toluene, benzene, formaldehyde, ethyl acetate, and other substances that can cause acute and chronic intoxication are released into the air. Stationary gas analyzers are often bulky and expensive, making it necessary to develop a compact and affordable

device for local air quality monitoring. Stationary monitoring stations, which provide high-precision measurements, have insufficient density for assessing pollution at the local level, which makes the development of affordable and compact air analysis devices relevant.
Ключевые слова: анализатор качества воздуха, лакокрасочные покрытия, летучие органические соединения, мониторинг воздуха рабочей зоны, газовый датчик, промышленная безопасность.
Key words: air quality analyzer, paint and varnish coatings, volatile organic compounds, work area air monitoring, gas sensor, industrial safety

Введение

Лакокрасочная промышленность является одним из значительных источников загрязнения воздуха рабочей зоны и окружающей среды. В процессе производства, нанесения и сушки лакокрасокрасочных материалов в воздух выделяются летучие органические соединения, которые согласно ГОСТ Р 52165-2003 относятся к вредным веществам. Основными компонентами выбросов являются растворители: толуол, ксилол, бензол, этилацетат, бутилацетат, а также формальдегид и другие мономеры, содержащиеся в пленкообразующих веществах [1].

По данным санитарно-гигиенических нормативов, для этих веществ установлены строгие предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны. Например, для толуола предельная допустимая концентрация составляет 50 мг/м³, для ксилола – 50 мг/м³, для формальдегида – 0,5 мг/м³. Превышение этих концентраций представляет серьезную угрозу для здоровья работников: поражаются центральная нервная система, органы дыхания, печень, возможно развитие онкологических заболеваний. Многие летучие органические соединения обладают взрывоопасными свойствами. Их концентрация в воздухе не должна превышать 20 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени [1].

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения санитарно-гигиенической безопасности труда в условиях производственных помещений, где проводятся работы с лакокрасочными материалами. В процессе нанесения и сушки покрытий в воздух выделяются летучие органические соединения – ксилол, толуол, бензол, формальдегид, этилацетат и другие вещества, способные вызывать острые и хронические интоксикации. Стационарные газоанализаторы зачастую громоздки и дороги, что делает актуальной разработку компактного и доступного устройства для локального контроля качества воздуха.

Целью исследования является разработка портативного анализатора качества воздуха для оперативного контроля концентрации летучих органических соединений, выделяющихся при работе с лакокрасочными материалами.

Разработка структурной схемы устройства

В настоящее время для контроля воздуха на лакокрасочных предприятиях применяются следующие методы:

Периодический лабораторный контроль – отбор проб воздуха с последующим анализом в аккредитованной лаборатории. Недостатки: дискретность измерений, значительное время между отбором и получением результата, невозможность оперативного реагирования.

Стационарные газоанализаторы – непрерывно работающие приборы, установленные в контрольных точках. Современные стационарные системы включают датчики различных типов: электрохимические, инфракрасные, фотоионизационные, термокаталитические. Такие системы обеспечивают мониторинг в реальном времени, но имеют высокую стоимость и сложность обслуживания.

Переносные газоанализаторы – используются для периодического контроля и при проведении ремонтных работ. Например, многокомпонентный газоанализатор «Лидер 041» позволяет измерять концентрации летучих органических соединений в диапазоне до 4000 мг/м³ с использованием фотоионизационного датчика.

Однако существующие промышленные решения часто избыточны для малых и средних предприятий либо недостаточно адаптированы к специфике конкретного производства.

Это определяет актуальность разработки специализированного анализатора, сочетающего доступность компонентов, высокую чувствительность к целевым веществам и возможность интеграции в существующие системы управления предприятием. Структурная схема предлагаемого устройства приведена на рис. 1 [2, 3].

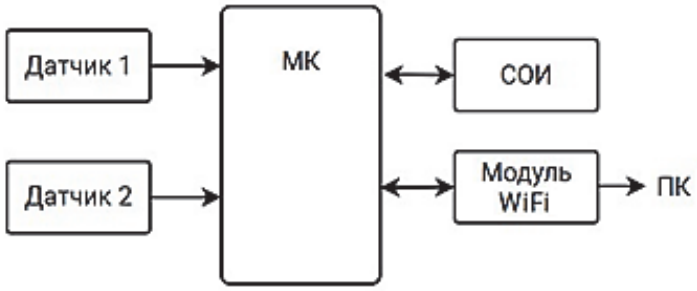


Рис. 1. Структурная схема устройства

В основе центрального устройства лежит микроконтроллерная платформа (ESP32), к которой подключены специализированные газовые датчики, чувствительные к широкому спектру летучих органических соединений (датчик MQ-135 и специализированный MQ-138).

Датчик MQ-135 осуществляет мониторинг качества воздуха, чувствителен к аммиаку, дыму, оксидам азота, углекислому газу, парам спирта и бензола. Его преимущество в том, что датчик имеет два выхода – аналоговый и цифровой. Когда концентрация газов превысит заранее заданное значение, на цифровом выходе появится логическая единица и загорится зелёный светодиод. Это значение задаётся с помощью подстроечного резистора. Напряжение на аналоговом выходе пропорционально концентрации измеряемых газов.

Специализированный датчик MQ-138 для обнаружения формальдегида и толуола, работает на принципе изменения сопротивления чувствительного элемента при контакте с целевым газом, что позволяет получать аналоговый сигнал для взаимодействия с микроконтроллерами. Предусмотрена калибровка датчика по эталонным газовым смесям (толуол, формальдегид) с помощью встроенного потенциометра.

Система отображения информации предполагает наличие системы индикации на ЖК-дисплее, на котором будут отображаться текущие значения концентрации (в мг/м^3) и звуковой сигнализации для оперативного предупреждения о превышении предельно допустимых концентраций. В качестве звукового излучателя предполагается пьезоизлучатель с встроенным генератором, который управляется через транзистор для обеспечения достаточной громкости (не менее 85 дБ) [3].

В устройстве будет реализован интерфейс для передачи данных на персональный компьютер или в систему «умный цех» (Wi-Fi).

Разработанный анализатор обеспечивает непрерывный мониторинг содержания вредных летучих органических соединений в воздухе рабочей зоны с чувствительностью, достаточной для регистрации превышений предельно допустимой концентрации. Устройство предполагается использовать в помещении покрасочного цеха, где изготавливаются лакокрасочные материалы.

Заключение

Созданный анализатор качества воздуха лакокрасочных покрытий обладает рядом преимуществ: низкая стоимость компонентов, компактность, возможность калибровки под конкретные типы ЛКМ и оперативное информирование персонала об опасных концентрациях. Устройство может быть рекомендовано для использования на малых и средних предприятиях, в учебных мастерских, а также в качестве элемента системы экологического мониторинга производственных помещений. Дальнейшее развитие предполагает расширение номенклатуры определяемых веществ (добавление датчиков аммиака, сероводорода, взвешенных частиц) и интеграцию с системами вентиляции для автоматического включения вытяжки при превышении порога.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Лакокрасочные материалы : учебное пособие / В. С. Семенов, О. В. Земскова, И. В. Козлова, Д. А. Зорин ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра строительного материаловедения. – Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2022. - 94 с. – ISBN 978-5-7264-3102-4. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2249437 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.
2. Водовозов, А. М. Микроконтроллеры для систем автоматики : учебное пособие / А. М. Водовозов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 168 с. - ISBN 978-5-9729-1071-7. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.com/catalog/product/1903136 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.
3. Магда, Ю. С. Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств : практическое руководство / Ю. С. Магда. – Москва : ДМК Пресс, 2017. - 225 с. – ISBN 978-5-97060-551-6. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2248789 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

УДК 62-83
Дунешенко Денис Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Duneshenko Denis Yurievich student, Komsomolsk-na-Amure State University
Комсомольский-на-Амуре государственный университет

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАЖДЕННОЙ ВОДЫ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ
DEVELOPMENT AND MODELING OF A MULTI-CIRCUIT AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE TEMPERATURE OF CHILLED WATER IN A FAN COOLING TOWER

Аннотация. В статье представлена разработка многоконтурной системы автоматического регулирования (САР) температуры охлажденной воды вентиляторной градирни. Рассмотрена градирня как объект управления со множеством возмущающих воздействий. Предложено математическое описание процесса охлаждения воды, учитывающее влияние метеорологических и технологических факторов. Детализирована структурная схема электропривода вентилятора на базе частотно-регулируемого асинхронного двигателя, являющегося основным исполнительным элементом САР. Описан синтез пропорционально-интегральных регуляторов контуров момента и скорости, настроенных на модульный и симметричный оптимумы соответственно. Представлены результаты моделирования системы в программной среде, демонстрирующие ее устойчивость, быстродействие и эффективность стабилизации температуры охлажденной воды в динамических режимах при различных возмущениях.
Abstract. The article presents the development of a multi-circuit system for automatic control of the cooled water temperature of a fan cooling tower. The cooling tower is considered as a control object with a variety of disturbing effects. A mathematical description of the water cooling process is proposed, taking into account the influence of meteorological and technological factors. The structural diagram of an electric fan drive based on a frequency-controlled asynchronous motor, which is the main executive element of the ATS, is detailed. The synthesis of proportional-integral regulators of the contours of the moment and velocity, tuned to modular and symmetrical optima, respectively, is described. The results of modeling the system in a software environment are presented, demonstrating its stability, speed, and efficiency of stabilizing the temperature of cooled water in dynamic modes under various disturbances.
Ключевые слова: вентиляторная градирня, система автоматического регулирования, температура охлажденной воды, частотно-регулируемый электропривод, асинхронный двигатель, математическая модель, ПИ-регулятор, модульный оптимум, симметричный оптимум, моделирование.

Key words: fan cooling tower, automatic control system, cooling water temperature, frequency-controlled electric drive, asynchronous motor, mathematical model, PI controller, modular optimum, symmetrical optimum, modeling.

Введение

В современных промышленных процессах, таких как химическое производство, нефтепереработка, металлургия, а также в системах кондиционирования воздуха, критически важную роль играют оборотные системы водоснабжения, обеспечивающие охлаждение технологического оборудования. Центральным элементом этих систем являются градирни – устройства для эффективного отвода избыточного тепла путем охлаждения большого объема воды направленным потоком атмосферного воздуха [1]. Вентиляторные градирни, благодаря своей высокой эффективности и способности обеспечивать глубокое охлаждение воды, получили широкое распространение.

Однако работа вентиляторной градирни подвержена влиянию множества случайных и детерминированных возмущающих воздействий, таких как изменения температуры и влажности окружающего воздуха, скорости ветра, а также колебания тепловой нагрузки и расхода воды. Эти факторы значительно усложнение процесса поддержания стабильной температуры охлажденной воды, что является ключевым для оптимального функционирования всей технологической цепи [2-3]. Нестабильность температуры охлажденной воды может привести к снижению производительности основного оборудования, ухудшению качества продукции и неэффективному расходованию энергоресурсов.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки высокоэффективных и точных систем управления вентиляторными градирнями, способных адаптироваться к динамически изменяющимся условиям эксплуатации.

Целью данной статьи является разработка и математическое описание многоконтурной системы автоматического регулирования температуры охлажденной воды вентиляторной градирни, а также демонстрация ее работоспособности посредством моделирования.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1 рассмотреть градирню как объект управления, подверженный внешним возмущениям;

2 разработать математическую модель, описывающую процесс охлаждения воды;

3 синтезировать регуляторы для многоконтурной системы управления электроприводом вентилятора;

4 провести моделирование разработанной САР в динамических режимах и проанализировать полученные результаты.

Основная часть

Вентиляторная градирня осуществляет охлаждение воды преимущественно за счет испарения части воды при стекании её тонкой плёнкой или каплями по специальному оросителю, вдоль которого подаётся поток атмосферного воздуха. При этом происходит одновременно теплообмен (конвекция) и массообмен (испарение). Физически процесс описывается сложными уравнениями тепло- и массопереноса, зависящими от множества переменных.

Основной управляющей переменной, влияющей на глубину охлаждения воды, является расход воздуха, подаваемого вентилятором. Этот расход регулируется изменением скорости вращения вентилятора. Ключевыми возмущающими факторами, существенно влияющими на температуру охлажденной воды (t_0), являются:

- температура входящей горячей воды ($t_г$) или перепад температур ($\Delta t_{го}$);
- температура окружающего воздуха ($t_В$);
- относительная влажность окружающего воздуха (β);
- расход воды, подаваемой насосами (Q);
- скорость и направление ветра.

Необходимо обеспечить поддержание температуры охлажденной воды t_0 на заданном уровне (например, 28°C) при вариациях этих параметров, в том числе в неблагоприятных зимних условиях, когда возникает риск обмерзания [4-6].

Концепция многоконтурной системы регулирования

Для обеспечения высокой точности и стабильности регулирования температуры охлажденной воды в условиях действия случайных возмущений, а также для повышения надежности и энергоэффективности, целесообразно применение многоконтурной системы автоматического регулирования. В основе предлагаемой системы лежит частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) асинхронного двигателя вентилятора, который позволяет плавно и точно изменять скорость вращения, а следовательно, и подачу воздуха в градирню [5].

Функциональная схема системы автоматизации вентиляторной градирни (рис. 1) включает в себя следующие основные элементы:

– датчики измеряющие температуру горячей и охлажденной воды, температуру и влажность окружающего воздуха.

– вычислительное устройство (промышленный ПК/ПЛК) обрабатывает сигналы от датчиков, вычисляет оптимальное заданное значение скорости вентилятора и формирует управляющие воздействия.

– частотный преобразователь (ПЧ) принимает управляющий сигнал от вычислительного устройства и формирует напряжение и частоту для питания асинхронного двигателя вентилятора.

– асинхронный двигатель (АД) с вентилятором исполнительный механизм, регулирующий расход воздуха через градирню.

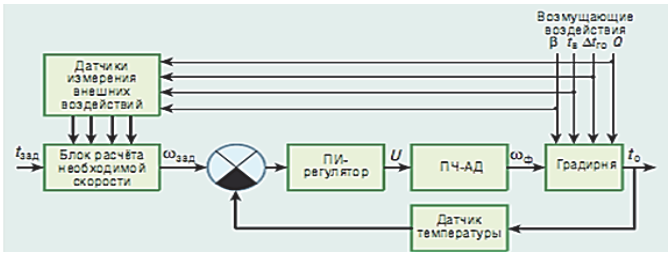


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации вентиляторной градирни

Основная задача системы управления – вычислить оптимальную скорость вращения вентилятора ($\omega_{зад}$) на основе текущих значений возмущающих факторов и скорректировать её с учетом обратной связи по фактической температуре охлажденной воды.

Математическое описание и синтез регуляторов

Поскольку процесс охлаждения воды в градирне носит сложный, нелинейный и стохастический характер, для определения оптимальной скорости вентилятора ($\omega_{зад}$) используется регрессионная модель, построенная на основе статистической обработки экспериментальных данных. Эта модель позволяет предсказать требуемую скорость вентилятора как функцию от перепада температур воды, температуры и влажности воздуха, а также расхода воды:

$$\omega_{зад}=A\cdot(t_{го})^a\cdot(t_B)^b\cdot(\phi)^c\cdot(Q)^d\cdot(\psi)^g,$$

где A, a, b, c, d, g – коэффициенты, определяемые экспериментально; ψ – неучтенные атмосферные возмущения.

Сердцем САР является частотно-регулируемый электропривод “ПЧ-АД”, который может быть описан многоконтурной структурой подчиненного регулирования (рис. 2). Данная структура включает в себя два основных контура:

1 внутренний контур момента (или тока) отвечает за быстрое и точное отслеживание заданного момента двигателя. Регулирование в этом контуре осуществляется пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором, синтезированным на модульный оптимум. Настройка на модульный оптимум обеспечивает апериодический характер переходного процесса с минимальным временем регулирования без перерегулирования.

2 внешний контур скорости отвечает за поддержание заданной скорости вращения вентилятора. Регулирование в этом контуре также осуществляется ПИ-регулятором, синтезированным на симметричный оптимум. Симметричный оптимум обеспечивает хорошее быстродействие при допустимом перерегулировании, что важно для динамических режимов работы вентилятора.

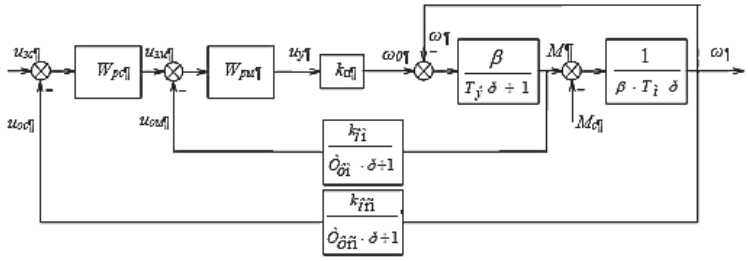


Рис. 2. Структурная схема линеаризованной системы ПЧ–АД

Принятая система уравнений описывает электромеханические процессы в электроприводе и позволяет рассчитать параметры регуляторов. Выбор ПИ-регуляторов обусловлен их способностью исключать статическую ошибку и относительно простой реализацией.

Моделирование и анализ результатов

Для исследования динамических характеристик разработанной САР и подтверждения ее эффективности было проведено компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink. В модель были включены функциональные блоки градирни (представленные как апериодическое звено первого порядка), электропривода и датчиков [7].

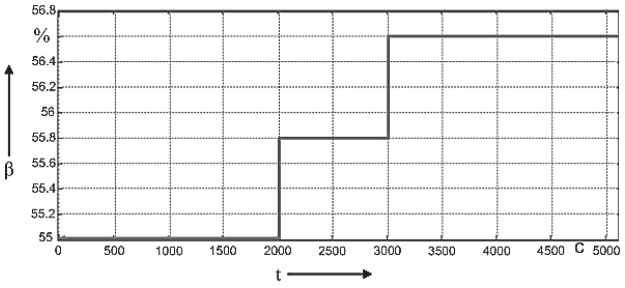


Рис. 3. Управляющее воздействие по влажности воздуха

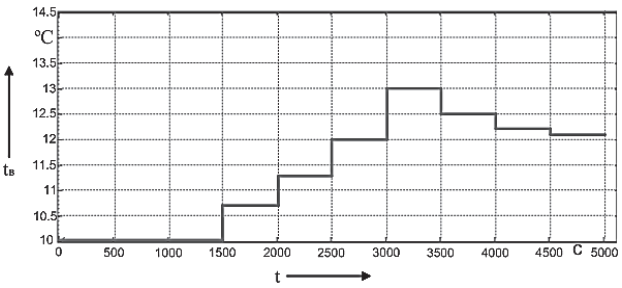


Рис.4. Управляющее воздействие по температуре воздуха

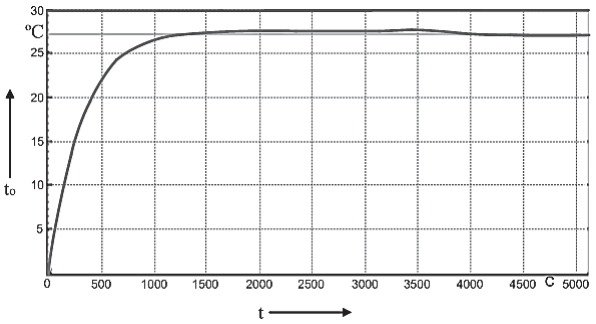


Рис. 5. Реакция системы по температуре воды

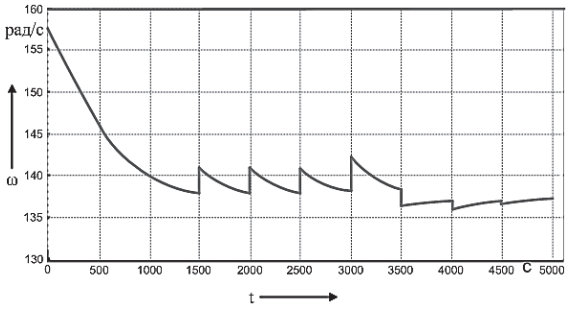


Рис. 6. Реакция системы по скорости двигателя

Моделирование проводилось при скачкообразном изменении различных возмущающих воздействий (например, влажности воздуха, температуры воздуха, горячей воды) (рис. 3-6). Полученные графики зависимостей демонстрируют следующие ключевые результаты:

– устойчивость системы: САР стабильно функционирует во всех исследованных динамических режимах, демонстрируя отсутствие автоколебаний и расходимости.

– высокая точность стабилизации: система эффективно поддерживает температуру охлажденной воды на заданном уровне (28°C) даже при значительных изменениях внешних условий;

– быстродействие: САР демонстрирует быстрое подавление возмущений и выход на заданный режим работы, что критически важно для оперативного управления технологическими процессами;

– корректная реакция управляющего воздействия: скорость вращения вентилятора адекватно изменяется в ответ на возмущения, подтверждая правильность выбранного закона управления.

Результаты моделирования подтверждают правильность теоретических предпосылок и адекватность разработанной многоконтурной САР для эффективного управления температурой охлажденной воды в вентиляторной градирне.

Заключение

В данной статье была разработана и смоделирована многоконтурная система автоматического регулирования температуры охлажденной воды вентиляторной градирни. Были учтены особенности градирни как объекта управления, подверженного множественным возмущениям, и предложено ее математическое описание. Ключевым элементом САР является частотно-регулируемый электропривод вентилятора, для которого синтезированы ПИ-регуляторы по принципам модульного и симметричного оптимумов.

Проведенное моделирование в программной среде подтвердило высокую эффективность разработанной САР, ее устойчивость, быстродействие и способность к точной стабилизации температуры охлажденной воды в условиях динамических возмущений. Внедрение такой системы имеет большое практическое значение, позволяя повысить стабильность технологических процессов, улучшить качество выпускаемой продукции, увеличить срок службы оборудования и обеспечить значительную экономию энергоресурсов за счет оптимизации режимов работы электропривода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гладышев, Г.П. Градирни и их применение / Г.П. Гладышев – Москва: Стройиздат, 2010. – 288 с.
2. Батыгин, В.И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / В.И. Батыгин,– Москва: ИНФРА-М, 2018. – 320 с.
3. Кутателадзе, В.А. Тепломассообмен: Учебник для вузов / В.А. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
4. Быков, А.В. Справочник по холодильной технике / А.В. Быков. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 592 с.
5. Терехов, В.М. Система управления электроприводов / В.М. Терехов. – Москва: Машиностроение, 2005. – 299 с.
6. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – Москва: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
7. Дьяконов, В. Simulink 4. Специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.

УДК 62-83

Дунешенко Денис Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Duneshenko Denis Yurievich student, Komsomolsk-na-Amure State University
Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОХЛАЖДЕННОЙ ВОДЫ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ
IMPROVING ENERGY EFFICIENCY AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR THE INTRODUCTION OF A COOLING TOWER COOLING WATER TEMPERATURE CONTROL SYSTEM

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения энергетической эффективности вентиляторных градирен за счет внедрения автоматизированной системы управления температурой охлажденной воды. Анализируются основные источники энергопотребления градирни, такие как электродвигатели вентиляторов и насосов, и обосновывается применение

частотно-регулируемого электропривода как ключевого элемента энергосбережения. Представлен расчет энергетической эффективности разработанной системы и проведен сравнительный анализ с нерегулируемым электроприводом. Особое внимание уделено экономическому обоснованию проекта, включая расчет капитальных и эксплуатационных затрат, срока окупаемости и рентабельности. Полученные результаты демонстрируют значительную экономическую выгоду от внедрения предлагаемой системы управления.
Abstract. The article discusses the issue of increasing the energy efficiency of fan cooling towers through the introduction of an automated cooling water temperature control system. The main sources of cooling tower energy consumption, such as electric motors of fans and pumps, are analyzed, and the use of a frequency-controlled electric drive as a key element of energy saving is substantiated. The calculation of the energy efficiency of the developed system is presented and a comparative analysis with an unregulated electric drive is carried out. Special attention is paid to the economic justification of the project, including the calculation of capital and operating costs, payback period and profitability. The results obtained demonstrate significant economic benefits from the implementation of the proposed management system.
Ключевые слова: вентиляторная градирня, энергетическая эффективность, частотно-регулируемый электропривод, асинхронный двигатель, экономическое обоснование, капитальные затраты, эксплуатационные расходы, срок окупаемости.
Key words: fan cooling tower, energy efficiency, variable frequency electric drive, asynchronous motor, economic justification, capital costs, operating costs, payback period.

Введение

В условиях роста цен на энергоресурсы и ужесточения требований к экологичности промышленных производств, вопрос повышения энергетической эффективности становится одним из ключевых при проектировании и модернизации технологических систем. В системах оборотного водоснабжения, широко применяемых в различных отраслях промышленности, вентиляторные градирни являются одними из наиболее энергоемких элементов, поскольку для отвода тепла требуется значительная мощность для привода вентиляторов и насосов [1-3]. Оптимизация их работы напрямую влияет на операционные расходы предприятия.

Традиционные подходы к управлению градирнями, основанные на дискретном включении/выключении вентиляторов или механическом регулировании подачи воздуха, часто приводят к перерасходу электроэнергии из-за невозможности точного соответствия производительности градирни фактической тепловой нагрузке и изменяющимся метеорологическим условиям. Внедрение современных автоматизированных систем управления, основанных на частотно-регулируемых электроприводах, открывает значительные перспективы для повышения энергоэффективности и обеспечения стабильности технологического процесса.

Целью данной статьи является оценка энергетической эффективности и экономическое обоснование внедрения разработанной системы управления температурой охлажденной воды вентиляторной градирни.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1 Обосновать выбор частотно-регулируемого электропривода как основного элемента энергосбережения;

2 Провести расчет энергетической эффективности разработанной системы;

3 Выполнить сравнительный анализ капитальных и эксплуатационных затрат регулируемого и нерегулируемого электроприводов;

4 Оценить экономическую целесообразность внедрения системы с расчетом срока окупаемости.

Основная часть

Вентиляторные градирни обеспечивают охлаждение воды за счет прямого контакта с атмосферным воздухом. Основными потребителями электроэнергии в градирнях являются электродвигатели вентиляторов и насосов, подающих воду. В системах с нерегулируемыми приводами поддержание заданной температуры воды достигается, как правило, путем дрос-

селирования потока воздуха или воды, либо дискретного включения/выключения вентиляторов. Эти методы неизбежно ведут к значительным потерям энергии и снижению общей эффективности системы.

Применение частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) для управления скоростью вращения вентиляторов является ключевым фактором повышения энергетической эффективности. Это обусловлено так называемыми “законами подобия” для вентиляторных нагрузок:

- расход воздуха (производительность вентилятора) пропорционален частоте вращения вентилятора ($Q \sim n$);
- создаваемый напор (давление) пропорционален квадрату частоты вращения ($H \sim n^2$);
- потребляемая мощность пропорциональна кубу частоты вращения ($P \sim n^3$).

Таким образом, даже незначительное снижение скорости вращения вентилятора приводит к значительному сокращению потребляемой электроэнергии. Например, снижение скорости на 20% может сократить потребляемую мощность примерно на 49% ($1-(0,8)^3=1-0,512=0,488$).

В разработанной системе используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в комплекте с современным частотным преобразователем, таким как Siemens MICROMASTER 440. Этот преобразователь позволяет реализовать энергоэффективный закон скалярного регулирования скорости электропривода с вентиляторной нагрузкой $U/f^2=const$, а также имеет функции автоматического снижения напряжения для минимизации потерь (режим ECO), что дополнительно способствует экономии электроэнергии [4-5].

Оценка энергетической эффективности системы

Энергетическая эффективность разработанной системы управления может быть количественно оценена через коэффициент полезного действия (КПД) всей установки. КПД электропривода ($\eta_{эп}$) определяется произведением КПД двигателя ($\eta_{дв}$) и КПД преобразователя частоты ($\eta_{пч}$).

Для выбранного асинхронного двигателя 4А112-М4-У3: $\eta_{дв}=0,855$. Для преобразователя частоты Siemens MICROMASTER 440: $\eta_{пч}=0,97$.

Тогда КПД электропривода составит: $\eta_{эп}=\eta_{дв}\cdot\eta_{пч}=0,855\cdot0,97\approx0,83$

КПД всей установки ($\eta_{уст}$) определяется произведением КПД её электропривода и собственно рабочей машины (вентилятора), КПД градирни (вентилятора) $\eta_{гр}=0,84$: $\eta_{уст}=\eta_{эп}\cdot\eta_{гр}=0,83\cdot0,84\approx0,6972$ или около 70%.

Эти значения свидетельствуют о высокой энергетической эффективности предложенной установки. На долю потерь уходит всего около 30% входной мощности, что является хорошим показателем для систем такого типа. Внедрение частотного регулирования позволяет значительно сократить расход электроэнергии по сравнению с нерегулируемыми системами, где потери могут достигать 40-50% и более.

Экономическое обоснование внедрения

Для оценки экономической целесообразности внедрения разработанной системы проведем сравнительный анализ капитальных и эксплуатационных затрат для нерегулируемого и регулируемого электроприводов.

Капитальные затраты (К) включают стоимость оборудования ($К_{об}$), транспортные расходы ($К_{тр}$) и стоимость монтажно-наладочных работ ($К_{м}$).

Для нерегулируемого электропривода:

- стоимость оборудования ($К_{об.д}$) = 150 000 руб.,
- транспортные расходы ($К_{тр.д}$) = 0,03 * 150 000 = 4 500 руб.,
- монтажно-наладочные работы ($К_{м.д}$) = 0,1 * 150 000 = 15 000 руб.,
- общие капитальные затраты ($К_{д}$) = 150 000 + 4 500 + 15 000 = 169 500 руб.

Для регулируемого электропривода:

- стоимость оборудования ($К_{об.ч}$) = 289 000 руб. (включает более дорогой ПЧ и датчики)
- транспортные расходы ($К_{тр.ч}$) = 0,03 * 289 000 = 8 670 руб.,

– монтажно-наладочные работы ($К_{м.ч}$) = 0,1 * 289 000 = 28 900 руб.,

– общие капитальные затраты ($К_ч$) = 289 000 + 8 670 + 28 900 = 326 570 руб. (уточненный расчет по диплому 326660, разница в 90 руб не критична).

Эксплуатационные расходы (С) включают стоимость электроэнергии, амортизационные отчисления, заработную плату обслуживающего персонала и стоимость ремонтных работ.

Экономия электроэнергии ($\Delta С_w$):

– экономия электроэнергии за год (Δ_W) = 48 180 кВт·ч,

– тариф на электроэнергию ($Ц_w$) = 2,60 руб/кВт·ч,

– годовая экономия $\Delta С_w$ = 48 180 * 2,60 = 125 268 руб.,

– фмортизационные отчисления ($С_а$): (принято 10% от стоимости оборудования).

Для нерегулируемого привода ($С_{а.д}$) = 0,1 * 150 000 = 15 000 руб.

Для регулируемого привода ($С_{а.ч}$) = 0,1 * 289 000 = 28 900 руб.

Заработная плата обслуживающего персонала (Сз/п): принята равной 756 000 руб. (с учетом всех надбавок). Эта статья расходов предполагается одинаковой для обоих вариантов, что является упрощением, так как регулируемый привод может требовать менее частого обслуживания.

Суммарные эксплуатационные расходы (без учета расходов на электроэнергию):

– для нерегулируемого привода ($С_д$) = 15 000 ($С_{а.д}$) + 756 000 (ЗП) = 771 000 руб.,

– для регулируемого привода ($С_ч$) = 28 900 ($С_{а.ч}$) + 756 000 (ЗП) = 784 900 руб.

Сравнение приведенных затрат и срок окупаемости:

Целесообразность применения регулируемого электропривода определяется условием:

$$С_д – С_ч + \Delta С_w > Е_н \cdot (К_ч – К_д)$$

где $Е_н$=0,5 – нормативный коэффициент экономической эффективности.

Подставляем рассчитанные значения:

$$(771000 − 784900) + 125268 > 0,5 \cdot (326570 − 169500)$$

$$−13900 + 125268 > 0,5 \cdot 157070\ 111368 > 78535$$

Условие выполняется (111368>78535), что подтверждает экономическую эффективность внедрения регулируемого электропривода.

Рентабельность затрат:

Рентабельность = $(Э/К_ч) \cdot 100$, Рентабельность = (246 368 / 326 660) = 75,4%.

Срок окупаемости (Ток): $Т_{ок} = К_ч / Э$ = 326 660 / 246 368 = 1,33 года.

Заключение

В данной статье был проведен анализ энергетической эффективности и экономическое обоснование внедрения разработанной системы управления температурой охлажденной воды вентиляторной градирни. Показано, что применение частотно-регулируемого электропривода является ключевым инструментом для значительного сокращения энергопотребления за счет использования свойств вентиляторной нагрузки и интеллектуальных функций преобразователя частоты.

Сравнительный экономический анализ подтвердил финансовую целесообразность проекта. Несмотря на более высокие капитальные затраты, разработанная система демонстрирует высокую рентабельность (порядка 75%) и короткий срок окупаемости (менее 1,5 лет). Это обусловлено существенной экономией электроэнергии и снижением эксплуатационных расходов. Внедрение такой системы позволяет не только оптимизировать производственные процессы и повысить стабильность параметров охлаждающей воды, но и обеспечить значительный экономический эффект, что делает проект привлекательным для промышленных предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврилов, Б.Г. Энергосбережение в промышленности: учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2017. – 340 с.

2. Федоров, В.И. Автоматизированные электроприводы систем водоснабжения и водоотведения. – Москва: Стройиздат, 2015. – 380 с.

3. Терехов, В. М. Система управления электроприводов / В. М. Терехов. – Москва: Машиностроение, 2005. – 299 с.

4. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – Москва: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

5. Сименс. Руководство по эксплуатации MICROMASTER 440. – 2005. – 250 с.

УДК 681.5

Едич Максим Андреевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Edich Maksim Andreevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Горькавый Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Gorkavyy Alexander Ivanovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ
SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM FOR MULTILINK MANIPULATORS

Аннотация. Работа посвящена разработке универсального метода структурно-матричного синтеза адаптивного управления многозвенными мехатронными системами. Сформирована обобщенная математическая модель в пространстве состояний, объединяющая динамику манипулятора и электромагнитные процессы приводов. С использованием метода подобия матриц получены аналитические выражения для коэффициентов регулятора по полному вектору состояния, обеспечивающие заданные показатели качества вне зависимости от конфигурации системы. Работоспособность подхода подтверждена моделированием управления семизвенным промышленным роботом в среде MATLAB. Отмечается высокий исследовательский и образовательный потенциал модели как инструмента для наглядной демонстрации связи между математическим аппаратом теории управления и физическим поведением робота.

Abstract. The paper develops a universal structural-matrix synthesis method for adaptive control of multi-link mechatronic systems. A generalized state-space model is formulated, combining manipulator dynamics and actuator electromagnetic processes. Using the matrix similarity method, analytical expressions for full-state feedback controller coefficients are derived, ensuring required performance regardless of system configuration. The approach efficiency is confirmed by simulating a seven-link industrial robot in MATLAB. The developed model demonstrates significant research and educational potential as a tool for visualizing the connection between control theory mathematical apparatus and the physical behavior of a robotic system.

Ключевые слова: многозвенный манипулятор, адаптивное управление, метод подобия матриц, электромеханическая система, аналитический синтез, пространство состояний, MATLAB.

Key words: multi-link manipulator, adaptive control, matrix similarity method, electromechanical system, analytical synthesis, state space, MATLAB.

Введение

Рост сложности и разнообразия конфигураций современных робототехнических систем требует разработки универсальных и прозрачных алгоритмов управления. Традиционные подходы часто рассматривают механику манипулятора и динамику приводов раздельно, что при высоких скоростях приводит к потере точности из-за неучтенных перекрестных связей. В условиях жестко заданных конструктивных параметров компенсация таких нелинейностей возможна только на алгоритмическом уровне. Дополнительной проблемой остается сложность наглядной интерпретации связи между строгим математическим аппаратом теории управления и физическим поведением многозвенных механизмов. В данной работе

предложен метод структурно-матричного синтеза адаптивного управления на основе единой электромеханической модели. Предложенный подход позволяет реализовать прецизионное управление без изменения конструкции робота, выступая при этом эффективным инструментом для исследовательских и образовательных задач.

Основная часть

За основу математического описания было взято общепринятое уравнение динамики манипулятора в форме Эйлера-Лагранжа [1] и расширенно матричным уравнением электрического равновесия цепей якоря двигателей [2]:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} = -C(q,\dot{q})\dot{q} - G(q) + r; \\ i' = L(-R\,i + u - E\,\dot{q}). \end{cases} \quad (1)$$

Взаимосвязь уравнений осуществляется через вектор моментов $r = K_m i$. С целью упрощения коэффициенты момента K_m и передаточные числа редукторов приняты равными единице, либо неявно включены в параметры матриц R, L. При необходимости учета редуктора необходимо внести изменения в матрицу масс $M(q)$ и противо-ЭДС E, однако в рамках данной работы редуктор не рассматривается.

Ключевой особенностью предлагаемого подхода является специфическое представление структуры вектора состояний. Вместо группировки переменных по сочленениям в данной работе применена блочная группировка по физической природе переменных $x = [x_1\ x_2\ x_3]^T = [q\ \ \dot{q}\ \ i]^T = [\varphi\ \ \omega\ \ i]^T$, так например для трехзвенного манипулятора размерности блоков x_1, x_2, x_3 соответствуют трем, а размерность вектора x девяти. Такое разделение позволяет представить сложную электромеханическую систему уравнений (1) в блочно-матричном виде пространства состояний:

$$\dot{x} = A(x)x + Bu;\ \ A(x) = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & I_{n\times n} & 0_{n\times n} \\ 0_{n\times n} & -M(x)^{-1}C(x) & M(x)^{-1} \\ 0_{n\times n} & -L*E & -L*R \end{bmatrix};\ B = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} \\ 0_{n\times n} \\ L \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Синтез системы выполнен на основе управления по полному вектору состояния. Аналитический поиск коэффициентов модального регулятора осуществлялся методом замены базиса [3]:

$$(A(x) - B\,F(x))\,P = P\,X;\quad X = \begin{bmatrix} X_1 & Z_1 & Z_2 \\ 0_{n\times n} & X_2 & Z_3 \\ 0_{n\times n} & 0_{n\times n} & X_3 \end{bmatrix};\quad P = \begin{bmatrix} I_{n\times n} & 0_{n\times n} & 0_{n\times n} \\ P_1 & I_{n\times n} & 0_{n\times n} \\ P_2 & P_3 & I_{n\times n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

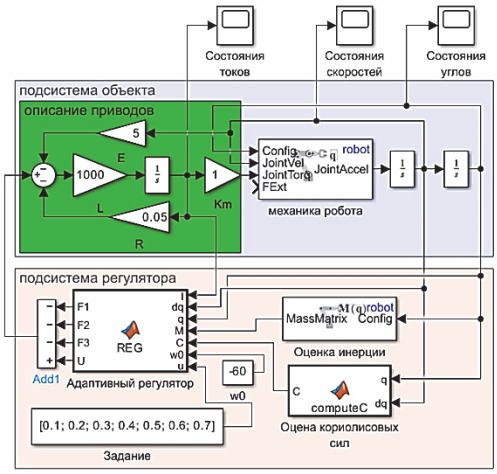
где блоки X_1, X_2, X_3 представляют собой диагональные матрицы, определяющие желаемые показатели качества переходных процессов для каждой из групп переменных состояния. Блоки $P_{1\ldots3}$, $Z_{1\ldots3}$ в таком случае используются как матрицы с произвольными параметрами для обеспечения алгебраической разрешимости выражения (3). Все блоки имеют одинаковую размерность соответствующей количеству обобщенных координат манипулятора. Решение данного выражения (3) позволяет в явном виде выразить адаптивные коэффициенты регулятора:

$$\begin{cases} F_1 = L^{-1}X_3\,M\,X_2\,X_1\,; \\ F_2 = L^{-1}(\,X_3\,M\,(\,X_1 + \,X_2) + X_3C + M\,\,X_2\,X_1 + M\,(X_1 + X_2)M^{-1}C + CM^{-1}C). \\ F_3 = L^{-1}(\,X_3 + M\,X_1M^{-1} + M\,X2\,M^{-1} + CM^{-1}) - R. \end{cases} \quad (4)$$

Для верификации теоретических положений было проведено моделирование в среде MATLAB/Simulink. Проверка алгоритма осуществлялась на ряде робототехнических объектов различной степени сложности: от простейших звеньев до избыточных промышленных манипуляторов. На рисунке 1 представлена структурная схема разработанной модели. Система разделена на две подсистемы объекта и регулятора, где первая включает в себя динамическую модель электрической части однотипных приводов, сопряженную через вектор момента K_m с механической частью робота. Вторая подсистема содержит вычислительные

блоки формирования матриц $M(q)$ и $C(q,\dot{q})$, а также блок расчета модальных коэффициентов по выражениям (4).

1)



2)

```
function [F1,F2,F3,U]=REG(I,dq,q,M,C,w0,u)
%   I, dq, q - векторы состояния.
%   M, C -оценки матриц инерции
%    и кориолисовых сил.
%   w0 - желаемая частота.
%   u - вектор задающего воздействия.
    n = 7;% Число звеньев.
% Матрица коэффициентов противо ЭДС:
    E = 5 * eye(n);
% Матрица индуктивностей обмоток якоря:
    L = 1000 * eye(n);
% Матрица активных сопротивлений:
    R = 0.05 * eye(n);
% 2. Матрицы желаемой динамики
    X1 = w0 * eye(n);
    X2 = w0 * eye(n);
    X3 = w0 * eye(n);
% 3. Расчет коэффициентов обратной связи
F1 = -inv(L) * X3 * M * X2 * X1 * q;
F2 = (inv(L) * (X3 * M * (X1 + X2) + ...
X3 * C + M * X2 * X1 + M * (X1 + X2) * ...
 inv(M) * C + C * inv(M) * C) - E) * dq;
F3 = (-inv(L) * (X3 + M * (X1 + X2) * ...
 inv(M) + C * inv(M)) - R) * I;
    % 4. Расчет управляющего напряжения
U = -inv(L) * M * X3 * X2 * X1 * u;
end
```

Рис. 1. Структурно блочная реализация системы управления в Simulink: 1 – структурная схема системы; 2 – программная реализация блока адаптивного регулятора

На рисунке 2 представлены результаты моделирования для наиболее сложной из рассматриваемых конфигураций семизвенного робота KUKA LBR iiwa 14. Исследование проводилось в двух режимах: позиционирования и слежения за заданной пространственной траекторией. На графиках отображены переходные процессы для всех составляющих вектора состояний. Для режима траекторного движения дополнительно приведен трехмерный график.

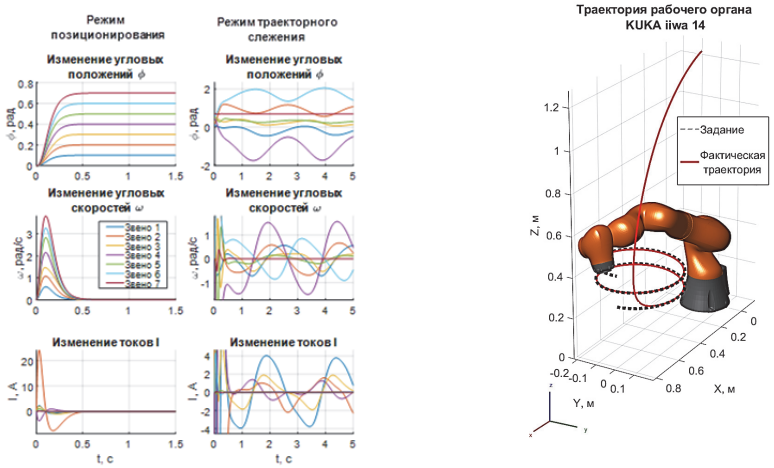


Рис. 2. Результаты моделирования для робота KUKA LBR iiwa 14

Как видно из графиков переходные процессы по всем координатам имеют характерную биномиальную форму. Это свидетельствует о полной динамической декомпозиции сложной многосвязной системы на ряд независимых подсистем мехатронных модулей. Интересной особенностью предложенного подхода является универсальность полученного решения. Поскольку коэффициенты регулятора представлены в явном аналитическом виде, что позволяет применять данный закон управления для широкого класса робототехнических систем.

Заключение

В ходе работы проведено исследование и верификация алгоритма адаптивного управления многозвенными мехатронными системами. Полученные результаты подтвердили, что предложенный метод структурно-матричного синтеза на базе единой электромеханической модели компенсирует внутренние нелинейности и динамические взаимовлияния звеньев. Блочно-матричное представление системы позволило получить явные аналитические выражения для коэффициентов регулятора, обеспечивающие высокую сходимость к заданному качеству и декомпозицию системы вне зависимости от ее размерности. Несмотря на приня-

тые допущения, разработанный подход обладает значительным исследовательским и образовательным потенциалом, наглядно демонстрируя связь между математическим аппаратом и электромеханическими процессами в промышленном роботе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Scherzinger S., Roennau A., Dillmann R. Forward Dynamics Compliance Control (FDCC): A New Approach to Cartesian Compliance for Robotic Manipulators // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, BC, Canada, September 24–28, 2017. Town: IEEE, 2017. P. 4568–4575. https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206325

2. Saleki A., Fateh M.M. Model-free control of electrically driven robot manipulators using an extended state observer // Computers and Electrical Engineering. 2020. Vol. 87. № 106768. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106768

3. Duan G. High-order fully actuated system approaches: Part I. Models and basic procedure // International Journal of Systems Science. 2021. Vol. 52. № 7. P. 1069–1082. https://doi.org/10.1080/00207721.2020.1829167

УДК 621.311.8

Залицкий Николай Николаевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zalitsky Nikolay Nikolaevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Янченко Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Yanchenko Andrey Vyacheslavovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАНЦИИ СКОРОЙ ПОМОЩИ
DEVELOPMENT OF A GUARANTEED POWER SUPPLY SCHEME FOR AN AMBULANCE STATION

Аннотация. В работе рассматривается схема электроснабжения станции скорой помощи с устройствами автоматического включения резерва (АВР) для подключения резервных источников электроэнергии в аварийных режимах. Показана актуальность современных устройств АВР, даны рекомендации по их выбору, сделано описание работы схемы с двумя резервными источниками питания. Приведены основные параметры элементов системы электроснабжения станции скорой помощи.

Abstract. The paper discusses automatic transfer devices (ATD) for the power supply system of an ambulance station. It provides an overview of modern ATD devices for single-phase and three-phase power systems, taking into account two or more backup power sources. The paper also discusses the main parameters of the devices, including their response time, service life, and cost. The paper provides a comparative analysis of ATD devices and selects an ATD device for the power supply system of a specific city ambulance station.

Ключевые слова: станция скорой помощи, автоматическое включение резерва, система электроснабжения, резервные источники, электрические параметры.

Key words: ambulance station, automatic reserve activation, power supply system, backup sources, electrical parameters.

Введение

При создании системы электроснабжения станции скорой медицинской помощи (ССП) часто не учитывают ее большое социальное значение, вводя стандартные схемы энергоснабжения. Функции ССП связаны с защитой здоровья и жизни людей и даже кратковременное отключение электроэнергии может стать фатальным. Учитывая, что на современном

этапе городские электросети часто имеют повышенный износ и возможны перебои в электроснабжении, система гарантированного электроснабжения ССП, как потребителя 1-й категории, жизненно необходима [1].

Для обеспечения надежного и гарантированного электроснабжения ССП необходимо использовать специальные схемы с современными устройствами АВР и резервными источниками питания. При выборе АВР необходимо учитывать такие параметры, как фазность нагрузки, специфику объекта нагрузки, номинальное напряжение, переключаемую мощность, скорость переключения.

Целью разработки является схема гарантированного электроснабжения станции скорой медицинской помощи районного значения. Задачи разработчиков:

1. Определение параметров резервного электроснабжения ССП.
2. Анализ и выбор резервных источников питания и устройства АВР.

Схемы, параметры, пути решения задач

При разработке системы электроснабжения городской ССП, которая относится к потребителям 1-й категории, были определены следующие параметры – автономность работы при отключении основных линий питания не менее 8 часов, скорость переключения источника – не более 1 секунды, селективность – по двум подгруппам 1-й категории. В качестве резервных источников были выбраны: солнечная электростанция (СЭС), как возобновляемый источник энергии и дизель-электростанция (ДЭС), работающая на жидком топливе. При выборе устройства АВР учитывались следующие рекомендации: номинал АВР должен быть выше на 20-30% расчетной переключаемой нагрузки (особенно реактивной нагрузки), для 3-х-фазных сетей желательно контролировать неравномерность нагрузки по фазам (контроль фаз). При этом желательно использовать отечественные устройства. По конструкции устройства АВР могут выпускаться в виде отдельных блоков (малой мощности), (рис. 1), или в виде щитов ввода резерва при большой мощности переключения.



Рис.1. Блочные и щитовые устройства АВР

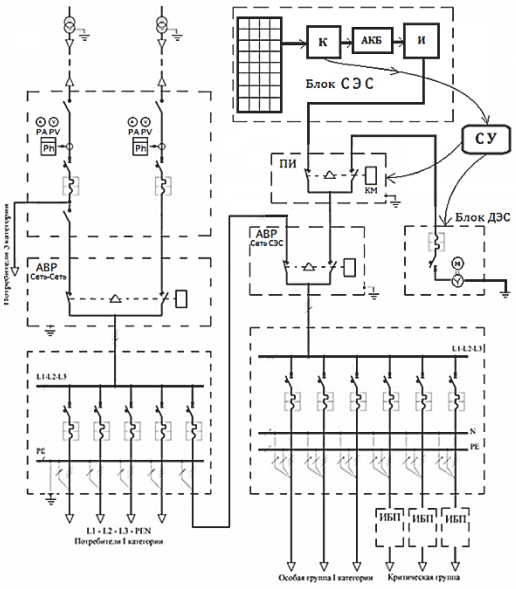


Рис.2. Блок-схема системы АВР с двумя резервными источниками питания (СЭС и ДЭС) и распределением по подгруппам 1 категории

С учетом решаемых задач была предложена схема с двумя устройствами АВР и двумя независимыми источниками питания (рис.2). Независимые автономные источники электроснабжения – система аккумуляторов с подпиткой от солнечных панелей и блок дизель-электрогенератора. Схема работает следующим образом. При потере напряжения в 1-ой трехфазной линии $АВР_{СЕТЬ-СЕТЬ}$ переключает питание на 2-ю трехфазную линию. При потере питания от 1-й и 2-й линий $АВР_{СЕТЬ-СЭС}$ включает питание для особой подгруппы 1 категории на источник СЭС (от АКБ через инвертор И). Если емкость АКБ при длительном отсутствии напряжения в основных линиях понизится до критического уровня (сигнал с контроллера заряда К), то переключатель ПИ в автоматическом (системой управления СУ) или ручном режиме переключит источник СЭС на резервный источник ДЭС, который к этому моменту уже будет запущен. Емкость аккумуляторных батарей (АКБ) определяется автономностью работы ССП в течение 8 часов и составляет около 16 кВт*ч. Подпитка АКБ осуществляется с помощью 10 солнечных панелей с максимальной мощностью каждой из них 300 Вт. В схеме используются два типа АВР. Трехфазное АВР (Сеть-Сеть) и менее мощное однофазное АВР (Сеть-СЭС-ДЭС). К потребителям особой группы относиться часть холодильного оборудования и устройства кондиционирования. К критической группе относятся серверы и компьютеры ССП, а также медоборудование жизнеобеспечения больных. Выбираем отечественное оборудование [2,3] с установкой в щитах ввода резерва: в качестве первого устройства $АВР_{СЕТЬ-СЕТЬ}$ - трехфазное устройство типа АВР-300 фирмы Dekraft (входит в в российскую производственную компанию «Систэм Электрик»), (рис.3) , в качестве второго $АВР_{СЕТЬ-СЭС}$ – однофазное устройство типа АВР-16-6 (16А). АВР-300 имеет следующие характеристики: рабочие токи от 10 А до 630 А с отключающей способностью до 50 кА. Данное устройство позволяет при подключении задать необходимые параметры (режим работы, время переключения и напряжения основного и резервного вводов).



Рис.3. АВР-300 фирмы Dekraft

Заключение

Разработанная схема обеспечивает оптимальное достижение цели - гарантированного электроснабжения станции скорой медицинской помощи в аварийных режимах и содержит отечественные современные элементы электрооборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Торопов И.Ю. Обеспечение бесперебойной работы критически важных операций и предотвращение незапланированных простоев // StudNet. 2022. Т. 5. №.6. С.5133-5144. https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-bespereboynoy-raboty-kriticheski-vazhnyh-operatsiy-i-predotvraschenie-nezaplanirovannyh-prostoev/

2. Автоматический ввод резерва: как обеспечить бесперебойное энергоснабжение в критических ситуациях. Опубл.: 17.07.2025 // Электротехнический интернет-портал Elec.ru. URL: https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/8870/

3. Готовые решения для надежного энергоснабжения: автоматический ввод резерва Dekraft. Опубл.: 27.03.2026 // Электротехнический интернет-портал Elec.ru. URL: https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/9741

УДК 621.316.9
Золотарев Роман Игоревич, магистрант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zolotarev Roman Igorevich, master's student, Komsomolsk-na-Amure State University
Айрих Роман Иванович, магистрант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Airich Roman Ivanovich, master's student, Komsomolsk-na-Amure State University
Иванов Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Ivanov Sergey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amur State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ЯЧЕЙКАХ 10 КВ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА КАТУШКИ РОГОВСКОГО
IMPROVING THE EFFICIENCY OF RELAY PROTECTION AND ELECTRICITY METERING IN 10 KV SWITCHGEAR CELLS BY REPLACING CURRENT TRANSFORMERS WITH ROGOWSKI COILS

Аннотация. Рассмотрены вопросы технического устаревания электромагнитных трансформаторов тока, используемых в распределительных устройствах среднего напряжения. С точки зрения повышения надежности релейной защиты обоснована целесообразность использования катушек Роговского, работающих на принципе дифференциального трансформатора без ферромагнитного сердечника. Выполнено сравнение метрологических и эксплуатационных характеристик, выявлены преимущества катушек Роговского, в частности, отсутствие насыщения при токах короткого замыкания, широкий динамический диапазон, малые габариты и возможность монтажа без разрыва цепей. Сделан вывод о перспективности применения данных датчиков в системах релейной защиты и автоматики на подстанциях 10 кВ.
Abstract. The obsolescence of electromagnetic current transformers used in medium-voltage switchgear is discussed. The feasibility of using Rogowski coils, which operate on the principle of a differential transformer without a ferromagnetic core, is substantiated from the standpoint of increasing the reliability of relay protection. A comparison of metrological and operational characteristics was conducted, revealing the advantages of Rogowski coils, including the absence of saturation during short-circuit currents, a wide dynamic range, small dimensions, and the ability to install without interrupting circuits. A conclusion was reached regarding the potential of these sensors for use in relay protection and automation systems at 10 kV substations.
Ключевые слова: трансформатор тока, катушка Роговского, релейно-защитная аппаратура, подстанция, ячейка, комплектное распределительное устройство.
Key words: current transformer, Rogowski coil, relay protection equipment, substation, cell, complete switchgear.

Введение

Современные распределительные сети среднего напряжения (6-10 кВ) являются важным звеном в системе электроснабжения промышленных предприятий и городской инфраструктуры. Надежность их работы напрямую зависит от эффективности функционирования релейной защиты и автоматики (РЗА). Традиционно в ячейках комплектных распределительных устройств (КРУ) для измерения тока используются электромагнитные трансформаторы тока (ТТ). Как отмечается в литературе [1], данные устройства, имеют рядом недостатков, связанных с нелинейностью вольт-амперной характеристики и насыщением магнитопровода [2].

Основная проблема возникает при аварийных режимах, когда токи короткого замыкания (КЗ) содержат значительную апериодическую составляющую. Это приводит к глубокому насыщению магнитопровода ТТ, искажает форму вторичного тока и, как следствие, может привести к ложному срабатыванию защиты [3].

Математически процесс насыщения можно задать нелинейной зависимостью между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля в ферромагнитопроводе, что делает коэффициент трансформации k_i при индукции B большей, чем индукция насыщения $B_{нас}$, величиной переменной:

$$k_i = f(B, H).$$

Для компенсации вариативности применяют ТТ с необоснованно высокими классами точности, что в свою очередь влияет на стоимость и занимаемое место в комплектных установках.

По этой причине использование датчиков тока в виде катушек Роговского является альтернативным направлением в электроэнергетике. Измерительные устройства без ферромагнитного сердечника не связаны с эффектами насыщения.

Катушка Роговского конструктивно выполнена в виде гибкой пластины, что обеспечивает их совместимость с существующими токоведущими шинами без вывода их из эксплуатации.

Материалы и методы

Физический принцип работы катушки Роговского основан на законе электромагнитной индукции для трансформатора без ферромагнитного магнитопровода. Электродвижущая сила (ЭДС) на выводах катушки $e(t)$ пропорциональна скорости изменения измеряемого тока $i(t)$ и взаимной индуктивности M:

$$e(t) = -M\frac{di}{dt}.$$

Взаимная индуктивность для тороидальной катушки с равномерной намоткой определяется геометрическими параметрами, обмоточными данными и проницаемостью среды:

$$M = (\mu_0 \cdot w^2 \cdot S)/l,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; w – число витков; S – площадь сечения; l – длина средней линии тороидального основания катушки.

Для получения сигнала, пропорционального току, выходное напряжение катушки $e(t)$ подвергается интегрированию. В современных системах это выполняется аналоговыми или цифровыми интеграторами с постоянной времени τ и передаточной функцией

$$w(p) = (\tau \cdot s)^{-1}.$$

Проведение сравнительного анализа целесообразно с использованием нескольких походов и методов.

Анализ технических характеристик используемых ТТ и сравнение их с параметрами катушек Роговского возможны на основе данных производителей, а также требований нормативных документов к цепям учета и защиты и нормативной документации [4]. Для оценки могут быть использованы аналитические выражения для амплитудной и фазовой погрешностей катушек Роговского. Имитационное моделирование режимов работы измерительных каналов в условиях протекания токов короткого замыкания целесообразно для оценки динамических свойств датчиковых систем.

Известно, что точность ТТ характеризуется полной, токовой и угловой погрешностями.

Из Т-образной схемы замещения видно, что возрастание намагничивающего тока может произойти как вследствие сильного насыщения магнитопровода, так и при повышении сопротивления нагрузки. Это приводит не только к снижению вторичного тока, но и к искажению синусоидальности формы кривой тока. Используя понятия первичного тока $I_1^{/}$, вторичного тока I_2, намагничивающего тока $I_{нам}$ находятся величины токовой погрешности ΔI

$$f = ((I_1' - I_2)/ I_1') \cdot 100\ \%,$$

угловой погрешности δ, и абсолютной погрешности

$$\varepsilon = ([I_{нам}]/[I_1']) \cdot 100\ \%.$$

Катушка Роговского – соленоид без ферромагнитного сердечника с равномерной намоткой витков, размещенный так, чтобы охватывать проводник с измеряемым током $i_1(t)$, который представляет собой первичную обмотку датчика. Вокруг проводника с током $i_1(t)$создается магнитное поле и на выводах катушки в соответствии с законом электромаг-

нитной индукции возникает ЭДС $e(t)$, пропорциональная первой производной измеряемого тока di_1/dt.

Для получения на выходе датчика пропорциональный первичному току сигнала, необходимо выполнить операцию интегрирования $e(t)$ катушки. Для этого используются аналоговые (или цифровые) пассивные (или активные) электронные интеграторы.

Благодаря отсутствию ферромагнитных деталей в катушке Роговского, не проявляется насыщение, что обеспечивает широкий диапазон линейного преобразования, гальваническую развязку первичных и вторичных цепей.

Результаты

Основные результаты сравнительного анализа в виде параметров, влияющих на работу релейной защиты, приведены в работе [5] и представлены в таблице (табл.1).

Таблица 1

Сравнение характеристик трансформатора тока и катушки Роговского в режиме КЗ [5]

Характеристика	**Трансформатор тока**	**Катушка Роговского**
Наличие магнитопровода	есть (ферромагнитный)	нет
Поведение при КЗ	насыщение, искажение сигнала	линейность во всем диапазоне
Динамический диапазон	ограничен классом точности	широкий
Потребляемая мощность	высокая	низкая
Выходной сигнал	ток, пропорциональный первичному	напряжение, пропорциональное $\frac{di}{dt}$

Приведенные результаты подтверждают, что преимуществом катушек Роговского, как и отмечено выше, является отсутствие насыщения. Это приводит к тому, что даже при токах короткого замыкания, вторичный сигнал точно следует за формой первичного тока. Это особенно важно для релейной защиты, поскольку повышает селективность их защит при наличии высших гармонических.

Заключение

Исключить насыщение магнитопровода при коротких замыканиях можно заменой трансформаторов тока с ферромагнитопроводом на катушки Роговского. Их применение обеспечивает повышение селективности работы устройств релейной защиты за счет линейности измерений во всем диапазоне токов. Улучшение эксплуатационных характеристик релейной аппаратуры обеспечивается за счет технологичности и снижения времени отключенного состояния электротехнического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Королев Е.П., Либерман Е.М. Эксплуатация трансформаторов тока в распределительных сетях. Москва: Энергоатомиздат, 2019. 288 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01009876543 (дата обращения: 20.02.2026).

2. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Сербиновский Б.Б. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника // Релейная защита и автоматизация, 2017. - № 3(28). - С. 43– 51.

3. Лебедев В.Д. и [др.]. Исследование характеристик и перспективы использования цифровых трансформаторов тока и напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение, 2018. - № 2(47), март–апрель. - С. 22– 28.

4. Иванов С.Н., Скрипилев А.А. Надежность электроснабжения // Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. - 156 с.

5. Грибков М.А. Совершенствование системы микропроцессорных защит распределительной электрической сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2025. 24 с.

УДК 621.314
Иванов Виктор Викторович, старший преподаватель кафедры «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Ivanov Viktor Viktorovich, senior lecturer of Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University
Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serikov Alexsandr Vladimirovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СВОЙСТВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
THE EFFECT OF HEAT CARRIER FLOW RATE ON THE ENERGY-SAVING PROPERTIES OF A POWER TRANSFORMER

Аннотация. В работе проведено исследование влияния расхода теплоносителя на изменение величины теплового потока, позволяющего оценить степень энергоэффективности рассматриваемого трансформатора. Приведенные исследования позволят установить зависимость между расходом теплоносителя и изменением величины тепловых сопротивлений в теплоноситель.
Abstract. This study investigates the effect of heat carrier flow rate on changes in heat flow, which is used to assess energy efficiency of the discussed transformer. The results of this study will help establish the correlation between heat carrier flow rate and changes in thermal resistance to the heat carrier.
Ключевые слова: исследование, энергоэффективность, теплоноситель, тепловой поток.
Key words: studies, energy efficiency, heat carrier, heat flow.

Введение

Функционирование электрических невозможно без силовых трансформаторов, которые являются их основополагающими компонентами и эксплуатируются в режиме интенсивных нагрузок. Чрезмерный нагрев данных устройств негативно влияет на долговечность изоляционных материалов и способен спровоцировать серьезные технологические сбои. По этой причине разработка энергоэффективных систем теплообмена, выступает первостепенной задачей для поддержания эксплуатационной пригодности трансформаторного оборудования.

Основная часть

При рассмотрении одного из способов повышения энергоэффективности силового масляного трансформатора за счет использования в его конструкции теплообменного блока необходимо провести тепловой расчет, ключевую роль в котором играет величина суммарного теплового сопротивления, определяемая поверхностью теплообмена $S_т$ теплообменного блока и коэффициентом теплоотдачи α в теплоноситель.

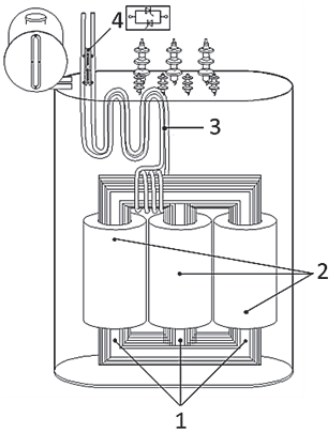


Рис. 1. Активная часть трансформатора с теплообменным блоком

Исследования проводились для трансформатора мощностью 16 000 кВ·А. В работе рассматривались конструкция теплообменного блока, представленная на рисунке 1. На стержнях трехфазного магнитопровода 1 расположены силовые обмотки трансформатора 2, которые позволяют получить низкое переменное напряжение требуемой величины. Теплопоглощающим элементом служит теплообменный блок 3 в форме трубки с развитой поверхностью теплообмена, по которому протекает теплоноситель (вода). При необходимости температуру теплоносителя предлагается поддерживать с помощью встречно-параллельно включенных силовых тиристоров 4, выполняющих роль полупроводникового

коммутатора. Так как рассматриваемую конструкцию предлагается использовать для обеспечения тепла в децентрализованной системе отопления, то диапазон регулирования скорости протекания воды был ограничен для соответствия допустимым пределам от 0,5 м/с до 1,5 м/с (СНиП 41-01-2003).

В результате анализа основных тепловых потоков от активных частей трансформатора были построены укрупненные эквивалентные схемы замещения при наличии и отсутствии в его конструкции теплообменного блока (рис. 2), в которых отображены тепловые потоки направленные в окружающую среду $Q_о$ и в воду $Q_в$ [1, 2].

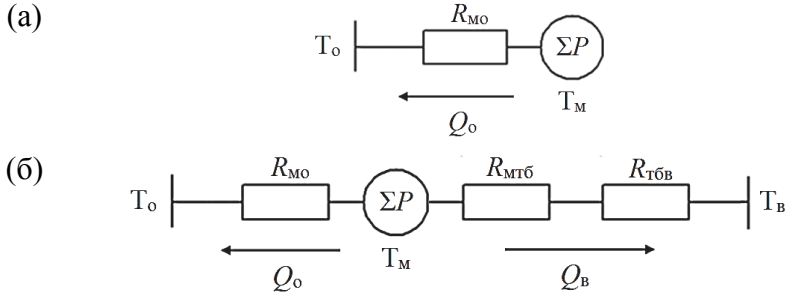


Рис. 2. Укрупненная эквивалентная схема замещения без теплообменного блока (а) и с теплообменным блоком (б)

Из представленных на рис. 2 схем очевидно, что на энергосберегающие свойства такого трансформатора будет влиять именно тепловой поток $Q_в$, который в свою очередь зависит от величины тепловых сопротивлений $R_{мтб}$ и $R_{тбв}$. Первоначально было определено тепловое сопротивление системы охлаждения трансформатора $R_{мо}$ включающее в себя бак трансформатора и радиаторы охлаждения, параметры и количество которых соответствует стандартной серии трансформаторов ТДЦ 16000. Расчеты проводились при условии, что трансформатор загружен на полную мощность (таким образом, тепловой поток через систему охлаждения трансформатора $Q_о$ будет равен суммарным электрическим потерям ΣP), а температура окружающей среды $T_о = 40$ °C.

Определить величину теплового потока $Q_в$ можно с помощью представленной формулы:

$$Q_в = \frac{T_м - T_о}{R_{тбв} + R_{мтб}},$$

где $T_м$ – температура трансформаторного масла.

Для расчета теплового сопротивления была применена известная методика теплового расчета силовых масляных трансформаторов [3], согласно которой $R_{мо}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{мо} = \frac{T_м - T_о}{Q_о},$$

Также были определены тепловые сопротивления от масла в теплообменный блок $R_{мтб}$ (при естественной конвекции) и от теплообменного блока в воду $R_{тбв}$ (при вынужденной конвекции). Для определения $R_{тбв}$ была применена следующая формула расчета:

$$R_{тбв} = \frac{1}{S_т \cdot \alpha_в},$$

где $S_т$ – поверхность теплообмена теплообменного блока; $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи от теплообменного блока в воду.

Коэффициент теплоотдачи в воду $\alpha_в$ определен согласно общепринятой методике [3], а поверхность теплообмена теплообменного блока $S_т$ была найден по формуле:

$$S_т = \pi \cdot d \cdot L,$$

где d – диаметр теплообменного блока; L – длина теплообменного блока.

Аналогично был определено $R_{мтб}$ согласно следующей формуле:

$$R_{мтб} = \frac{1}{S_т \cdot \alpha_м},$$

где $\alpha_м$ – коэффициент теплоотдачи от масла в теплообменный блок.

Результаты расчетов для разной скорости теплоносителя представлены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость тепловых сопротивлений от скорости теплоносителя

Скорость теплоносителя V, м/с	Тепловое сопротивление от теплообменного блока в воду $R_{тбв}$, К/Вт	Тепловое сопротивление от масла в теплообменный блок $R_{мтб}$, К/Вт
0,5	$1{,}03\cdot10^{-5}$	$2{,}73\cdot10^{-4}$
1	$5{,}92\cdot10^{-6}$	$2{,}73\cdot10^{-4}$
1,5	$4{,}39\cdot10^{-6}$	$2{,}73\cdot10^{-4}$

Заключение

В результате расчетов было установлено, что при изменении скорости теплоносителя в рассматриваемом диапазоне тепловое сопротивление от теплообменного блока в воду $R_{мв}$ на один или два порядка выше, чем $R_{мтб}$. В связи с этим, увеличение расхода теплоносителя (воды) в допустимых пределах незначительно влияет на величину теплового потока от масла в теплообменный блок. Таким образом энергосберегающие свойства такого трансформатора зависят только от сопротивления $R_{тбв}$, которое зависит только от физических параметров теплообменного блока. Уменьшение $R_{тбв}$ позволит увеличить тепловой поток в теплоноситель и как следствие увеличить энергосберегающие свойства трансформатора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сериков, А. В. Анализ тепловых процессов в специальном силовом масляном трансформаторе / А. В. Сериков, В. В. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2025. – Т. 25, № 4. – С. 53-60. – DOI 10.14529/power250407. – EDN YJVWUJ.
2. Фискова, Т. К. Повышение эффективности электромеханических преобразователей энергии / Т. К. Фискова, С. Н. Иванов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований – Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 175-178. – EDN NZQXSC.
3. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – М.: Альянс, 2016. – 527 с.

УДК 681.5

Иванюта Ярослав Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Ivanyuta Yaroslav Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сухоруков Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sukhorukov Sergei Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДРАЙВЕР ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK SIMULINK
UNIVERSAL STEPPER MOTOR DRIVER IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

Аннотация. В работе рассматривается разработка программной модели универсального драйвера шагового двигателя, предназначенной для исследования режимов работы электропривода в среде MATLAB/Simulink. Драйвер реализован с использованием библиотеки Specialized Power Systems и поддерживает микрошаговый режим управления. В модели предусмотрена работа как по стандартным сигналам STEP/DIR, так и в режиме задания скорости вращения двигателя. Особое внимание уделено формированию токов фаз и управлению силовой частью драйвера на основе мостового преобразователя, работающего в режиме Н-моста.

Abstract. This paper presents the development of a software model of a universal stepper motor driver intended for studying operating modes of an electric drive in the MATLAB/Simulink environment. The driver is implemented using the Specialized Power Systems library and supports microstepping control. The model provides operation both with standard STEP/DIR control signals

and in a speed control mode, where the rotational speed is specified in revolutions per minute. Special attention is given to phase current generation and control of the power stage based on a bridge converter operating in an H-bridge configuration.

Ключевые слова: шаговый двигатель, микрошаговый режим, драйвер, MATLAB/Simulink, электропривод.
Key words: stepper motor, microstepping, driver, MATLAB/Simulink, Universal Bridge, electric drive.

Введение

Шаговые электродвигатели широко применяются в различных системах автоматизации, таких как станки с числовым программным управлением, 3D-принтеры и позиционные механизмы. Основным достоинством таких двигателей является возможность точного позиционирования без использования датчиков обратной связи, что существенно упрощает структуру системы управления.

На практике управление шаговыми двигателями осуществляется при помощи специализированных драйверов, формирующих токи в обмотках двигателя в соответствии с выбранным режимом работы[1]. Современные драйверы, как правило, поддерживают микрошаговый режим, позволяющий повысить плавность вращения и снизить уровень вибраций. Однако при разработке и отладке алгоритмов управления использование реальных аппаратных драйверов не всегда удобно, что делает актуальной задачу создания программной модели универсального драйвера.

Целью данной работы является разработка модели универсального драйвера шагового двигателя в среде MATLAB/Simulink, позволяющей исследовать различные режимы управления и анализировать процессы в силовой части электропривода.

Основная часть

Общая структура драйвера показана на рис 1

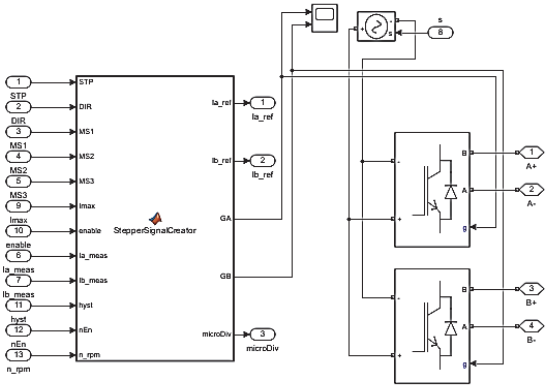


Рис. 1. Структурная схема универсального драйвера шагового двигателя

Разработанный драйвер реализован в виде совокупности функциональных блоков Simulink и элементов библиотеки Specialized Power Systems. Логика управления сосредоточена в программном блоке MATLAB Function, а силовая часть построена на базе универсального мостового преобразователя Universal Bridge[2].

Такой подход позволяет разделить алгоритмы управления и силовую электронику, что упрощает модификацию модели и делает её наглядной при анализе работы системы.

Управляющие импульсы на преобразователи каждой из фаз шагового двигателя показаны на рис 2

Формирование микрошаговых токов

Для реализации микрошагового режима используется формирование опорных токов фаз двигателя по синусоидальному закону[3]. Амплитуда токов задаётся параметром максимального фазного тока, а фазовый сдвиг между токами составляет 90 электрических градусов.

В модели предусмотрена возможность изменения разрешения микрошагов в процессе работы драйвера. Для предотвращения скачков тока при смене режима используется хране-

ние непрерывного электрического угла, что позволяет сохранить плавность переходных процессов в обмотках двигателя.

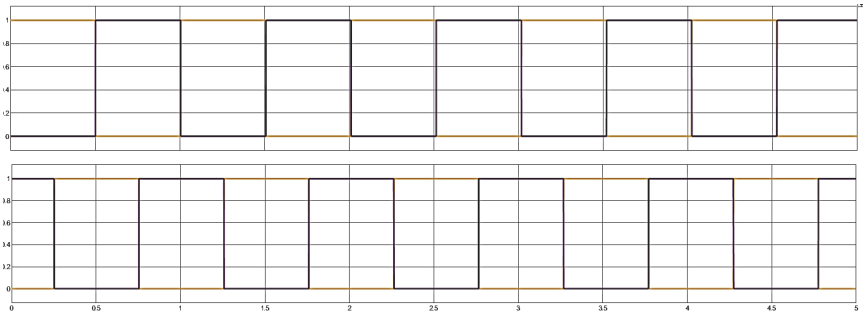


Рис. 2. Управляющие импульсы для преобразователей

Драйвер поддерживает два режима работы:

управление по сигналам STEP и DIR, характерное для большинства аппаратных драйверов;

режим задания скорости вращения, при котором скорость двигателя задаётся в оборотах в минуту.

Во втором режиме скорость преобразуется в скорость изменения электрического угла, что позволяет отказаться от генерации импульсов STEP и упростить интеграцию драйвера в системы регулирования скорости.

Силовая часть драйвера реализована с использованием блока Universal Bridge, настроенного в конфигурации H-моста. Для каждой фазы шагового двигателя используется отдельный мост, что позволяет независимо управлять напряжением, подаваемым на обмотки.

Управление ключами мостов осуществляется на основе гистерезисного регулирования тока. Такой метод выбран из-за простоты реализации и устойчивой работы в условиях моделирования. Формируемые управляющие сигналы обеспечивают подачу положительного, отрицательного или нулевого напряжения на соответствующую фазу двигателя.

Заключение

Разработка новых рецептур материалов для 3D печати на основе традиционно используемых полимеров позволяет использовать филамент с необходимыми на данный момент характеристиками для особо сложных моделей. В рамках данной работы рассмотрены вопросы разработки системы управления устройством, позволяющей автоматизировать процесс создания филамента из основного полимера и добавок.

Были определены основные функциональные требования системы управления, а также была разработана структурная схема с учётом всех управляемых устройств и пути, который проходит материал.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1 Кацман М.М. Электрические машины и электропривод : учебное пособие для вузов / М.М. Кацман. — 6-е изд., перераб. и доп. — Москва : Академия, 2019. — 384 с. — ISBN 978-5-4468-8594-3.

2 MathWorks, Inc. Simscape Electrical™ Specialized Power Systems User’s Guide [Электронный ресурс]. — Natick, Massachusetts, USA : MathWorks, 2023. — Режим доступа: https://www.mathworks.com (дата обращения: 28.01.2026).

3 Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control / R. Krishnan. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001. — 626 p. — ISBN 0-13-091014-7.

УДК 621.311
Казанцев Андрей Романович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kazantsev Andrey Romanovich, student, Komsomolsk-on-Amur State University
Кузьмин Роман Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kuzmin Roman Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State University

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
RESEARCH OF A COMPLEX POWER SUPPLY SYSTEM FOR A PRODUCTION SECTION OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Аннотация. В данной работе рассматривается процесс моделирования системы электроснабжения промышленных электродвигателей с использованием программного пакета Simintech. На первом этапе создается модель отдельного электродвигателя, основанная на его электрических и механических характеристиках. На втором этапе несколько таких двигателей объединяются в общую сеть, подключенную к шине питания, что позволяет провести оценку динамических процессов в системе при различных режимах работы.
Abstract. This work examines the process of modeling the power supply system for industrial electric motors using the SimInTech software package. At the first stage, a model of an individual electric motor is created based on its electrical and mechanical characteristics. At the second stage, several such motors are combined into a common network connected to the power bus, which allows for the evaluation of dynamic processes in the system under various operating modes.
Ключевые слова: прототип системы электроснабжения, модель асинхронного электродвигателя, силовая шина, взаимное влияние параметров, электроснабжение промышленного предприятия.
Key words: power supply system prototype, asynchronous electric motor model, power bus, mutual influence of parameters, industrial enterprise power supply.

Введение

В современных промышленных установках надежность и эффективность системы электроснабжения играют ключевую роль в обеспечении устойчивой работы электроприводов и технологического оборудования. Для анализа таких систем широко применяется моделирование, позволяющее исследовать поведение отдельных элементов и всей энергетической сети без проведения дорогостоящих экспериментов.

Основная часть

В качестве прототипа системы электроснабжения принята реальная схема питания секции цеха. На схеме показано подключение энергоблока, силовой шины и групп промышленных электродвигателей, являющихся основными потребителями электрической энергии.

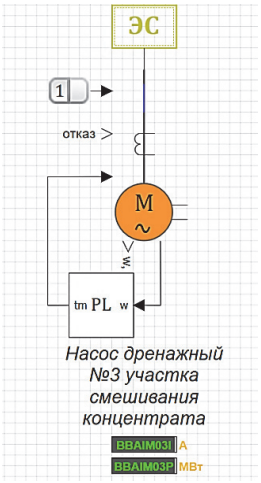


Рис. 1. Модель асинхронного двигателя и энергосистема

На первом этапе исследования в среде SimInTech построена модель асинхронного электродвигателя(рис.1), параметры которой задаются в соответствии с паспортными и каталожными характеристиками конкретной машины [2,4]. К основным параметрам, используемым при моделировании, относятся номинальная мощность, номинальное напряжение и частота питающей сети, коэффициент мощности, номинальная скорость вращения, а также параметры эквивалентной схемы замещения двигателя.

Следующим этапом стало объединение моделей отдельных электродвигателей в единую электрическую сеть (рис.2). Для этого каждый электродвигатель был подключён к общей силовой шине питания, которая, в свою очередь, связана с источником электрической энергии, имитирующим работу энергоблока или питающей подстанции [1,3].

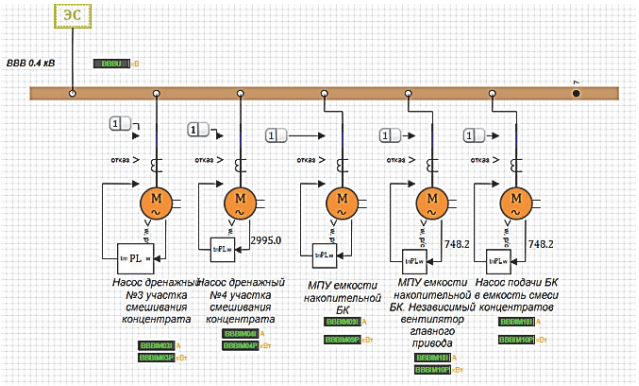


Рис. 2. Схема энергоблока с потребителями

Силовая шина моделируется как узел распределения мощности, к которому подключены несколько ветвей нагрузки в виде электродвигателей с различной мощностью и режимами работы. В модели источника питания задаются номинальное напряжение, частота, внутреннее сопротивление и другие характеристики, что позволяет приблизить условия моделирования к реальной системе электроснабжения промышленного предприятия.

Такая структура модели позволяет анализировать:

- взаимное влияние пусковых и нагрузочных токов электродвигателей друг на друга;
- изменение напряжения на шине при подключении и отключении отдельных потребителей;
- характер переходных процессов при изменении режима работы одного или нескольких электроприводов.

Заключение

В рамках выполненной работы разработана модель системы электроснабжения энергоблока с несколькими асинхронными электродвигателями в программной среде SimInTech на основе реальной схемы питания секции цеха. Показано, что использование моделирования позволяет исследовать динамические режимы работы системы, не прибегая к трудоёмким и дорогостоящим экспериментам на реальном объекте.

Созданная модель обеспечивает возможность анализа переходных процессов при пуске и изменении нагрузки электродвигателей, оценки взаимного влияния потребителей на параметры сети и проверки допустимости режимов по току и напряжению. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании и модернизации систем электроснабжения промышленных предприятий, а также при выборе рациональных режимов работы электроприводов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Климаш, В.С., Табаров, Б.Д. Разработка конденсаторных установок и способ регулирования реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2026. № 1 (57), С. 7-14. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.007.

2. Черный, С.П., Савельев, Д.О., Сбитнев, Н.Р., Саяпина, П.О. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2024. № 1(73). С. 4-10. EDN WKOYPI.

3. Поляков А.М. Моделирование электрической части электростанции в SimInTech: учебное пособие / А.М. Поляков. – Москва: ДМК Пресс, 2024. – 256 с. – ISBN 978-5-93700-270-9.

4. Калачев Ю.Н. Моделирование в электроприводе SimInTech: учебное пособие / Ю.Н. Калачев. – Москва: Изд-во МЭИ, 2022. – 180 с.

УДК 621.389
Клушина Елизавета Александровна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Klushina Elizaveta Alexandrovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Любушкина Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Liubushkina Nadezhda Nikolaevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ШУМА
DEVELOPMENT OF A NOISE METER

Аннотация. В статье рассматривается проблема акустического комфорта в образовательных учреждениях учащихся начальной школы. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью создания простого прибора для учителей, позволяющее поддерживать комфортную среду обучение без использования вербальных замечаний. Статья посвящена разработке устройства, позволяющего измерять уровень звука и определять критические уровни шума (установленные санитарно-гигиеническими нормативами), представляющие угрозу для здоровья и работоспособности школьников младшего звена, при превышении критических норм активируется сигнализации в виде мелодии.
Abstract. The article discusses the problem of acoustic comfort in educational institutions for primary school students. The relevance of this work is due to the need to create a simple device for teachers, which allows to maintain a comfortable learning environment without the use of verbal remarks. The article is devoted to the development of a device that allows to measure the sound level and determine critical noise levels (established by sanitary and hygienic standards), which pose a threat to the health and performance of junior school students, when critical norms are exceeded, an alarm is activated in the form of a melody.
Ключевые слова: измеритель шума, школьники младшего звена, санитарные нормы, шумовая сигнализация, акустический комфорт.
Key words: noise meter, elementary school students, sanitary standards, noise alarm, acoustic comfort.

Введение

В образовательных учреждениях существуют высокие требования не только к методикам обучения, но и к условиям, в которых находятся учащиеся. Одной из наиболее недооцененной, но крайне значимой проблемой, является шумовое загрязнение, влияющие на качество обучения и здоровье школьников. Особенно уязвимой группой в данном случае выступают школьники младшего звена, их слуховая система находится в стадии активного развития, а нервная система еще полностью не способна эффективно фильтровать акустическое загрязнение. Актуальность исследований обусловлена тем, что постоянный фоновый шум или резкий громкий звук представляет не просто раздражающий фактор, а серьезную угрозу здоровью. Действующие санитарно-гигиенические нормативы устанавливают допустимый уровень шума не выше 40-55 дБ в зависимости от назначения кабинета, превышение данных допустимых норм приводит к снижению концентрации внимания и работоспособности, трудно усваивается материал и приносит психоэмоциональный дискомфорт [1]. Длительное нахождение в условиях акустического дискомфорта приводит к быстрой утомляемости, головным болям, вегетативным расстройствам и даже тугоухости, что напрямую влияет на самочувствие и качество обучения [2].

Исследования показали, несмотря на существующие санитарные нормы, на практике уровень шума в образовательных учреждениях регулярно превышает допустимые значения примерно в 1,5-2 раза. Исходя из этого, данный проект направлен на разработку измерителя

шума, который будет не просто измерять уровень шума, но и в понятной развлекательной, сигнальной форме (мелодией) оповещать учащихся о превышении критического порога. Это позволит школьникам младшего звена самостоятельно контролировать свое поведение. Для разработки данного устройства неотъемлемой частью служит учет физики распространения звука в замкнутом пространстве. Уровень воспринимаемого шума существенно зависит от высоты расположения датчика. По ГОСТ 23337-2014 в помещения площадью более 20м^2 измерения нужно производить на высоте 0,1 – 1,2 м или 0,1 – 1,5 м и не менее чем в трех точках. По данным исследования рост младшего школьника, примерно составляет 120 -150 см, поэтому важно измерять уровень звука на высоте сидящего, примерно 100см, и стоящего ребенка (120-140см). Замеры на высоте роста взрослого человека, дают искаженные результаты и не отражают реальную звуковую нагрузку на ребенка. Данная разработка является социальным проектом, так как ориентирована на улучшение образовательной среды и сохранение здоровья подрастающего поколения. Разработанный измеритель шума может быть внедрен в любой образовательной среде, как инструмент для мониторинга, так и средство для коррекции поведения.

Таким образом, разработка измерителя шума это не просто создание прибора, а шаг к сохранению здоровья и созданию комфортной среды, где учащиеся младшего звена будут защищены от скрытой акустической угрозы.

Основная часть

Для реализации устройства было проведено исследование зашумленности рекреации школы, получены исходные сведения, разработан алгоритм функционирования устройства. Структурная схема приведена на рис. 1.

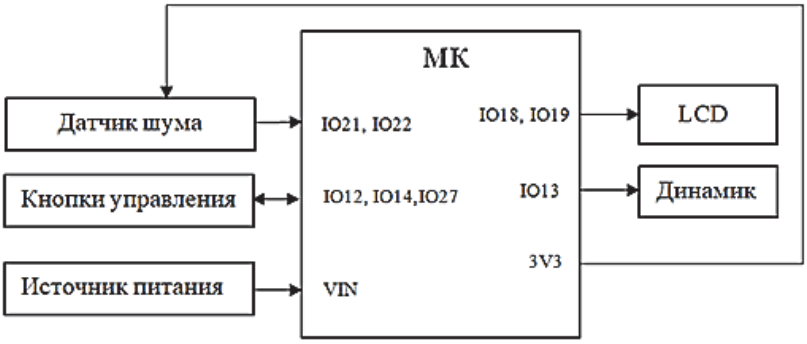


Рис. 1. Структурная схема измерителя

Центральное устройство. На первом этапе разработки была выбрана архитектура устройства. В качестве базового элемента использован микроконтроллер ESP32 – двухъядерный микропроцессор, имеющий очень малое энергопортебление. На одном кристалле собрано устройство со встроенным контроллером радиосвязи Wi-Fi, Bluetooth и IEEE 802.15.4. Микроконтроллер имеет большое количество вход/выходов общего назначения, которые не имеют конкретной фиксированной функции, имеется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), широтно-импульсная модуляция (ШИМ), интерфейсы I2C, SPI, UART, CAN. Все эти характеристики существенно упрощают проектирование всего измерителя шума в целом [3].

Датчики. В качестве измерения уровня звукового давления (SPL) в децибелах (дБ) будет использован датчик 2C Decibel Meter Module от PCB Artists – компактный модуль, MEMS-микрофон встроен, подключается к микроконтроллеру через интерфейс I2C. Его преимущество – высокая точность измерения ±2 дБ SPL. Диапазон измерения от 30 до 120 дБ (Pro версия) или от 35 до 115 дБ (Regular и Spectrum Analyzer версия), частотный диапазон от 30 Гц до 8 кГц. Датчик подключается через интерфейс I2C. Коррекция уровня звука с учетом чувствительности человеческого уха к разным частотам в двух режимах – измерение шума окружающей среды (A-коррекция) и измерение пикового уровня звука (C-коррекция). Датчик поддерживает время усреднения 125 мс, что необходимо для полу-

чения картины зашумленности в режиме реального времени, а наличие буфера на 100 чтений дает возможность переходить в спящий режим.

Датчик шума (Troyka-модуль) – аналоговый датчик шума с встроенным MEMS-микрофоном ICS-43434 производства TDK InvenSense и усилителем. Датчик выполняет измерения максимально часто, интегрирует полученные значения и строит график звуковой волны, это позволяет определять изменение общего звукового фона и фиксировать хлопки. Для регулировки чувствительности на модуле имеется встроенный триммер. Сенсор выдаёт аналоговый сигнал, пропорциональный средней шумности за последние несколько сотен миллисекунд. Для работы с ним на ESP32 потребуется использовать аналоговый вход (ADC) и обрабатывать данные в программном обеспечении.

Громкоговоритель Grove – Speaker – это модуль, который состоит из усилителя мощности LM386 и динамика. Громкость можно регулировать с помощью встроенного потенциометра. При разной частоте входного сигнала громкоговоритель генерирует различный музыкальный фон для привлечения внимания: тихая, негромкая классическая музыка, звуки природы, что поможет снизить тревожность и дисциплинирует шумный класс. Возможна смена активности: бодрая музыка для выхода на перемену, спокойная – для возвращения к уроку. Это работает как якорь, настраивающий психику ребенка.

ЖК-дисплей модель Pico-LCD-1.3 отображение информации о значении уровня звука, его превышении.

Устройство предполагает наличие кнопок для управления работой измерителем.

Заключение

Разработанный измеритель шума с функцией музыкальной индикации полностью соответствует поставленной технической задаче. Он может быть рекомендован для использования в классах начальной школы, группах продленного дня и игровых комнатах в качестве эффективного инструмента саморегуляции поведения учащихся.

В отличие от покупных аналогов (просто «датчиков громкости»), данное устройство имеет простой и понятный алгоритм, который учитель может самостоятельно настраивать (менять порог срабатывания и мелодию), а его создание в рамках школьного проекта показало высокую образовательную ценность на стыке физики, информатики и психологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов, А. И. Проектирование комфортной среды обитания в помещениях жилых зданий с позиции физико-технических параметров ограждающих конструкций : монография / А. И. Герасимов, И. П. Салтыков. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2019. - 175 с. - ISBN 978-5-4475-9786-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.com/catalog/product/1910745 (дата обращения: 06.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

2. Кузьмина, Е. А. Влияние школьного шума на работоспособность и функциональное состояние младших школьников / Е. А. Кузьмина, Д. А. Кривуля // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102, № 5. – С. 478–483. – DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-478-483. – EDN: ABCDEF.

3. Магда, Ю. С. Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств : практическое руководство / Ю. С. Магда. – Москва : ДМК Пресс, 2017. - 225 с. – ISBN 978-5-97060-551-6. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2248789 (дата обращения: 06.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

УДК 615.471:621.375
Кодирова Хангома Вафомамадовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kodirova Hangoma Vafomamadovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kopytov Sergey Mihailovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

СХЕМОТЕХНИКА ВХОДНОГО КАСКАДА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОПОТЕНЦИАЛОВ
CIRCUIT DESIGN OF THE INPUT STAGE OF DIAGNOSTIC INSTRUMENTS FOR BIOPOTENTIAL ANALYSIS

Аннотация. Исходя из особенностей получения биосигналов в реальных условиях, выяснены основные требования к входным каскадам диагностических приборов для анализа биопотенциалов. Составлена принципиальная схема входного каскада одноканального ЭКГ, выбраны микросхемы усилителей, обладающих требуемыми параметрами, рассчитаны значения пассивных компонентов данной схемы.
Abstract. Based on the specifics of biosignal acquisition in real-world conditions, the key requirements for the input stages of diagnostic devices for biopotential analysis were determined. A schematic diagram of the input stage of a single-channel ECG was developed, amplifier chips with the required parameters were selected, and the values of the passive components for this circuit were calculated.
Ключевые слова: биопотенциалы, инструментальный усилитель, медицинская диагностическая аппаратура, коэффициент ослабления синфазного сигнала, ЭКГ.
Key words: biopotentials, instrument amplifier, medical diagnostic equipment, common mode rejection ratio, ECG.

Введение

Медицинские приборы, использующие измерения биопотенциалов, являются одним из основных инструментов функциональной не инвазивной диагностики многих серьёзных заболеваний [1]. Достаточно упомянуть такой прибор, ставший обязательным элементом большинства диагностических исследований, как электрокардиограф (ЭКГ). Также в медицинской практике используются холтеровский монитор, электроэнцефалограф (ЭЭГ), электромиограф (ЭМГ), электроретинограф (ЭРГ) и другие приборы, измеряющие биоэлектрические потенциалы. Хотя каждый из перечисленных приборов имеет свою специфику, связанную с уровнем потенциалов, их спектральным составом, числом электродов, методикой обработки получаемых данных и другими факторами, тем не менее, существуют общие схемотехнические решения, связанные с получением и первичной обработкой входных сигналов.

Схемотехника входных каскадов приборов определяется следующими особенностями биосигналов. Во-первых, они имеют крайне малую амплитуду. Например, амплитуда ЭКГ сигнала составляет 1…5 мВ, а ЭЭГ сигнала всего 10…100 мкВ. Следовательно, необходимо использовать высокочувствительные усилители с низким уровнем собственного шума. Во-вторых, частотный диапазон большинства биосигналов составляет 0,05…500 Гц. В этот же диапазон попадает мощная помеха 50 Гц от сети питания переменного тока, которую необходимо вырезать. В-третьих, сопротивление кожи человека сравнительно высоко. Поэтому необходимо, чтобы входное сопротивление прибора было намного выше. Также в биосигнале присутствуют помехи, зависящие от состояния организма и внешних факторов, например, от изменения активности мышц, дыхания, эмоционального состояния, состава крови и т.д. Кроме того, важным моментом является защита входных каскадов от статического электричества со стороны пациента и защита пациента от опасных токов со стороны диагностического прибора.

Целью работы является выбор и обоснование схемного решения входного каскада приборов для анализа биопотенциалов, позволяющего учесть разнообразные факторы, присутствующие при измерениях.

Основная часть

Наилучшим типом усилителя для подключения входных электродов считают инструментальный усилитель (ИУ) [2]. Принципиальная схема классического ИУ на трёх операционных усилителях (ОУ) приведена на рис. 1.

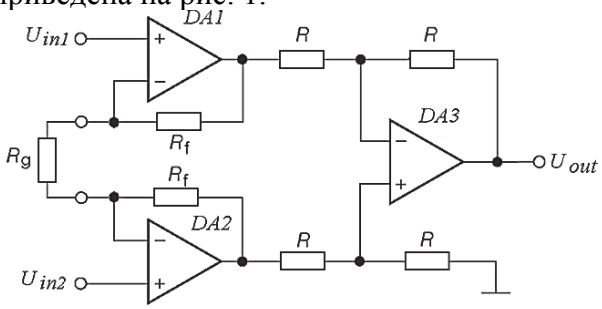


Рис. 1. Принципиальная схема классического ИУ на трёх ОУ

ИУ обладает одновременно несколькими важными свойствами. Он имеет большой коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСФ), высокое входное сопротивление по двум входам U_{in1} и U_{in2}, низкое напряжение собственного шума и высокий коэффициент усиления дифференциального сигнала. Входная схема из двух ОУ *DA1* и *DA2* обеспечивает высокое усиление дифференциального полезного сигнала и единичный коэффициент передачи синфазного сигнала помехи. В результате на симметричном выходе этой схемы дифференциальный сигнал будет иметь ослабленную синфазную составляющую. Затем этот сигнал подается на разностный усилитель на ОУ *DA3*, который обычно имеет единичный коэффициент усиления. Каскад на *DA3* окончательно убирает остатки синфазной составляющей сигнала и служит для получения однополярного выхода относительно общей точки.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала

$$K_{\text{дифф}} = 1 + \frac{2R_f}{R_g}. \quad (1)$$

Классическую схему ИУ в настоящее время обычно выпускают в микроэлектронном исполнении в виде микросхем. Поскольку от резистора *R_g* зависит коэффициент усиления, его используют в качестве внешнего настроечного элемента. Для этого выводы для его подключения выполняют в виде ножек микросхемы ИУ.

Схемотехническим решениям усилителей биопотенциалов в различных источниках уделяется достаточно много внимания [1, 3, 4]. Однако обычно решают какую-то одну задачу без учета сопутствующих проблем. В представленной комбинированной схеме входных каскадов учитываются также дополнительные требования к таким каскадам (рис. 2). В схеме применен ИУ, выполненный в одной микросхеме. Подключение к пациенту показано на примере одноканального получения ЭКГ, используемого в носимых устройствах для быстрого скрининга. Прибор регистрирует разность потенциалов, соответствующую 1-ому стандартному отведению (правая рука - левая рука).

Конденсаторы *C1* и *C2*, включенные параллельно с каждым отведением, служат для выравнивания емкости кабеля отведений и представляют собой, в совокупности с сопротивлением и индуктивностью кабеля, фильтр нижних частот.

Номиналы конденсаторов для данного фильтра выбирают с учетом сопротивления тела человека, которое принимают равным 10б Ом. Частоту среза фильтра выбирают выше верхней частоты полосы полезного сигнала. Например, для полосы сигнала 500 Гц безопасной границей будет частота примерно в 8 раз выше, то есть 4 кГц.

$$C_{\Phi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^3} = 25{,}1 \cdot 10^{-9}\Phi = 25{,}1 \text{ нФ},$$

где *R* - сопротивление источника сигнала (тело человека), f - частота дискретизации.

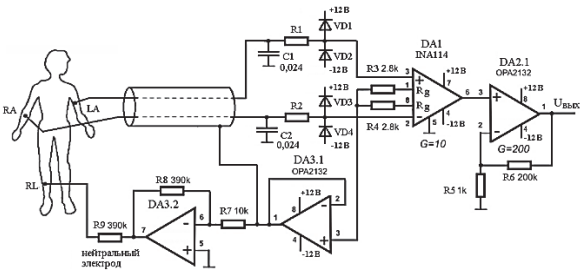


Рис. 2. Принципиальная схема входных каскадов измерителя биопотенциалов

Защита входов инструментального усилителя *DA1* от электростатического разряда выполнена с использованием выпрямительных диодов *VD1 – VD4* и резисторов *R1* и *R2*. В Применены высокоскоростные диоды 1N4148 с обратным смещением от входной линии до напряжений питания. При возникновении импульса, повышающего входное напряжение выше положительного напряжения питания, диод *VD1* откроется, и избыточное напряжение упадет на резисторе *R1*. Аналогично, если напряжение уменьшится ниже отрицательного напряжения питания, диод *VD2* откроется. Сопротивления резисторов *R1* и *R2* можно выбрать примерно равным сопротивлению тела, т.е 1 МОм.

В качестве входного усилителя DA1 выберем прецизионный ИУ INA114 [5]. Его параметры: напряжение питания от ±2,5 В до ±18 В, ток потребления около 2,2 мА, коэффициент усиления настраивается от 1 до 10 000, очень низкое напряжение смещения до 50 мкВ, дрейф напряжения смещения до 0,25 мкВ/°С, входной ток смещения всего до 2 нА, коэффициент подавления синфазного сигнала минимум 115 дБ при коэффициенте усиления 1000, полоса пропускания 1 МГц при единичном усилении, входное сопротивление 10 ГОм. Использование ИУ решает две задачи. Во-первых, он является согласующим элементом с последующими каскадами усиления, поскольку преобразует входной дифференциальный сигнал в синфазный сигнал относительно земли. Во-вторых, ИУ подавляет синфазные помехи от различных внешних источников, которые присутствуют на обеих входных линиях. Наиболее мощной помехой является наведенное напряжение от сети питания переменного тока частотой 50 Гц.

Поскольку полоса пропускания сужается при увеличении усиления, коэффициент усиления ИУ следует устанавливать не очень высоким. Выразим из формулы (1) сопротивление внешнего резистора R_g и рассчитаем его значение для коэффициента усиления дифференциального сигнала, равного 10:

$$R_{\text{g}} = \frac{2R_f}{K_{\text{дифф}}-1} = \frac{50}{10-1} = 5{,}6 \text{ кОм},$$

где для ИУ INA114 значение сопротивления $2R_f$ составляет 50 кОм.

Из-за высокого входного сопротивления ИУ у него отсутствуют входные токи. Это может привести к накоплению зарядов на электродах и возрастанию их потенциалов до напряжений питания, пока не откроются соответствующие диоды VD1 – VD4. ИУ войдет в режим ограничения. Хотя пары диодов VD1 – VD2 и VD3 – VD4 можно рассматривать как делители напряжений питания, но из-за разброса их параметров и высокого обратного сопротивления эти делители малоэффективны. Поэтому средний потенциал поверхности тела следует приблизить к потенциалу земли. Для этого поступают следующим образом. Резистор R_g преобразуют в делитель напряжения из двух одинаковых резисторов, которые на рис. 2 обозначены как R3 и R4. Их сопротивления $R3 = R4 = R_g/2 = 5{,}6/2 = 2{,}8$ кОм. Потенциал со средней точки делителя сначала поддают на буферный повторитель напряжения на ОУ DA3.1, а с него на инвертирующий усилитель на ОУ DA3.2 с коэффициентом усиления 39. Буферизованный потенциал средней точки подключают к экрану соединительного кабеля сигнальных электродов. Проинвертированный усиленный потенциал подают на нейтральный электрод, который закрепляют в удалении от измерительных электродов, например, на рис. 2 он размещен на правой ноге. Именно он задает средний потенциал поверхности тела.

После ИУ разностный сигнал дополнительно усиливается примерно в 200 раз неинвертирующим усилителем на ОУ DA2.1. При этом общий коэффициент усиления дифферен-

циального сигнала составляет 2000. В качестве усилителей DA2 и DA3 выбраны сдвоенные высокоскоростные прецизионные ОУ OPA2132. Данный тип ОУ имеет напряжение питания от ±2,5 В до ±18 В, входной ток смещения 50 пА, напряжение смещения не выше 500 мкВ, низкий уровень шума 8 нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 кГц, полосу пропускания 8 МГц и скорость нарастания выходного сигнала 20 В/мкс. Выходной ток ОУ может достигать 40 мА, что позволяет его использовать для перезаряда емкости экрана соединительного кабеля сигнальных электродов.

Выходное напряжение сигнала $U_{\text{вых}}$ достигает порядка единиц вольт, и такой сигнал уже удобно преобразовывать и обрабатывать. Целесообразно в качестве первого этапа преобразования выполнить аналоговую гальваническую развязку, которая будет гарантировать безопасность пациента и улучшит помехозащищенность.

Заключение

Таким образом, в результате анализа источников информации выяснены основные требования к входным каскадам диагностических медицинских приборов для анализа биопотенциалов, найдены схемотехнические решения их исполнения. Составлена принципиальная схема входного каскада одноканального ЭКГ, выбраны микросхемы усилителей, обладающих требуемыми параметрами, рассчитаны значения пассивных компонентов данной схемы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уэбстер, Дж. Медицинские приборы. Разработка и применение. – М.: Техносфера, 2004. – 620 с.
2. Волович, Г. И. Современные инструментальные усилители // Современная электроника. – 2006. – № 2. – С. 10-15.
3. Журавлев, Д. В. Исследование вариантов подавления помех усилителями биопотенциалов / Д. В. Журавлев, Ю. С. Балашов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 58-65. – EDN YKJXAN.
4. Выбор оптимального схемотехнического решения блока регистрации ЭМГ-сигнала для протеза / С. Ю. Куст, С. Х. Кадыров, П. А. Шостак, М. В. Маркова // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – № 11(40). – С. 7.
5. Texas Instruments. INA114 Precision Instrumentation Amplifier Datasheet and Application Notes. – SBOS030.

УДК 621.314

Королев Денис Игоревич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Korolev Denis Igorevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serikov Alexsandr Vladimirovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ
METHODS TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF TRANSFORMERS

Аннотация. В работе выполнен критический анализ существующих способов повышения энергоэффективности силовых трансформаторов. Рассмотрены достоинства и недостатки этих способов. Выделено два основных направления повышения энергоэффективности. Первое направление связано с уменьшением потерь в силовых трансформаторах. Второе направление связано с полезным использованием этих потерь.

Abstract. The paper presents a critical analysis of existing methods for improving the energy efficiency of power transformers. The advantages and disadvantages of these methods are considered. Two main directions for improving energy efficiency have been identified. The first direction is related to reducing losses in power transformers. The second direction is related to the beneficial use of these losses.

Ключевые слова: энергоэффективность, силовой трансформатор, утилизация тепла, подстанция, энергосбережение.
Key words: energy efficiency, power transformer, heat recovery, substation, energy saving.

Введение

В современной энергетике повышение энергоэффективности электрооборудования, оптимизация и минимизация потерь при передаче, трансформации и распределении электрической энергии является актуальной задачей. Силовой трансформатор является устройством, через которое проходит большой объем электрической энергии. Причем осуществляется многоступенчатое трансформирование для снижения потерь при передаче электроэнергии на дальние расстояния и последующие трансформирование для получения удобного для использования уровня напряжения требуют наличие большого парка трансформаторного оборудования. При преобразовании энергии в трансформаторе, как и в любом электрооборудовании, появляются потери. В работе рассмотрены основные пути повышения энергоэффективности силового трансформатора.

Основная часть

С целью более детального понимания процессов, влияющих на энергоэффективность, проанализируем выражение для КПД η силового трансформатора [1]:

$$\eta = 1 - (\beta^2 P_{к.з} + P_{х.х})/(\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + \beta^2 P_{к.з} + P_{х.х}),$$

где β – коэффициент нагрузки; $P_{к.з}$ – мощность потерь короткого замыкания; $P_{х.х}$ – мощность потерь холостого хода; $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора; $\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности.

Из приведенной формулы видно, что передаваемая во вторичную цепь мощность будет увеличиваться при выполнении следующих условий:

1) коэффициент нагрузки β будет оптимальным;

2) коэффициент мощности $\cos\varphi_2$ будет увеличиваться (в идеале – до единицы);

3) мощность потерь $P_{х.х}$ будет уменьшаться;

4) мощность потерь $P_{к.з}$ будет уменьшаться.

По закону сохранения энергии даже при значительных улучшениях конструкции (пункт 2, 3 и 4) и качества электроэнергии в сети (пункт 1 и 2) тепловые потери в силовых трансформаторах неизбежны и будут составлять значительную часть, особенно в трансформаторах большой мощности и высокого класса напряжения. На основе анализа имеющихся публикаций можно выделить следующие основные способы повышения энергоэффективности.

Применение магнитопроводов из аморфных металлических сплавов для снижения потерь холостого хода. С помощью замены традиционной холоднокатаной текстурованной электротехнической стали на аморфные металлические сплавы для сборки магнитопровода снижаются потери холостого хода в трансформаторе. Аморфные сплавы не имеют кристаллической решетки, что устраняет главный источник потерь на гистерезис в стали – магнитную анизотропию. Это приводит к резкому снижению сопротивления перемагничиванию. Потери холостого хода в трансформаторе с аморфным магнитопроводом могут быть в 4…5 раз ниже, чем в аналогичном трансформаторе со стальным сердечником. Это эффективный способ снижения постоянных (независимых от нагрузки) потерь [2]. Особенно выгодно применение в трансформаторах, работающих в режиме длительного холостого хода или с недогрузкой. Есть ряд ограничений и недостатков. К ним относятся: сложность изготовления (аморфная лента очень тонкая и хрупкая, что требует специального оборудования для навивки и сборки сердечника, а также особых мер защиты от механических воздействий), низкая индукция насыщения, что может потребовать увеличения сечения сердечника и соответственно габаритов, стоимость аморфного материала выше, но она окупается в течение срока службы за счет экономии электроэнергии.

Внедрение систем регулирования напряжения с тиристорными коммутаторами. Такие системы регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) позволяют добиться минимизации потерь при регулировании путем внедрения полупроводниковых ключей для бес-

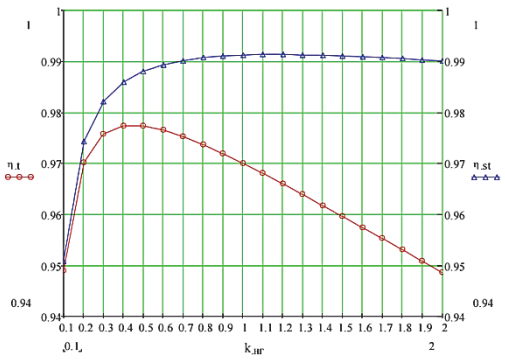


Рис. 1. Коэффициент полезного действия: η_t – для классического трансформатора с масляным охлаждением; η_{st} – для трансформатора со сверхпроводящими обмотками

контактного переключения отпаек обмотки. Тиристоры, управляемые сложной системой синхронизации, включаются и выключаются в моменты перехода тока через ноль, что исключает возникновение электрической дуги, характерной для механических контактов. Процесс переключения происходит в десятки раз быстрее, увеличивается быстродействие регулятора и срок службы устройства РПН (отсутствует износ и эрозия контактов) [1]. Минимизируются переходные процессы и искажения тока/напряжения во время регулировки, что косвенно снижает дополнительные динамические потери в активных частях трансформатора. К недостаткам этого способа можно отнести: сложность и стоимость систем с полностью тиристорным или гибридным (тиристоры и механические контакты) переключением, наличие потерь в тиристорах. Несмотря на низкое сопротивление в открытом состоянии, тиристоры вносят дополнительные потери при протекании токов через них. Данный способ направлен в первую очередь на повышение надежности и точности регулирования, а также на снижение эксплуатационных затрат на обслуживание РПН, что в комплексе повышает энергоэффективность системы в целом.

Использование обмоток из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для снижения потерь короткого замыкания. Суть метода в замене традиционных медных или алюминиевых обмоток на обмотки, выполненные из ленты ВТСП-материала. При охлаждении до температуры жидкого азота (-196°С) ВТСП-материалы переходят в сверхпроводящее состояние, что теоретически сводит к нулю потери в обмотках (потери короткого замыкания). ВТСП-ленты способны пропускать токи, на порядки превышающие возможности меди того же сечения, что позволяет резко уменьшить габариты и массу обмоток. Сверхпроводящий трансформатор может выдерживать значительные кратковременные перегрузки без перегрева и потери изоляционных свойств. К недостаткам этой технологии можно отнести необходимость создания и обслуживания сложной, энергозатратной и дорогостоящей системы охлаждения жидким азотом, необходимость разработки систем быстрого обнаружения и защиты от выхода сверхпроводника из сверхпроводящего состояния, высокую стоимость ВТСП-лент. На рис. 1 видно, что КПД трансформатора с использованием обмоток из ВТСП η_{st} при высоком коэффициенте нагрузки $k_{нг}$ практически не зависит от самой нагрузки и достигает достаточно высоких значений [3].

Эта технология будущего, обладающая максимальным потенциалом для повышения КПД и компактности силовых трансформаторов, особенно для объектов большой мощности Внедрение сдерживается высокой стоимостью и сложностью криогенных систем.

Системы утилизации тепловых потерь трансформатора. Идея состоит в использовании тепловой энергии, выделяющейся при работе трансформатора в полезную энергию для сторонних потребителей. Утилизированное тепло может использоваться для отопления административных и производственных зданий на подстанции, горячего водоснабжения, обогрева технологических помещений (например, аккумуляторных помещений) или в близлежащих жилых или коммерческих объектах [4]. Применение такого способа приведет к снижению затрат на собственную систему отопления подстанции, улучшению теплового режима самого трансформатора (при активном отводе тепла). Структура потерь энергии на подстанции ПАО «ФСК ЕЭС» по результатам энергетического обследования приведена на рис. 2.

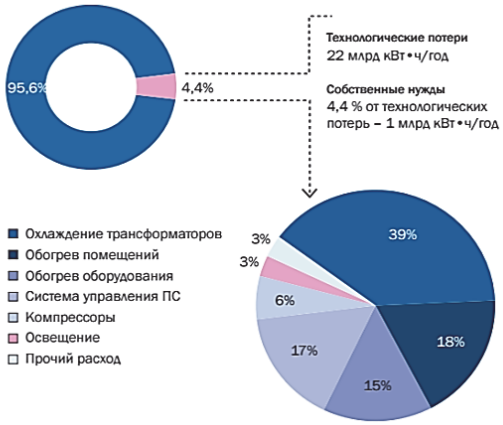


Рис. 2. Структура расхода элек-троэнергии на подстанции

К недостаткам этого способа можно отнести сложность использования низкопотенциального тепла из-за необходимости применения эффективных, но дорогих теплонасосных установок для повышения температурного потенциала, необходимость создания разветвленной системы теплотрасс и согласования с потребителями тепла, зависимость системы утилизации тепла от времени года и постоянства теплопотребления, необходимость значительных первоначальных инвестиций в оборудование для утилизации [5].

Заключение

Таким образом, выявлено, что в современной энергетике прослеживаются два магистральных направления повышения энергоэффективности трансформаторов. К первому направлению можно отнести усилия для минимизации потерь трансформатора, направленные на совершенствование его конструкции с помощью применения современных материалов. Второе направление – это утилизация тепловых потерь с целью их полезного использования. Для достижения лучшего результата необходим комплексный подход к проектированию современных подстанций, предполагающий разработку гибридных решений, сочетающих преимущества описанных направлений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савинцев Ю.М. Энергоэффективные силовые трансформаторы: тенденции развития конструкции и характеристик энергосбережения // Новое в российской электроэнергетике. 2012. №10. С. 40-45.

2. Арараться Л.С., Крупнов А.В., Кожекин А.Н. Энергоэффективные силовые трансформаторы с сердечником из аморфной стали // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 51–57.

3. Галеев, Р. Г. Ограничение токов короткого замыкания посредством применения высокотемпературных сверхпроводящих проводников в силовых трансформаторах / Р. Г. Галеев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2024. – № 1. – С. 203-206. – EDN PNQMGF.

4. Байшев, А. В. Оценка возможности использования сбросного тепла силовых трансформаторов для отопления и горячего водоснабжения электрических подстанций / А. В. Байшев, А. С. Торопов // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. – 2018. – № 24. – С. 5-7. – EDN YQOJVR.

5. Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. Исследование модели повышения энергетической эффективности системы собственных нужд трансформаторной подстанции // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 2(59). – С. 11-19. – DOI: 10.18503/2311-8318-2023-2(59)-11-19.

УДК 621.317
Кужель Алексей Александрович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kuzhel Alexey Alexandrovich, student of Komsomolsk-on-Amure State University
Марущенко Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Marushchenko Sergey Grigorevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor “Industrial electronic and innovative technology”, Komsomolsk-on-Amur State University

КОНФИГУРИРОВАНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ «ANADIGM» В СРЕДЕ LABVIEW MAKERHUB
CONFIGURING OF FILD PROGRAMMABLE ANALOG ARRAYS «ANADIGM» IN LABVIEW MAKERHUB ENVIRONMENT

Аннотация. Целью работы является практическая реализация способа конфигурирования программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС) серии «Anadigm» путем загрузки данных конфигурации непосредственно из внешнего постоянного запоминающего устройства (ПЗУ). Рассмотрен способ записи конфигурационных данных в ПЗУ типа SPI EEPROM в программе Labview MakerHub. В статье рассматриваются SPI-команды EEPROM 25-й серии, назначение SPI-блоков в Labview, режим работы SPI-интерфейса. В графической среде программирования Labview разработана программа для записи конфигурационных данных в ПЗУ 25AA080A. Результатом работы является налаженное взаимодействие между ПЗУ 25AA080A и ПАИС AN231E04. В заключении приведены краткие выводы по данной работе.
Abstract. The aim of this work is the practical implementation of a method for configuring field programmable analog arrays (FPAA) of the Anadigm series by loading configuration data directly from an external read-only memory (ROM). A method for writing configuration data to an SPI EEPROM using the Labview MakerHub program is considered. The article discusses the SPI commands of the 25-series EEPROM, the purpose of SPI blocks in Labview, and the operating mode of the SPI interface. A program for writing configuration data to the 25AA080A ROM has been developed in the Labview graphical programming environment. The result of the work is a well-established interaction between the 25AA080A EEPROM and the AN231E04 FPAA. A brief summary of this work is provided in the conclusion.
Ключевые слова: ПАИС, САПР Anadigm Designer2, ШИМ-контроллер, SPI-интерфейс.
Key words: FPAA, CAD Anadigm Designer2, PWM-controller, SPI.

Введение

Использование программируемых аналоговых интегральных схем ПАИС (FPAA) позволяет реализовать разнообразные аналоговые устройства, кардинально снизив их стоимость и габариты. Наиболее простой способ конфигурирования ПАИС это загрузка конфигурационных данных непосредственно из внешнего ПЗУ. Более всего для этой цели подходит ПЗУ 25 серии SPI EEPROM 25AA080A[2].

Одним из популярных, на сегодняшний день, способом взаимодействия компьютера с электронными устройствами по цифровым интерфейсам (UART, SPI, I2C, 1-WIRE) является использование программы LabView с библиотекой Linx (MakerHub)[1]. В большинстве случаев для передачи данных с компьютера на внешнее устройство используется только интерфейс USB, поэтому для взаимодействия с устройствами по другим цифровым интерфейсам требуется посредник – отладочная плата Arduino или Raspberry PI. Именно этот способ записи данных во внешнее ПЗУ SPI EEPROM 25AA080A был применен для последующего конфигурирования ПАИС Anadigm an231e04. Задача состоит в записи файла конфигурации, полученного в специализированной САПР Anadigm Designer2 в память EEPROM по интерфейсу SPI.

После записи конфигурационных данных интерфейсные шины коммутируются на соответствующие выводы ПАИС an231e04. Микросхема ПАИС формирует необходимые сигналы для чтения данных из ПЗУ и после завершения загрузки данных автоматически активирует аналоговую структуру. Стандартный размер конфигурационных данных для одной микросхемы ПАИС an231e04 – 801 байт. Подходящим объемом памяти 1024 байта обладают микросхемы Microchip 25AA080A или Atmel AT25080. В качестве преобразователя интерфейсов будем использовать отладочную плату Arduino Uno с контроллером Atmega328p. На рисунке 1 приведена схема соединения платы Arduino Uno к памяти 25AA080A. Управлять режимом записи будет компьютер (Labview) к которому подсоединена плата Arduino Uno через USB интерфейс.

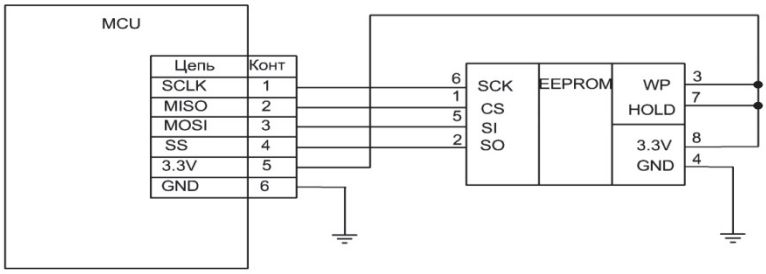


Рис. 1. Схема соединения памяти 25AA080A с arduino uno по SPI интерфейсу

Для реализации записи данных потребуются SPI-команды управления внешней EEPROM памятью. Такие как: WREN (06h) – снятие защиты от записи, WRITE (02h) – запись, READ (03h) – чтение, RDSR (05) – чтение статуса, WRDI (04) - установка защиты от записи, WRSR (01h) - запись статуса.

Основная часть

Протокол обмена данными между контроллером и памятью по SPI интерфейсу реализуется программно. Блок диаграмма программы, реализованная в графической среде программирования Labview, приведена на рисунке 2. Обращение к памяти делится на так называемые фреймы - окна, которые начинаются установкой низкого уровня напряжения линии SS шины SPI, а заканчиваются подачей высокого уровня напряжения на эту линию. Внутри фрейма содержится сама команда вместе с сопровождающими её данными, которые специфичны для каждой команды. Каждая операция с памятью может состоять из нескольких фреймов. Например, команда записи данных в память состоит из двух фреймов: снятие защиты от записи и сама запись. Фрейм снятия защиты от записи состоит из одной команды WREN. В ответ на команду приходит байт 80h. Фрейм записи, в режиме записи одного байта, состоит из команды записи WRITE, двухбайтного адреса и самого записываемого байта. В случае же 16-ти байтной записи: WRITE, двухбайтный адрес, 16 записываемых байт. В ответ получаем байты FFh. Примечательно, что для SPI EEPROM памяти запись одного и шестнадцати байт происходит за одно и то же время.

Структура фрейма выглядит следующим образом:

Листинг 1 – Комманда WRITE

		SS inactive	начальное «поднятие» линии SS
		SS active	
		80	фрейм WREN
		06	
		SS inactive	
SS active		**SS active**	
FF FF FF FF		FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF	
02 00 00 1B	**либо**	02 00 00 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F	первый и др. фреймы WRITE
SS inactive		**SS inactive**	

Рассмотрим, как проходит чтение памяти. Команда чтения состоит из одного фрейма:

Листинг 2 –Команда READ

```
SS inactive    начальное «поднятие» линии SS
SS active
80 FF FF 05    первый и другие фреймы READ
03 00 00 FF
SS inactive
```

Из структуры фрейма видно: команда WRITE, двухбайтный адрес, обменный байт FF, в ответ на который приходит число 05h – содержимое байта памяти по адресу 0000h. Команда чтения, в отличие от записи, представлена только в байтовом варианте, потому, что она выполняется быстрее команды записи в тысячу раз.

О команде RDSR можно сказать, что она состоит из самой команды и обменного байта. По ответу на эту команду можно судить об установленных защитах от записи на каждый из четырёх блоков памяти, а также узнать состояние микросхемы памяти.

Листинг 3 – Команда RDSR

```
SS inactive    начальное «поднятие» линии SS
SS active
FF 40          фрейм RDSR
05 FF
SS inactive
```

Комманда WRDI(04) – это установка защёлки от записи.

Листинг 4 – Команда WRDI

```
SS inactive    начальное «поднятие» линии SS
SS active
80             фрейм WRDI
04
SS inactive
```

Команда WRSR(01h) служит для записи в неизменяемые биты регистра статуса. В основном она применяется для защиты от записи одного из четырёх блоков памяти через однобитные регистры BP0 и BP1. Запись в бит WPEN регистра статуса инвертирует состояние ножки WP, защищая всю микросхему памяти от записи аппаратно. Команда WRSR(01h) применяется в двухбайтном фрейме.

Листинг 5 - WRSR

```
SS inactive    начальное «поднятие» линии SS
SS active
FF FF          фрейм WRSR
01 40
SS inactive
```

Для работы с памятью с помощью среды LabView необходимо знать, что порядок передачи данных в память и обратно осуществляется старшим байтом вперёд (MSB), тактирование памяти для гарантированной устойчивой работы на любых напряжениях не должно превышать 3МГц. Обработка каждой команды начинается по заднему фронту тактового импульса и по низкому уровню.

Также необходимо записать загрузчик LINX - LabVIEW MakerHub в начальную область памяти команд Arduino, чтобы он мог взаимодействовать с Labview. Программа однобайтной записи (рисунок 2) состоит из блоков Linx (MakerHub): открытие UART, открытие SPI интерфейса, снятие защиты от записи, пересылка содержимого фреймов в цикле, закрытие SPI, закрытие UART. Данные для записи загружаются из текстового файла конфигурации, сгенерированного САПР «Anadigm designer2». В программе также предусмотрен сигнал коммутации четырех линий порта SPI памяти с контроллера на ПАИС an231e04 аналоговым счетверённым мультиплексором ISL43240IAZ.

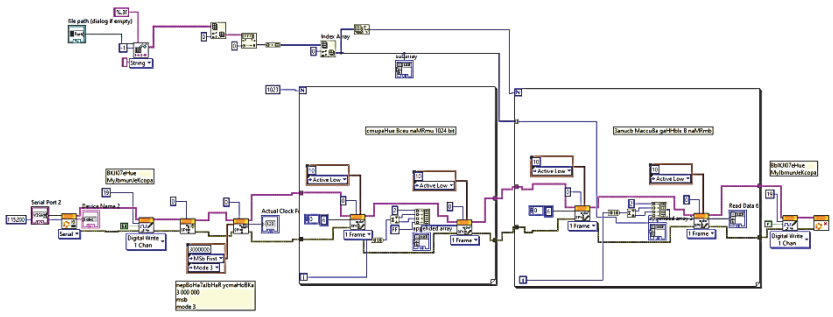


Рис. 2. Блок диаграмма программы обмена данными с SPI EEPROM 25AA080A

Рассмотрим процесс чтения памяти через Labview - Linx (MakerHub). В этом режиме также открываются UART, SPI. В цикле четырёхбайтовыми фреймами считывается байт за байтом по прирастающим адресам, полученные данные накапливаются в массиве. По окончании работы этот массив сохраняется в текстовый файл, который можно сравнить с исходным текстовым файлом конфигурации для верификации.

Также была предусмотрена функция полного стирания памяти. Подход тут похож на процесс записи, но только в цикле пишутся байты FFh, так как у этого типа памяти пустые байты обозначаются десятичным числом 256.

Заключение

Запись SPI EEPROM памяти конфигурационными данными через программу LabView–Linx (MakerHub) – это самый доступный и быстрый метод конфигурирования ПАИС an231e04. Не требуется навыка программирования на языке Си, программатора SPI EEPROM. В связке с аналоговым мультиплексором ISL43240IAZ можно программировать ПАИС прямо в процессе работы, изменяя её функции на ходу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Microchip technology: 25AA080A/B, 25LC080A/B 8K SPI BUS Serial EEPROM Руководство / Коллектив авторов – Чендлер, Аризона: « Microchip technology », 2003– 25 с.
2. Anadigm: AnadigmDesigner2 User Manual. Руководство / Коллектив авторов – Купертино, Калифорния: « Anadigm », 2004– 85 с.

УДК 621.3

Кукин Дмитрий Викторович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kukin Dmitriy Viktorovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Aleksei Valerevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor ”Department of Industrial Electronics and Innovative Technologies”, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ
DEVELOPMENT OF A CLIMATIC CONTROL SYSTEM FOR AN INDUSTRIAL BUILDING

Аннотация. Данная работа посвящена разработке системы управления климатической установкой для производственного помещения. Предложенная схема обеспечивает контроль влажности, температуры, уровня CO_2 в воздухе, и управление кондиционерами, осушителями, вентиляторами, калориферами, термостатами. Результатом работы является проект экономически эффективной системы, позволяющей автоматически поддерживать оптимальные условия труда, что способствует повышению производительности и снижению энергозатрат предприятия.

Abstract. This work is devoted to the development of a climate control system for a production facility. The proposed scheme provides control of humidity, temperature, CO2 levels in the air, and control of air conditioners, dehumidifiers, fans, and heaters. The result of the work is a cost-effective system that automatically maintains optimal working conditions, which helps to increase productivity and reduce energy costs at the enterprise.
Ключевые слова: электрическая схема, система управления, климатическая установка, микроклимат, микроконтроллер.
Key words: electrical diagram, control system, climate control unit, microclimate, microcontroller.

Введение

Современное производство предъявляет высокие требования к параметрам микроклимата производственных помещений. Отклонение температуры, влажности и чистоты воздуха от заданных значений может привести не только к дискомфорту персонала и снижению производительности труда, что нарушает требования СанПиН 1.2.3685-21, но и к нарушению технологических процессов, браку продукции и выходу из строя дорогостоящего оборудования.

Целью данной работы является разработка системы управления климатической установкой, которая обеспечит автоматическое поддержание заданных параметров воздуха в производственном цехе. Разработка ведется с учетом требований действующих строительных норм и правил (СНиП), государственных стандартов (ГОСТ) и санитарных правил (СП), регламентирующих параметры микроклимата, вентиляцию и кондиционирование на промышленных объектах.

Анализ аналогов проектируемого устройства

Анализ типовых решений систем управления климатическими установками выявил следующие недостатки:

1. Локальное регулирование: Использование отдельных комнатных термостатов, управляющих только нагревом (отопительными приборами), без увязки с работой приточной вентиляции. Это приводит к перегреву помещения в переходные периоды года.
2. Ручное управление вентиляцией: Включение и отключение приточных и вытяжных вентиляторов производится обслуживающим персоналом вручную, что не позволяет оперативно реагировать на изменение загазованности (например, утром, перед началом смены, вентиляция может быть выключена).
3. Отсутствие обратной связи по влажности: Большинство устаревших систем не имеют датчиков влажности и, соответственно, не управляют процессами увлажнения или осушения, что критично для помещений с требованиями к влажности (например, склады или электронные производства).
4. Энергонеэффективность: Работа оборудования на полную мощность даже при частичной загрузке цеха или в ночное время ведет к колоссальному перерасходу тепловой и электрической энергии, что противоречит требованиям Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении».

Таким образом, существующие подходы не позволяют в полной мере реализовать требования СП 60.13330.2020 в части автоматического регулирования и обеспечения заданных параметров. Это обуславливает необходимость разработки современной интегрированной системы управления на базе программируемого контроллера.

Схема разработанного устройства

Функциональная схема (рис. 1) [1, 2] содержит следующие модули: датчики содержания CO_2 в воздухе (B3) и влажности (B2), 4 датчика температуры (BK1), систему управления – микроконтроллер (U1), дисплейный модуль (H1), 4 реле дифференциального давления и 4 дискретных датчика положения воздушных заслонок (S1). Объекты управления: электродвигатель циркуляционного насоса, 2 электропривода воздушных задвижек, преобразователи частоты приточного и вытяжного вентиляторов, трёхходовой кран водяного калорифера; кондиционер, увлажнитель.

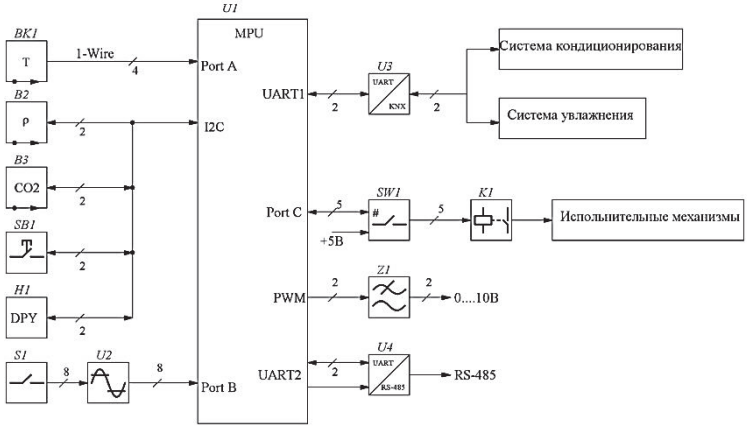


Рис. 1. Функциональная схема

Система содержит 4 датчика температуры для измерения температуры уличного воздуха, воздуха в приточном канале, прямого и обратного трубопроводов калорифера. Датчики температуры содержат аналоговую схему измерения температуры, аналого-цифровой преобразователь и цифровой интерфейс «1-Wire». Датчики подключаются к порту ввода «PA» микроконтроллера U1.

Датчики влажности B2 и углекислого газа B3 установлены непосредственно в помещении и используются для измерения влажности воздуха и концентрации углекислого газа. Датчики подключаются к микроконтроллеру по шине I2C.

Пульт управления содержит клавиатуру SB1 и дисплейный модуль H1, которые подключаются к микроконтроллеру также по шине I2C.

Состояние реле дифференциального давления на воздушном фильтре, на вентиляторах приточной и вытяжной систем, на циркуляционном насосе, а также состояние концевых датчиков положения воздушных заслонок (S1) контролируется следующим образом. Выходные напряжения указанных датчиков (+24 В) преобразуются в напряжение +5 В с помощью аттенюаторов U2 и подаются на порт PB микроконтроллера. Аттенюатор также защищает порты микроконтроллера от повышенного и пониженного напряжений.

Для включения и отключения преобразователями частоты используется дискретный сигнал +24 В, для установки скорости вращения используется аналоговый сигнал 0 – 10 В. Для формирования дискретного сигнала используется электромагнитное реле K1, которое управляется микроконтроллером через транзисторный ключ SW1. Аналоговый сигнал формируется с помощью цифро-аналогового преобразователя с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). При этом используется ШИМ микроконтроллера и активный фильтр нижних частот Z1. Фильтр кроме сглаживания сигнала ШИМ усиливает его до 10 В.

Аналогично формируется сигнал управления электроприводом трёхходового крана.

Для подключения к системе кондиционирования и увлажнения воздуха используется преобразователь интерфейсов U3.

Для подключения к внешней системе управления по шине RS-485 используется соответствующий преобразователь U4.

Заключение

Разработанная система контролирует следующие параметры: влажность, температуру, содержание CO_2 в воздухе и управляет следующими исполнительными механизмами: кондиционерами, осушителями, вентиляторами, калориферами, термостатами.

Система позволяет автоматизировать процесс управления микроклиматом, снизить затраты на энергоресурсы и создать комфортные и безопасные условия труда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: Минстрой России, 2020.

2. Бондарь, Е. С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е. С. Бондарь. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2018. – 512 с.

УДК 621.3
Кустов Владимир Евгеньевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kustov Vladimir Evgenevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Aleksey Valerevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics and Innovative Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НИВЕЛИРОВКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА
DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC LEVELING SYSTEM FOR AIRCRAFT

Аннотация. В статье представлены результаты разработки схемы стенда автоматической нивелировки воздушного судна. Схема управляет тремя гидравлическими подъёмниками, получает сигналы обратной связи от трёх оптических систем нивелирования по реперным точкам. Схема позволяет в автоматическом режиме выставлять корпус воздушного судна в линию полёта. Предложенное техническое решение позволит сократить время обслуживания, исключить человеческий фактор и повысить точность измерений, что особенно критично при производстве и ремонте новейших типов авиационной техники.
Abstract. The article presents the results of the development of a scheme for the automatic leveling of an aircraft. The scheme controls three hydraulic lifts and receives feedback signals from three optical leveling systems based on reference points. The scheme allows the aircraft's body to be automatically aligned with the flight path. This technical solution reduces maintenance time, eliminates human error, and improves measurement accuracy, which is crucial for the production and repair of advanced aviation technologies.
Ключевые слова: воздушное судно, нивелировка, автоматизация, система управления, микроконтроллер, авиационное оборудование.
Key words: aircraft, leveling, automation, control system, microcontroller, aviation equipment.

Введение

В современной авиации точность геометрических параметров воздушного судна (ВС) напрямую влияет на безопасность полетов, аэродинамические характеристики и расход топлива. Нивелировка — процесс выставления самолета в плоскость горизонта — традиционно является трудоемкой операцией, требующей высокой квалификации персонала и использования сложного оборудования. Автоматизация этого процесса с применением современных систем управления позволит сократить время обслуживания, исключить человеческий фактор и повысить точность измерений, что особенно критично при производстве и ремонте новейших типов авиационной техники.

В большинстве случаев нивелировка — завершающий технологический процесс сборки изделия, является контрольной операцией. С повышением требований к точности, в некоторых случаях, нивелировочные параметры, невозможно обеспечить только за счет точности изготовления сборочных единиц изделия. Возникает необходимость обрабатывать посадочные места на предварительно отнивелированных сборочных единицах. В этих случаях нивелировка из контрольной операции превращается в сборочную [1].

В условиях роста интенсивности авиаперевозок и необходимости сокращения времени простоя ВС на земле, разработка автоматизированных систем управления процессом нивелировки становится приоритетной задачей для авиастроительной и ремонтной отраслей. Внедрение микропроцессорного управления и прецизионных датчиков позволит перевести процесс контроля геометрии в класс высокотехнологичных автоматизированных операций.

Существующие системы нивелировки ВС

Самолет размещают в закрытом ангаре на ровной площадке, чтобы исключить влияние ветра и вибраций. Воздушное судно поднимается на гидроподъемниках. В реперные

точки упирается мерная рейка, при помощи нивелира и регулировкой подъемного механизма добиваются того, чтобы контрольные точки находились в одной плоскости [2].

Традиционные методы нивелировки, основанные на использовании нивелиров и мерных реек, обладают рядом существенных недостатков: высокой трудоемкостью, длительным временем подготовки, а также значительной зависимостью результатов от квалификации специалиста. Поэтому разработка системы автоматической нивелировки представляется актуальной задачей, решению которой посвящена статья.

Электрическая схема системы управления

На рис. 1 представлена разработанная функциональная схема системы управления устройством автоматической нивелировки.

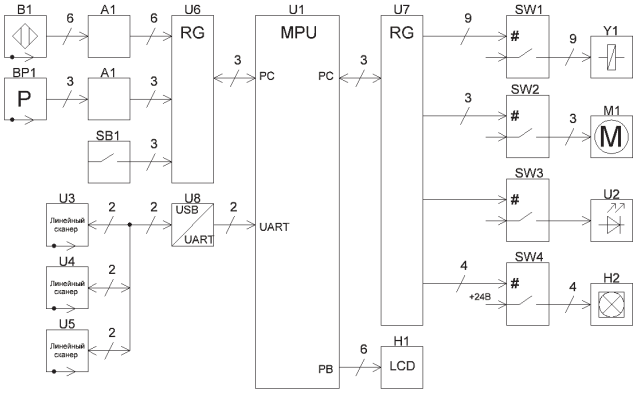


Рис. 1. Функциональная схема системы управления

Система работает следующим образом. При нажатии кнопки запуска на клавиатуре SB1 микроконтроллер U1 через коммутатор SW3 включает круговой лазерный излучатель системы нивелировки U2, а также запускает гидростанции гидроподъёмников M1 через коммутатор SW2. Далее устанавливается высокая скорость перемещения подъёмника сигналом соленоида Y1 через коммутатор SW1. После чего соленоиды гидроподъёмника Y1 переводятся в положение «движение вверх». После этого происходит анализ сигналов с линейных сканеров U3, U4, U5, которые преобразуются в интерфейс UART с помощью преобразователя U8. Когда сканеры зафиксируют луч лазерного излучателя микроконтроллер переводит подъёмники в режим медленного перемещения с помощью соленоидов Y1. При совмещении лазерного луча с заданной точкой на сканере процесс перемещения данного подъёмника останавливается с помощью соленоида Y1. После установки всех трёх реперных точек процесс нивелировки завершается, гидроприводы останавливаются, на световой колонне включается светозвуковой оповещатель H2 через коммутатор SW4.

Для исключения аварийных ситуаций система содержит 6 ограничительных датчиков положения штока цилиндра B1. Для преобразования выходных сигналов датчиков +24 В во входные сигнал микроконтроллера +5 В применяются аттенюаторы A1. Для защиты системы от перегрузки используется реле аварийного давления BP1, подключенных к микроконтроллеру через аттенюатор A2.

Для расширения количества портов ввода и выводы микроконтроллера используются регистры сдвига U6, U7.

Для управления системой и получения данных о режиме её работы предусмотрены клавиатура SB1 и дисплейный модуль H1.

Заключение

На текущий момент на рынке существуют высокоточные лазерные трекеры и системы оптического сканирования. Однако их внедрение ограничивается чрезвычайно высокой стоимостью и сложностью интеграции в существующие системы гидроподъемников. Существует явное техническое противоречие между необходимостью обеспечения высокой точности и требованием к мобильности и дешевизне оборудования для рядовых ангаров. Предложенное решение направлено на разрешение этого противоречия путем создания специализированно-

го управляющего устройства, объединяющего доступную сенсорную базу и интеллектуальные алгоритмы обработки сигналов.

Результаты работы могут быть внедрены на предприятиях гражданской и экспериментальной авиации. Разработанное устройство управления позволит сформировать технологический паспорт, который может быть мгновенно передан в информационную систему авиапредприятия для контроля динамики изменений геометрии борта и работ, требующих высокой точности при установке агрегатов, устройств и датчиков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гусева, Р. И. Технология сборки самолета : учебное пособие / Р. И. Гусева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. - 180 с. - ISBN 978-5-9729-1785-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2170904 (дата обращения: 27.03.2026). – Режим доступа: по подписке.

2. Корогодова, И. В. Производство, техническая диагностика и ремонт самолета. Часть 1 «Основные технологические процессы производства» : учебное пособие / И. В. Корогодова ; Южный федеральный университет. - Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2023. - 119 с. - ISBN 978-5-9275-4311-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2135837 (дата обращения: 27.03.2026). – Режим доступа: по подписке.

3. Овчинников, В. В. Производство деталей летательных аппаратов : учебник / В.В. Овчинников. — Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2026. — 367 с. — (Среднее профессиональное образование). - ISBN 978-5-8199-0817-4. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2222394 (дата обращения: 27.03.2026). – Режим доступа: по подписке.

УДК 681.5

Кучерова Алина Игоревна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kucherova Alina Igorevna, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОКРАШИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS COLORING AVIATION PRODUCTS

Аннотация. В работе рассматривается алгоритм автоматизации технологического процесса окрашивания изделий авиационного назначения за счёт внедрения алгоритмов и моделей локальных систем управления. Исследуется модель на основе дискретно-событийного подхода, обеспечивающая мониторинг процесса, учет ресурсов и интеграцию отдельных операций. Разработан алгоритм автоматической коррекции управляющих программ робота с использованием системы технического зрения, позволяющий учитывать положение изделия, проверять достижимость траекторий, ограничения по осям и наличие коллизий. Реализация предложенных решений снижает влияние человеческого фактора и повышает эффективность и производительность роботизированного комплекса.

Abstract. The paper considers an algorithm for automating the technological process of dyeing aviation products through the introduction of algorithms and models of local control systems. A model based on a discrete-event approach is being investigated, providing process monitoring, resource accounting, and integration of individual operations. An algorithm for automatic correction of the robot's control programs using a vision system has been developed, which allows taking into account the position of the product, checking the achievability of trajectories, axis constraints and the presence of collisions. The implementation of the proposed solutions reduces the influence of the human factor and increases the efficiency and productivity of the robotic complex.

Ключевые слова: автоматизация, промышленное производство, роботизированный технологический комплекс, авиационная промышленность, системы управления.

Key words: automation, industrial production, robotic technology complex, aviation industry, control systems.

Введение

Одним из ключевых направлений развития современного производства является автоматизация, том числе и робототехника [1]. Нехватка квалифицированных кадров, отсутствие отечественного ПО, и нерациональное распределение ресурсов [2, 3] ведет к плохой интеграции роботизированных систем в технологические процессы (ТП). Проводить мониторинг ТП, прогноз выпуска изделий, отслеживать объем ресурсов, все это осуществляется отдельными процессами. Таким образом, предлагается модель, работающая на базе алгоритмов, которая позволит отслеживать движение ТП, также позволит прогнозировать результаты оптимизации, и, будет инструментом доказательства эффективности оптимизации производства.

Таким образом целью данной работы является автоматизация ТП окрашивания изделий авиационного назначения.

Отсюда следуют задачи:

1) Исследовать ТП.

2) Исследовать дискретно-событийную модель (ДСМ).

3) Разработать модель локальной системы управления.

4) Разработать алгоритм автоматической коррекции управляющих программ (УП).

5) Представить алгоритм автоматизации ТП окрашивания изделий авиационного назначения.

Подробно описанный ранее ТП [4], заключается в подготовке изделий к покраске (это монтаж на оснастку, изоляция, обезжиривание), покраска и сушка изделий, контроль качества покрытия, демонтаж и выпуск изделий из цеха.

Проблема ТП заключается в неэффективных технологических операциях (ТО), в данном случае – это ручное позиционирование изделий в пространстве, что усложняет ТО и увеличивает время настройки УП. Предлагается автоматизировать процесс локализации изделий в рабочей зоне и автоматизировать синтез УП, а именно – внедрить систему технического зрения, которая будет считывать положение изделия в пространстве и на основе алгоритма предлагать коррекцию УП или варианты позиционирования изделия.

Принцип автоматизации данного ТП состоит в локальной автоматизации отдельных ТО. Тем самым в работе предлагается модель локальной системы управления, которая на основе алгоритма управления будет осуществлять автоматизированную коррекцию УП для робота.

Распознавание детали в зоне покраски осуществлено с помощью, стационарно установленной RGB-D камеры. Детекция ключевых точек детали для формирования локальной базы осуществляется с помощью ArUco маркеров, устанавливаемых по крайним точкам детали.

Результатом детекции являются координаты ключевых точек детали в системе координат камеры. Для разработки имитационной модели локальной системы управления была построена кинематическая схема роботов ABB IRB5500-12 (рис. 1).

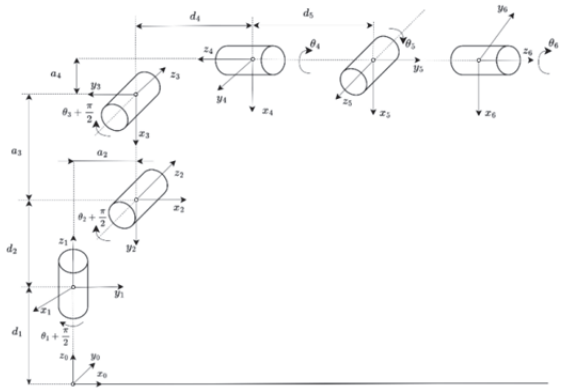


Рис. 1. Кинематическая схема робота ABBIRB5500-12

В соответствии с кинематической схемой – были составлены параметры Денавита-Хартенберга представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры Денавита-Хартенберга

Звено	a	α	d	θ
1	0	0	d_1	$\theta_1+\frac{\pi}{2}$
2	a_2	$\frac{\pi}{2}$	d_2	$\theta_2+\frac{\pi}{2}$
3	a_3	0	0	$\theta_3+\frac{\pi}{2}$
4	a_4	$-\frac{\pi}{2}$	d_4	θ_4
5	0	$\frac{\pi}{2}$	d_5	θ_5
6	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_6

На основе параметров Денавита-Хартенберга была разработана имитационная кинематическая модель (рис. 2).

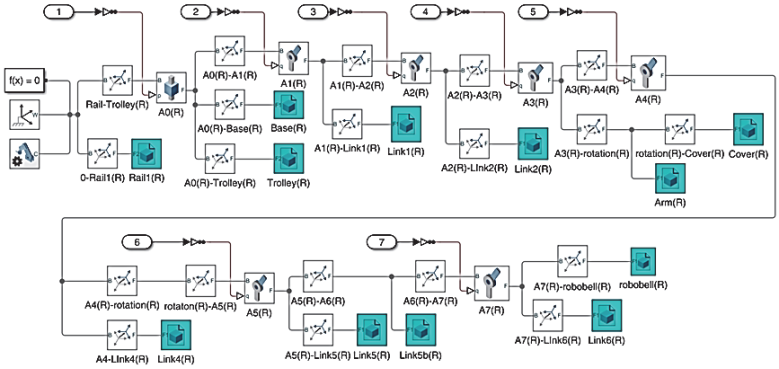


Рис. 2. Кинематическая модель робота ABBIRB5500-12

Проверка новой (скорректированной) УП на наличие коллизий осуществляется оператором на основе имитационной модели. Таким образом, перед запуском УП промышленных роботов на исполнение оператор визуально оценивает корректность форм траекторий перемещения манипуляторов, а также их плавность.

Управление ТП в системе управления на базе ДСМ осуществляется с помощью алгоритмов. Одним из вариантов модернизации ТП – автоматизация коррекции УП для роботов. Это решение осуществляется с помощью формирования алгоритма, который позволит на основе технического зрения корректировать УП.

Работа алгоритма заключается в следующем: в систему загружается файл с УП, где происходит инициализация координат локальной базы детали, рассчитывается координаты точек перемещения в глобальной системе координат робота, далее происходит первая проверка (входят ли точки в зону покраски), если нет, то происходит позиционирование детали, если да, то наступает вторая проверка (превышают ли угловые ограничения по осям робота), после проводится заключительная (третья) проверка, на коллизии. На каждом этапе проверки, если результаты не отвечают требованиям, то УП корректируется, если все в порядке (также после коррекции УП) УП передается в систему управления роботом.

Преимущество этого алгоритма заключается в том, что минимизируется участие человека в задаче коррекции УП, таким образом сокращается и время работы дискретной подсистемы.

Предложенная модель локальной системы управления предлагается интегрировать в дискретно-событийную модель технологического процесса, которая позволит проводить:

- идентификацию входных параметров ТП (количество изделий, их типоразмеры, количество ресурсов, время ТО)

- мониторинг как отдельных операций, так и всего процесса (количество использованных ресурсов, их остаток, количество времени на отдельные операции, количество выпущенных изделий и т.д.)

- интегрировать между собой отдельные локальные системы управления, отвечающие за автоматизацию отдельных ТО.

При активации дискретных систем, срабатывает функция вызова модели локальной системы управления, которая автоматизирует программирование роботов.

Заключение

Результаты исследования позволят повысить производительность роботизированного технологического комплекса, тем самым повысят производственную мощность.

Основными результатами исследования являются:

1) Разработан алгоритм автоматической коррекции УП, который нацелен на проверку реализуемости обновленных траекторий перемещения: достижимость точек траекторий и угловых положений осей робота, а также отсутствие коллизий и сингулярностей при перемещении;

2) Разработана модель локальной системы управления роботом, позволяющая отслеживать реализуемость обновленных траекторий перемещения при окрашивании.

Представленные технологические и алгоритмические решения формируют основу для разработки средств модернизации роботизированных ТП высокотехнологичных серийных производств, повышению степени их автоматизации. Применение разработанной технологии позволит существенным образом увеличить производительность операций роботизированной покраски, а также снизит негативное влияние человеческого фактора на качество окрашиваемых изделий.

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР по Государственному заданию на 2024-2026 годы (0750110472 S724600) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в целях выполнения НИР по созданию молодежных лабораторий в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты». Лаборатория «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бараков, В. С. Цифровая трансформация промышленных предприятий и экономический рост / В. С. Бараков // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 90-103. – DOI 10.15688/ek.jvolsu.2023.4.8.

2. Кузнецова, Е. Ю. Проблемы, вызовы и задачи цифровизации производственных предприятий / Е. Ю. Кузнецова, А. А. Русинова // Epomen. Global. – 2023. – № S34. – С. 248-259.

3. Денискина, А. Р. Переход от традиционной системы стандартизациик SMART-стандартам: вызовы и возможности для России / А. Р. Денискина, А. Г. Апостолов, П. Д. Мурашева // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6(87). – С. 39-42.

4. Горькавый, М. А. Дискретно-событийная модель автоматизированного технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на крупногабаритные детали сборочных единиц / М. А. Горькавый, А. И. Кучерова, А. И. Горькавый // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4-3(70). – С. 99-109. – DOI 10.37220/MIT.2025.70.4.012.

УДК 62-523.8
Лакеев Илья Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Lakeev Ilya Yurevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Стельмащук Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Stelmashchuk Sergei Valerevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Electric drive and automation of industrial Department, Komsomolsk-na-Amure State University

КАСКАДНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МОМЕНТА УПРУГОСТИ
CASCADE ELASTIC MOMENT OBSERVER

Аннотация. В данной работе предложена методика построения каскадного наблюдателя, который по сигналам с датчиков скорости двухмассовой упругой механической системы позволяет идентифицировать коэффициент упругости и упругий момент в виде непрерывного сигнала. Актуальность в оценке момента упругости в системе электропривода обусловлена наличием широкого ряда производственных механизмов, обладающих упругими свойствами. Использование обратной связи по упругому моменту позволяет проектировать систему управления, позволяющую демпфировать упругие колебания и улучшать динамику электропривода.
Abstract. In this paper, we propose a method for constructing a cascade observer, which, based on signals from velocity sensors of a two-mass elastic mechanical system, allows us to identify the coefficient of elasticity and the elastic moment in the form of a continuous signal. The relevance in assessing the moment of elasticity in an electric drive system is due to the presence of a wide range of production mechanisms with elastic properties. The use of elastic moment feedback makes it possible to design a control system that allows damping elastic vibrations and improving the dynamics of the electric drive.
Ключевые слова: идентификация, векторно-матричное описание, адаптивность, моделирование, система управления.
Key words: identification, vector-matrix specification, adaptivity, modeling, control system.

Введение

В построении систем электропривода с упругим рабочим органом главной сложностью является измерение упругого момента возникающего в упругих связях между звеньями механической части электропривода [1]. Сложность его измерения заключается в том, что вал непрерывно вращается, в отсутствии унифицированных и серийно выпускаемых датчиков контроля момента, существующие датчики являются дорогостоящими и ненадёжными приборами. Поэтому в данной работе предложена методика построения каскадного наблюдателя, который по сигналам с датчиков скорости первой и второй массы позволяет идентифицировать коэффициент упругости и упругий момент, возникающий в упругих звеньях механизма.

Постановка задачи

На рис. 1 представлена упругая двухмассовая механическая часть привода, где приняты следующие обозначения [2]: ω_1, ω_2 – угловая скорость первой и второй массы; C_{12} – коэффициент крутильной жёсткости; J_1, J_2 – моменты инерции первой и второй массы; $M_{\text{у}}$ – упругий момент; M_1 – электромагнитный момент двигателя.

Решение задачи

Построим предварительный наблюдатель упругого момента, объект наблюдения которого обведен на рис. 1 пунктирной рамкой. Здесь наблюдаемыми величинами являются скорости первой ω_1 и второй массы ω_2, а ненаблюдаемыми величинами момента упругости $M_{\text{у}}$ и статический момент на второй массе $M_{\text{с2}}$.

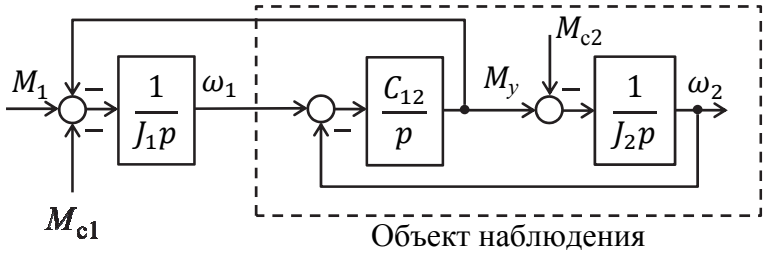


Рис. 1. Структурная схема механической части электропривода

Векторно-матричное описание наблюдателя [3]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = -\dfrac{l_1}{J_2}\hat{M}_y + \dfrac{l_1}{J_2}\hat{M}_{c2} - C_{12}\omega_2 + C_{12}\omega_1; \\ \dot{\hat{z}}_2 = -\dfrac{l_2}{J_2}\hat{M}_y + \dfrac{l_2}{J_2}\hat{M}_{c2}, \end{cases}$$

где $\hat{z}_1$, $\hat{z}_2$ – переменные состояния каналов предварительной оценки момента упругости и статического момента второй массы:

$$\begin{cases} \hat{M}_y = \hat{z}_1 - l_1\omega_2; \\ \hat{M}_{c2} = \hat{z}_2 - l_2\omega_2. \end{cases}$$

Коэффициенты наблюдателя l_1 и l_2 определяются по стандартной настройке:

$$p^2 + \frac{l_1 - l_2}{J_2}p = p\left(p + \omega_0\right).$$

Примем $l_1 = J_2$, тогда $l_2 = J_2\left(1 - \omega_0\right)$, где ω_0 – среднегеометрический корень, определяющий быстродействие предварительного наблюдателя момента упругости. На рис. 2 представлена его структурная схема.

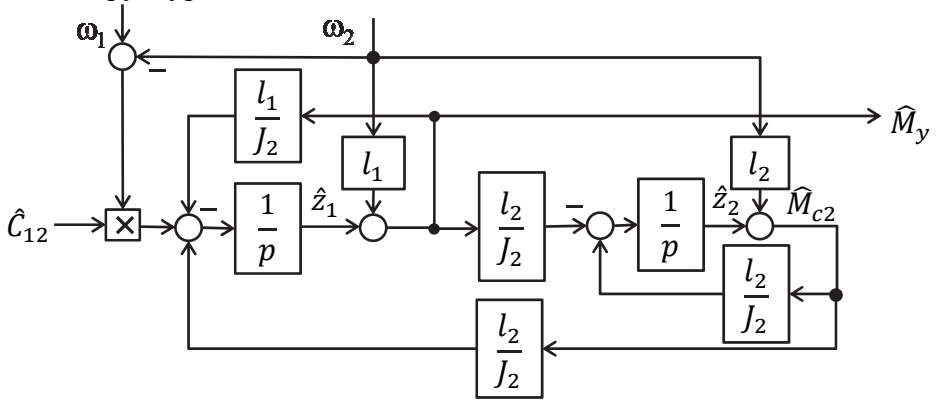


Рис. 2. Структурная схема предварительного наблюдателя момента упругости

Наблюдатель требует наличия неизвестного коэффициента упругости C_{12}. Для решения этой проблемы строится адаптивный наблюдатель коэффициент упругости C_{12}, структурная схема которого приведена на рис. 3.

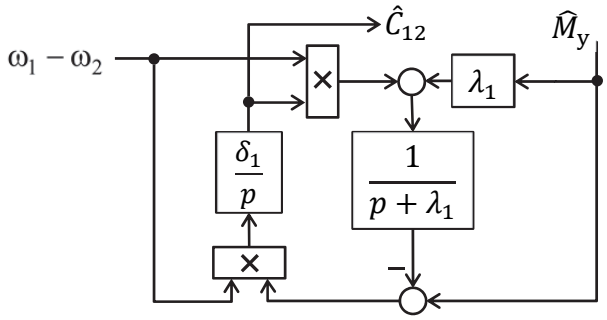
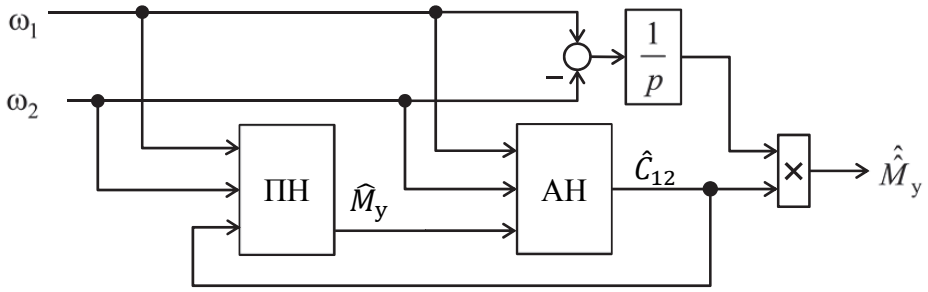


Рис. 3. Структурная схема адаптивного наблюдателя коэффициента упругости

Коэффициенты наблюдателя δ_1 и λ_1 задаются эмпирически. Они влияют на быстродействие и устойчивость адаптивного наблюдателя, на интеграторе установлено начальное значение равное постоянной времени преобразователя частоты.

Имея два наблюдателя, строится каскадный наблюдатель, который выполняет уточнённую оценку момента упругости, согласно уравнению момента упругости:

$$\hat{\hat{M}}_y = \frac{\hat{C}_{12}}{p}(\omega_1 - \omega_2).$$



ПН – предварительный наблюдатель; АН – адаптивный наблюдатель
Рис. 4. Функциональная схема каскадного наблюдателя

Функциональная схема каскадного наблюдателя представлена на рис. 4. Предварительный сигнал оценки момента упругости $\hat{M}_y$ подаётся на вход адаптивного наблюдателя коэффициента упругости, который, в свою очередь, подает сигнал оценки коэффициента упругости $\hat{C}_{12}$ на вход предварительного наблюдателя момента упругости. Таким образом, оба наблюдателя связаны между собой перекрёстной связью сигналами оценок.

Результаты моделирования

На рисунке 5 приведены графики переходных процессов сигналов оценки коэффициента упругости $\hat{C}_{12}$, а также момента упругости M_y (зелёная пунктирная линия) и уточнённой оценки момента упругости $\hat{\hat{M}}_y$ (чёрная сплошная линия).

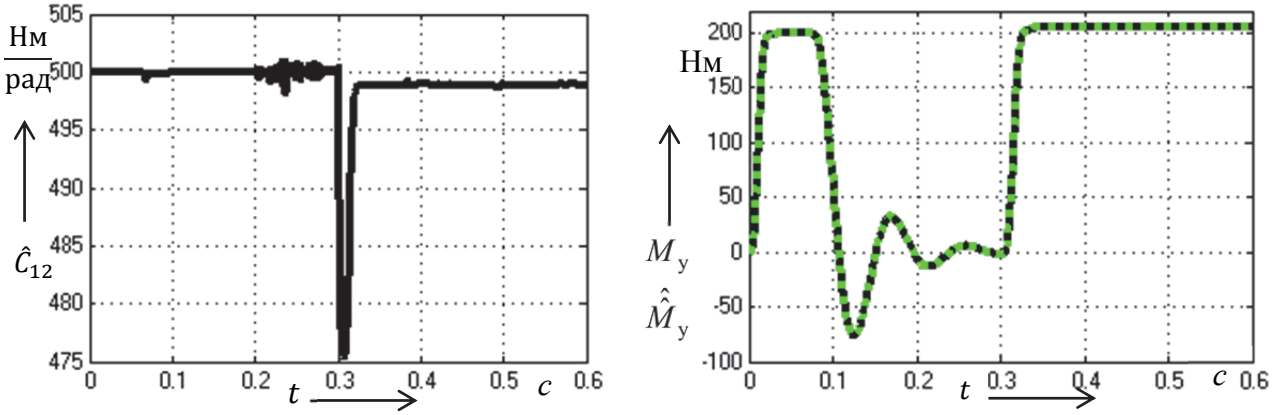


Рис. 5. Графики процессов оценки $\hat{C}_{12}$ (слева) и уточнённой оценки $\hat{\hat{M}}_y$ (справа)

Выполнено моделирование пуска автоматизированного электропривода на холостом ходу с набросом момента нагрузки на вторую массу в момент времени 0,3 сек.

Заключение

Результаты моделирования показали, что полученный сигнал уточнённой оценки момента упругости с высокой степенью точности повторят момент упругости. Моделирование проводилось при различных соотношениях нагрузки на обе массы, а также в аварийных режимах, когда момент нагрузки на вторую массу превышал над допустимым ограничением момента упругости. Во всех режимах работы автоматизированного электропривода с ограничением момента упругости каскадный наблюдатель показал высокую точность оценки момента упругости. Конструкция каскадного наблюдателя выполнена по принципу двухэтапной идентификации момента упругости. Сначала предварительная оценка, которая является грубой с очень высокой погрешностью идентификации. Оказалось, что для оценки коэффициента упругости с высокой точностью достаточно использовать грубый сигнал момента упругости. На рис. 5 видно, что даже при существенных изменениях нагрузки на второй массе, изменение оценки коэффициента упругости составило менее 0,5%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дружинин, В. А. Разработка электромеханической системы с резкопеременной нагрузкой / В. А. Дружинин, Х. Х. Азимов, И. К. Андрианов [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 1(73). – С. 47-58. – EDN EGFZUQ.
2. Стельмащук, С. В. Имитационное моделирование упруго-вязких элементов в механической части электропривода / С. В. Стельмащук, А. И. Пудов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых. В 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 80-82. – EDN VLGJVX.
3. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства: учеб. пособие / Н. Т. Кузовков. – Москва : Машиностроение, 1976. – 184 с.

УДК 621.38

Локтионов Григорий Андреевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Loktionov Grigory Andreevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kopytov Sergey Mihailovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ
DEVELOPMENT AND TESTING OF A DIGITAL FILTER BASED ON A PROGRAMMABLE LOGIC CIRCUITS

Аннотация. Рассмотрен процесс разработки и тестирования цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой на базе ПЛИС компании ALTERA. Коэффициенты фильтра найдены с помощью веб-инструмента TFilter. Проектирование выполнено в среде QUARTUS II с использованием языка описания аппаратных средств Verilog. Предложена конфигурация тестовой системы в составе стенда LESO2.1, DAQ устройства NI USB-6351, модуля ЦАП DAC904 и цифрового осциллографа.

Abstract. This paper examines the development and testing of a digital finite impulse response filter based on an ALTERA FPGA. The filter coefficients were found using the TFilter web tool. The design was completed in the QUARTUS II environment using the Verilog hardware description lan-

guage. A test system configuration is proposed, consisting of a LESO2.1 test bench, an NI USB-6351 DAQ device, a DAC904 DAC module, and a digital oscilloscope.
Ключевые слова: цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой, ПЛИС ALTERA, QUARTUS II, Verilog, стенд LESO2.1, ЦАП DAC904.
Key words: FINRE digital filter, ALTERA FPGA, QUARTUS II, Verilog, LESO2.1 testbed, and DAC904 DAC.

Введение

В настоящее время цифровые фильтры широко используются при обработке сигналов. По сравнению с аналоговыми фильтрами они обладают как неоспоримыми преимуществами, так и определенными недостатками. Их характеристики не изменяются со временем и не имеют разброса, как у аналоговых из-за изменения температуры, старения элементов и разброса их параметров. Также они обладают очень высокой избирательностью и возможностью подстраиваться за счет программирования. К недостаткам цифровых фильтров относят задержку выходного сигнала, ограниченный теоремой Найквиста частотный диапазон, наличие шумов квантования [1].

Реализуют цифровые фильтры на базе микроконтроллеров, цифровых сигнальных процессоров (DSP-процессоров) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В первых двух типах устройств математическая обработка отсчетов сигнала происходит по программе, а в ПЛИС выполняется на аппаратном уровне. Поэтому наиболее быстродействующие фильтры получают с использованием ПЛИС [2, 3].

Целью работы является проектирование цифрового фильтра нижних частот (ФНЧ) с конечной импульсной характеристикой (КИХ) на языке описания аппаратуры Verilog HDL и практическая реализация его на ПЛИС лабораторного стенда LESO2.1.

Основная часть

Выходной сигнал КИХ фильтра (FIR - Finite Impulse Response) зависит только от текущего и предыдущих значений входного сигнала. Отсчеты этого сигнала вычисляются в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 1.

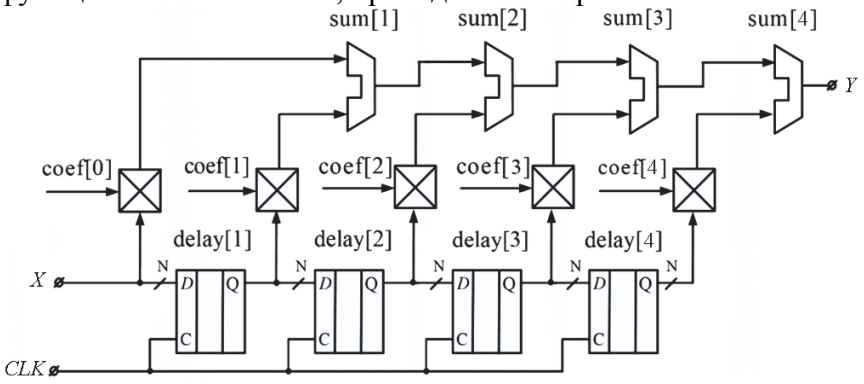


Рис. 1. Функциональная схема КИХ фильтра

По активным фронта, тактирующим импульсов *CLK* отсчеты входного сигнала *X* вдвигаются в сдвиговый регистр на D-триггерах. Текущий входной отсчет и предыдущие задержанные отсчеты с выходов триггеров умножаются на соответствующие коэффициенты coef[i], а затем суммируются. В результате формируется отсчет *Y* выходного отфильтрованного сигнала.

Прежде всего, необходимо определить коэффициенты и их количество для разрабатываемого фильтра. Они будут зависеть от заданных параметров фильтра. Для вычисления коэффициентов КИХ-фильтра удобно использовать бесплатный веб-инструмент TFilter. Пусть необходимо построить цифровой ФНЧ с полосой пропускания 0…800 Гц и неравномерностью меньше 1 дБ, частота дискретизации которого равна 8 кГц. На частотах выше 1600 Гц планируем подавить все частоты более чем на 43 дБ. Разрядность данных выбираем равной 16-ти. Данные вводим на странице сайта, запускаем расчет и получаем результаты (рис. 2).

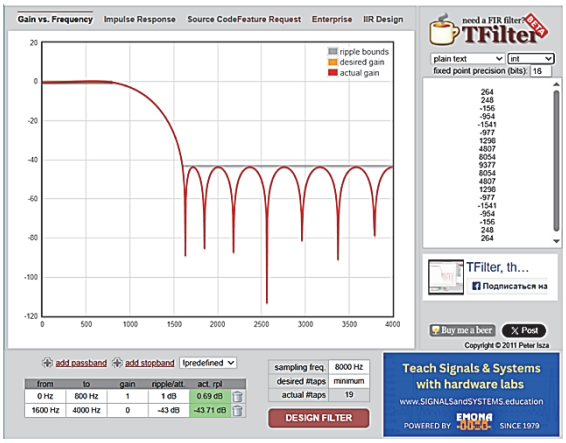


Рис. 2. Окно веб-инструмента TFilter с результатами расчета ФНЧ

В графическом окне появляется АЧХ фильтра, а в правом текстовом окне - рассчитанные коэффициенты. Их количество является длиной фильтра. Список коэффициентов для умножителей: 264, 248, -156, -954, -1541, -977, 1298, 4807, 8054, 9377, 8054, 4807, 1298, -977, -1541, -954, -156, 248, 264.

Далее в среде разработке QUARTUS II 9.1 компании ALTERA создан проект фильтра с именем *kp_puplis* на основе ПЛИС типа EP1C3T144C8 семейства Cyclone, которая установлена в стенде LESO2.1. В качестве файла верхнего уровня удобно использовать графический файл блок-диаграммы *kp_puplis.bdf* (рис. 3). Отдельные модули блок-диаграммы разработаны на языке описания аппаратуры Verilog [4-5].

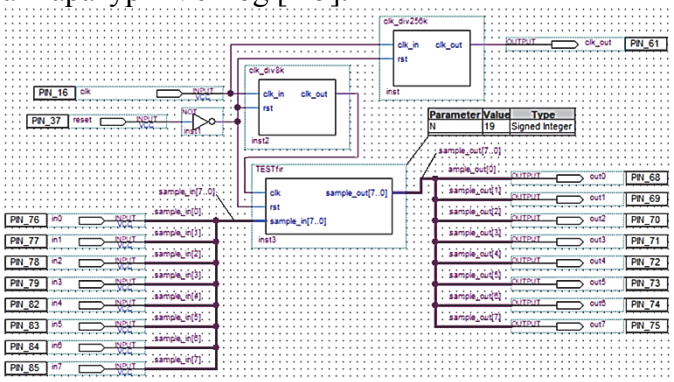


Рис. 3. Блок-диаграмма фильтра (файл верхнего уровня)

В блок-диаграмму входят следующие программные модули: *TESTfir.v*, *clk_div8k.v* и *clk_div256k*. Модуль *TESTfir.v* реализует сам КИХ фильтр, позволяя получать одно выходное значение на каждый такт. Модуль делителя частоты *clk_div8k.v* используется для преобразования тактовой частоты 50 МГ в частоту 8 кГц. Последний модуль *clk_div256k* делит тактовую частоту до значения 256 кГц, которая используется для записи значений в ЦАП. Для проверки функционирования разработанного фильтра предложена следующая конфигурация системы тестирования (рис. 4).

Отсчеты входного сигнала формирует DAQ устройство NI USB-6351, управляемое из среды LabVIEW. Оно имеет как аналоговые, так и цифровые выходы портов. На LabVIEW написана программа свип генератора, которая синхронно выводит аналоговый синусоидальный сигнал для наблюдения на одном из каналов осциллографа и цифровые 8-разрядные отсчеты этого сигнала для подачи на фильтр, загруженный в стенд LESO2.1. Старшие 8-разрядов выходных данных фильтра со стенда заведены на печатный модуль ЦАП, построенный на быстродействующем преобразователе DAC904 с параллельной загрузкой отсчетов. Сигнал с выхода ЦАП также подан на осциллограф. Вид собранной тестовой системы приведен на рис. 5, *а*. На рис. 5, *б* представлена осциллограмма сигнала частотой 1300 Гц до фильтра (верхняя) и после фильтра (нижняя) при одинаковой чувствительности обоих каналов осциллографа.

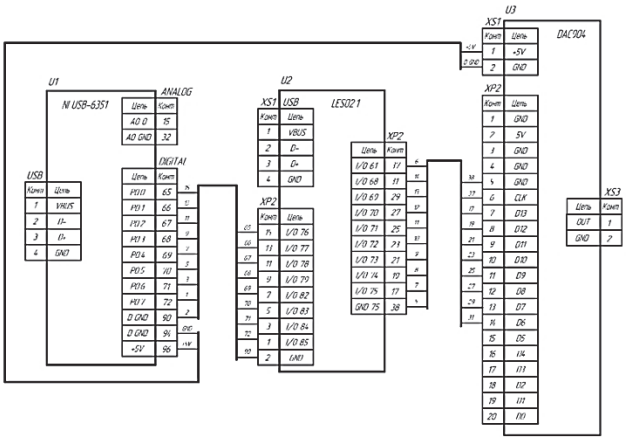
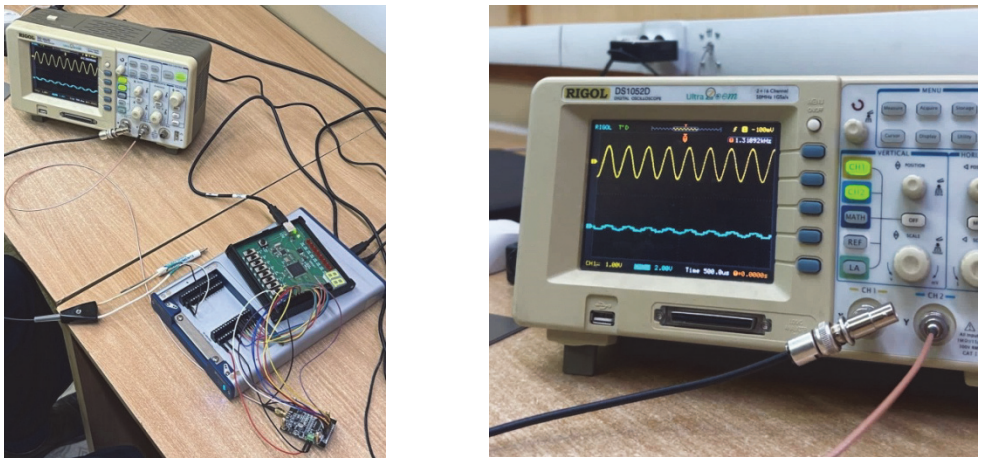


Рис. 4. Конфигурация тестовой системы



а) б)

Рис. 5. Тестовая система в сборе (а) и осциллограммы на частоте 1318 Гц (б)

Тестирование показало, что реальная АЧХ разработанного фильтра соответствует теоретической, приведенной на рис. 1, что подтверждает его работоспособность.

Заключение

Таким образом, рассмотрен полный цикл разработки и тестирования цифрового КИХ фильтра на базе ПЛИС. Важнейшими инструментами разработки стали среда проектирования на ПЛИС QUARTUS II и среда программирования LabVIEW. Макетирование фильтра оказалось возможным благодаря использованию отдельных электронных устройств – стенда LESO2.1, DAQ устройства NI USB-6351, модуля ЦАП DAC904 и цифрового осциллографа. Оперативность и гибкость разработки, эффективность отладки определило применение для проектирования фильтра языка Verilog HDL.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.

2. Строгонов, А. В. Проектирование устройств цифровой обработки сигналов для реализации в базисе программируемых логических интегральных схем: учеб. пособие / А. В. Строгонов. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. – 323 с.

3. Сиротинина, Н. Ю. Программируемые логические интегральные схемы: учеб. пособие / Н. Ю. Сиротинина, О. В. Непомнящий, А. И. Постников, Д. А. Недорезов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. – 224 с.

4. Стешенко, В. Б. Основы HDL Verilog как средства проектирования цифровых устройств: Уч. пос. / В. Б.Стешенко, Т. В. Попова, Д. Б. Малашевич. – М.: МИЭТ, 2006. – 136 с.

5. КИХ фильтр на Verilog. – URL: https://marsohod.org/11-blog/327-fir-verilog (дата обращения: 22.02.2026).

УДК 621.38
Локтионов Григорий Андреевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Loktionov Grigory Andreevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kopytov Sergey Mihailovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

КОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УМНОЖАЮЩИМ ЦАП MAX532 С ИНТЕРФЕЙСОМ SPI С ПОМОЩЬЮ DAQ УСТРОЙСТВА В СРЕДЕ LABVIEW
COMPUTER CONTROL OF A MAX532 MULTIPLYING DAC WITH AN SPI INTERFACE USING A LABVIEW DAQ DEVICE

Аннотация. Управление устройствами с интерфейсом SPI может осуществляться с помощью компьютера при наличии преобразователя интерфейса. Такой преобразователь реализован с помощью параллельного порта DAQ устройства NI USB-6009 в среде LabVIEW. Предложена программа инициализации усилителя с программируемым коэффициентом усиления и ЦАП с биполярным выходом на основе умножающего ЦАП MAX532.
Abstract. Devices with an SPI interface can be controlled by a computer using an interface converter. This converter is implemented using the parallel port of the NI USB-6009 DAQ device in the LabVIEW environment. A program is proposed for initializing a programmable gain amplifier and a bipolar-output DAC based on the MAX532 multiplying DAC.
Ключевые слова: умножающий ЦАП, SPI, LabVIEW, блок-диаграмма, DAQ.
Key words: Multiplying DAC, SPI, LabVIEW, block diagram, DAQ.

Введение

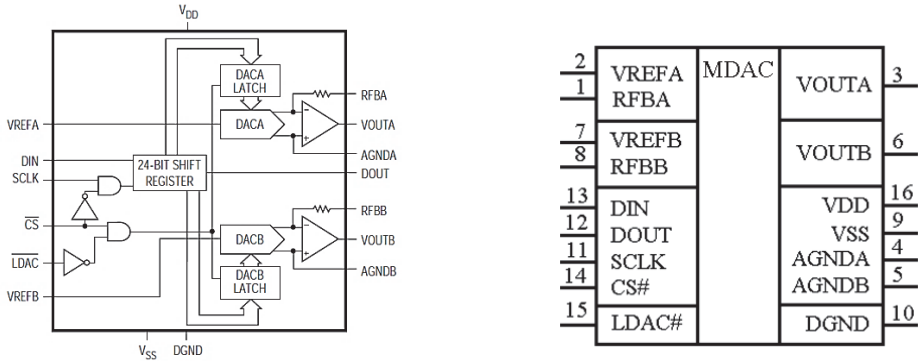
В умножающих цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП) может изменяться амплитуда и полярность опорного напряжения. Поэтому на их основе можно построить такие важные узлы, как усилители с программируемым коэффициентом усиления, программируемые аттенюаторы, ЦАП с биполярным выходным напряжением [1]. Ранее подобные микросхемы выполняли только с параллельным входным интерфейсом, что несколько затрудняло их применение. В настоящее время их также выпускают с последовательными интерфейсами. Например, 8-выводной преобразователь MAX532 имеет два независимых 12-разрядных канала ЦАП и поддерживает последовательный интерфейс SPI [2]. Он содержит встроенные операционные усилители и поэтому имеет выходы по напряжению.

Интерфейс SPI поддерживают практически все микроконтроллеры, и его использование не вызывает проблем. Однако в некоторых случаях микросхемами с интерфейсом SPI требуется управлять с помощью компьютера, в котором такого внешнего интерфейса нет. Решить задачу можно с помощью посредника между компьютером и целевой микросхемой. В качестве посредника можно использовать опять же микроконтроллерное устройство, специализированный преобразователь интерфейсов USB – SPI, а также многофункциональное устройство ввода-вывода (DAQ устройство), содержащее параллельные порты. Каждый способ имеет преимущества и недостатки.

Целью работы является реализация компьютерного управления умножающим ЦАП с помощью DAQ устройства NI USB-6009 в среде графического программирования LabVIEW [3, 4].

Основная часть

Структурная схема и условное графическое обозначение (УГО) микросхемы MAX532 приведены на рис. 1 [1].



а) б)

Рис. 1. Структурная схема (а) и УГО микросхемы MAX532 (б)

На рис. 2 приведены временные диаграммы сигналов интерфейса SPI.

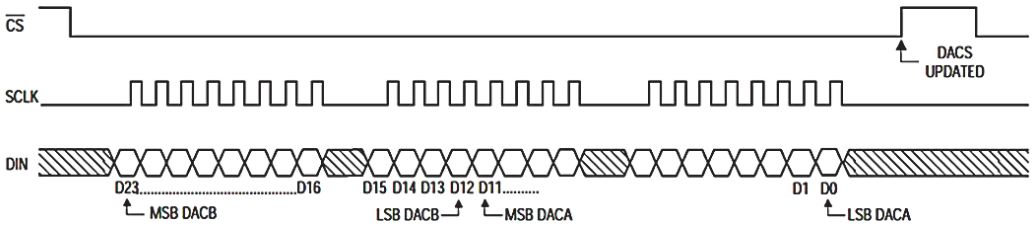
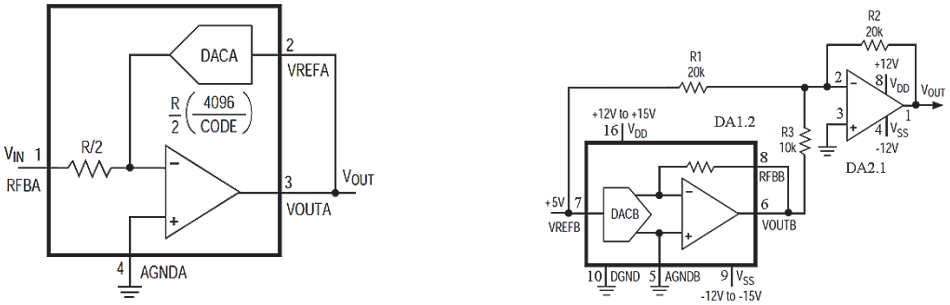


Рис. 2. Временные диаграммы интерфейса SPI (LDAC = DGND)

После спада уровня на входе выбора микросхемы /CS по положительным фронтам тактовых сигналов на входе SCLK в 24-разрядный сдвиговый регистр микросхемы вдвигаются, начиная со старшего разряда, сначала 12-разрядный код для канала *B*, а затем соответствующий код для канала *A*. В случае низкого уровня на входе /LDAC эти коды фиксируются в регистрах-защёлках каналов.

Для синтеза усилителя с программируемым коэффициентом усиления и ЦАП с биполярным выходом производитель рекомендует следующие конфигурации включения микросхемы (рисунок 3).



а) б)

Рис. 3. Усилитель с программируемым коэффициентом усиления (а) и ЦАП с биполярным выходом (б)

Коэффициент усиления схемы на рисунке 2 (а) определяется выражением:

$K_U = {-4096}/{CODE}$,

где *CODE* – двоичный код, записываемый в регистр-защёлку канала *A*.

Схему ЦАП с биполярным выходом на базе канала *B* должен дополнять внешний операционный усилитель (ОУ), в качестве которого использован один из двух ОУ микросхемы NE5532P [5]. Выходное напряжение V_{OUT} формируется из входного кода в соответствии с таблицей 1, где V_{IN} – напряжение на выводе *VREFB* микросхемы (+5 В).

Таблица 1

Формирование биполярного напряжения

Код в регистре-защелке канала	Выходное напряжение V_{OUT}, В
1111 1111 1111	$+V_{IN}$ * (2047/2048)
1000 0000 0001	$+V_{IN}$ * (1/2048)
1000 0000 0000	0 В
0111 1111 1111	$-V_{IN}$ * (1/2048)
0000 0000 0001	$-V_{IN}$ * (2047/2048)
0000 0000 0000	$-V_{IN}$ * (2048/2048) = $-V_{IN}$

Демонстрационная программа в среде LabVIEW, реализующая работу компьютера с заданными конфигурациями, имеет вид, приведенный на рис. 4.

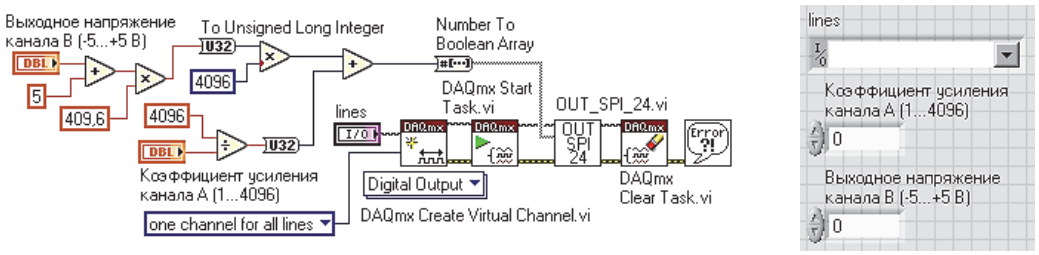


Рис. 4. Блок-схема и лицевая панель программы работы с конфигурациями ЦАП

Задача программы – создать канал цифрового вывода, подготовить 24 - разрядный массив логических значений в соответствии с рассмотренной кодировкой и записать его в микросхему по правилам SPI интерфейса. Двоичное значение для канала *A* занимает младшие 12 элементов массива, а для канала *B* после умножения на 4096 – старшие 12 элементов массива. Формирование сигналов интерфейса SPI с помощью порта DAQ устройства NI USB-6009 выполняет подпрограмма OUT_SPI_24.vi. Её блок-диаграмма приведена на рис. 5.

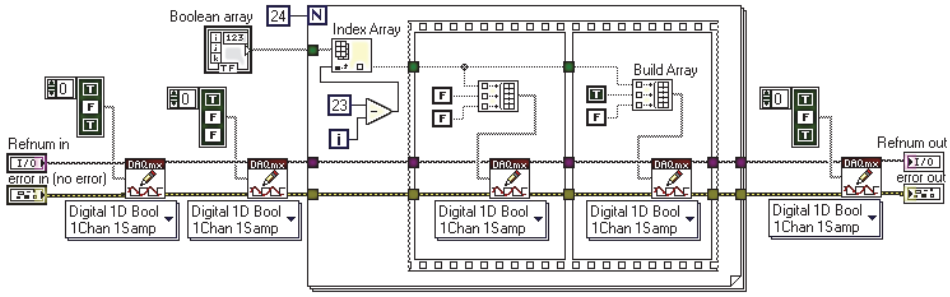


Рис. 5. Блок-диаграмма подпрограммы реализации интерфейса SPI

Подпрограмма использует три линии порта вывода DAQ устройства. Младшая 0-вая линия подключена к входу данных *DIN*, 1-ая линия формирует тактовый сигнал *SCLK*, 2-ая линия создает сигнал выбора кристалла /CS.

Проведено тестирование экспериментального макета, разработанного на основе схем рисунка 3, связанного с компьютером посредством устройства NI USB-6009. Тестирование показало адекватную работу аппаратной и программной части.

Заключение

Таким образом, в графической среде программирования LabVIEW с помощью DAQ устройства NI USB-6009 реализовано компьютерное управление двухканальным умножающим ЦАП по последовательному интерфейсу SPI. Разработана демонстрационная программа, позволяющая одновременно использовать каналы преобразователя в качестве усилителя с программируемым коэффициентом усиления и ЦАП с биполярным выходом. Применение DAQ устройств для реализации интерфейса SPI расширяет возможности автоматизации экспериментальных исследований за счет применения широкой номенклатуры датчиков и исполнительных устройств с таким интерфейсом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. MAX532. Сдвоенный перемножающий 12-разрядный DAC с последовательным входом. – URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/Maxim/dac/max532.htm (дата обращения: 22.02.2026).
2. Последовательный интерфейс SPI. – URL: https://prog-cpp.ru/micro-spi/ (дата обращения: 22.02.2026).
3. USB-6008 and USB-6009 User Manual. – URL: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6008-6009-feature/page/user-manual-welcome.html?srsltid=AfmBOor3exbUqMh-L5Ms_7vq_fBiXLHLObTK6GWyNQE2xb87Mdk4iR-K (дата обращения: 22.02.2026).
4. Евдокимов, Ю. К. LabVIEW в научных исследованиях / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М.: ДМК пресс, 2018. – 400 с.
5. NE5532P. Операционный усилитель сдвоенный общего применения. – URL: https://www.promelec.ru/product/65339/ (дата обращения: 22.02.2026).

УДК 621.3
Маньков Артем Вячеславович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Mankov Artem Vjyacheslavovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедпы «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Alexey Valyeryevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of “Industrial Electronic and Innovative Technologies”, Komsomolsk-na-Amure State University

МОДУЛЬ ИНТЕГРАЦИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В НАСТОЛЬНУЮ ИГРОВУЮ СРЕДУ
RADIO-IDENTIFICATION INTEGRATION INSIDE BOARD GAME ENVIRONMENT MODULE

Аннотация. Представлены результаты разработки функциональной схемы электронного устройства для интеграции радиочастотной идентификации в настольную игровую среду. Устройство позволяет идентифицировать до 10 жетонов с радиочастотными метками, производить учёт карт в игре игроками разных команд, воспроизводить интерфейсные звуки, соответствующие действиям игроков, выводить аудио-визуальную информацию о ходе игры.
Abstract. Article presents development results of radio frequency identification device function scheme for board game environment. Device is able to identify up to 10 tokens with radio-frequency signals, emit interface sounds bounded to player’s actions and indicate audio-visual information about game session progress.
Ключевые слова: настольная игра, радиочастотная идентификация, функциональная схема, электронное устройство, интеграция.
Key words: board game, radio-frequency identification, function scheme, electrical device, integration.

Введение

История развития настольных игр помнит множество экспериментов, которые в той или иной степени были призваны изменить настольно-игровой опыт игроков. Существуют примеры удачных экспериментов, оказавших влияние на хобби в целом, некоторые повлияли на отдельных разработчиков и студии, однако самой распространённой тенденцией развития механик настольных игр остаётся имплементация электронных и, в настоящее время цифровых компонентов.

Ниша интеграции электронных компонентов в настольно-игровые среды, в настоящее время является актуальным направлением, которое пополняется мобильными приложениями и цифровыми устройствами, интегрированными в современные настольные игры [1].

Невысокие темпы развития данного направления, обусловлены автономностью настольных игр. Основные преимущества данного хобби реализуются и без интеграции

электронных компонентов. Настольные игры отлично справляются с функциями социализации и тактильности компонентов, за счёт чего электронные устройства могут оказаться необязательным дополнением к рабочей схеме дизайна настольных игр.

Тем не менее, электронные устройства так же могут дополнять реализацию социальной, тактильной и иммерсивной функций в настольно-игровых средах, при этом не вытесняя традиционные способы достижения выполнения данных функций [2, 3].

Существующие аналоги электронных устройств или приложений, интегрированных в настольно-игровые среды зачастую принимают одно из двух крайних положений, которые приводят к рудиментарности вводимых устройств (мобильные приложения для игр «Бункер» и «Planescape») или к переводу настольной игры в разряд цифровых приложений (консоль «Teburu») [4, 5]. Разрабатываемое устройство, в отличие от аналогов, содержит как традиционные элементы настольных игр, так и элементы автоматизации, и соблюдает необходимый баланс между ними. Оно обладает лёгкой настройкой и высокой степенью тактильности, которые идеально дополняют атмосферу и игровой процесс, и не нарушает традиционные положительные стороны настольно-игровой среды.

Цель настоящей работы – разработать устройство, дополняющее реализацию тактильной, иммерсивной и социальной функций в настольной игре.

Функциональная схема устройства

Схема разработанного устройства изображена на рис. 1. Интеграция радиочастотной идентификации реализуется за счёт использования двух радиочастотных считывателей и набора радиочастотных меток с разными именами.

Устройство задействует два радиочастотных считывателя, три тактовые кнопки, одну плату микроконтроллера и LED-дисплей для реализации описываемого игрового режима.

Пара радиочастотных считывателей позволяет реализовать состояние оспаривания – состояния, при котором в зоне «контрольной точки» находятся две метки одновременно, при этом не вызывая конфликта сигналов радиочастотных меток.

Радиочастотные метки используются в «жетонах активации» - помимо отслеживания количества очков действий, оставшихся у миниатюры, «жетоны активации» будут позволять устройству («контрольной точке») отсчитывать время, оставшееся до окончания игрового раунда.

Перед началом игры – все радиочастотные метки, встроенные в жетоны активации должны быть занесены в память микроконтроллера, в нашем случае это «Arduino Leonardo ATmega32U4».

Для занесения жетонов активации в память микроконтроллера, игрок должен нажать на одну из тактовых кнопок (кнопку подтверждения), после чего начать поочередно сканировать каждую радиочастотную метку (RFID-метку).

Уникальный идентификатор каждой RFID-метки, просканированной таким образом – будет занесен в память микроконтроллера в список имён, которые будут отражать состав команд миниатюр в памяти устройства. Аналогичную операцию игрок должен проделать с другим набором RFID-меток и нажать кнопку подтверждения для занесения их идентификаторов в память микроконтроллера.

После занесения уникальных идентификаторов в память микроконтроллера – устройство сохраняет данные о суммарном количестве RFID-меток, принимающих участие в игре. Когда любая RFID-метка сканируется повторно – устройство переносит его в статус «неактивные», когда количество RFID-меток со статусом «неактивные» станет равно сумме всех RFID-меток, занесенных в память микроконтроллера, устройство должно проверить выполнение одного из следующих условий:

1.На RFID-счётчике находится миниатюра с RFID-меткой одной из команд – этой команде начисляется одно победное очко

2.На обоих RFID-счётчиках находятся миниатюры с RFID-метками обеих команд, командная точка оспаривается – победное очко не зачисляется ни одной из команд

3.Ни на одном из RFID-счётчиков нет миниатюр любой из команд – победное очко не начисляется ни одной из команд

Когда устройство успешно проверяет одно из перечисленных условий – проходит 1 игровой раунд. После завершения одного игрового раунда – игрок нажимает на следующую тактовую кнопку (кнопку сброса), которая должна возвращать все RFID-метки из статуса «неактивные» в «активные».

При завершении заданного игровым режимом числа раундов – устройство выводит информацию об итогах игры на экран LED-дисплея.

Число раундов задаётся игроком при помощи использования третьей тактовой кнопки (кнопки настройки). Для настройки нужного числа раундов, игрок должен нажать на кнопку количество раз, равное числу раундов и повторно нажать на кнопку подтверждения.

Действия настройки числа задействованных RFID-меток и числа раундов игроки могут совершать в любой последовательности.

Для сброса всех, произведенных игроками настроек – необходимо нажать и удерживать кнопку сброса не менее трех секунд.

Разработка модуля интеграции радиочастотной идентификации проводилась при использовании компонентов набора Arduino и теоретических знаний о разработке устройств интеграции технологий в настольно-игровую среду.

В результате разработки модуля интеграции радиочастотной идентификации в настольно-игровую среду была получена функциональная схема предполагаемого устройства (рис. 1) и собраны компоненты, входящие в состав устройства (табл. 1).

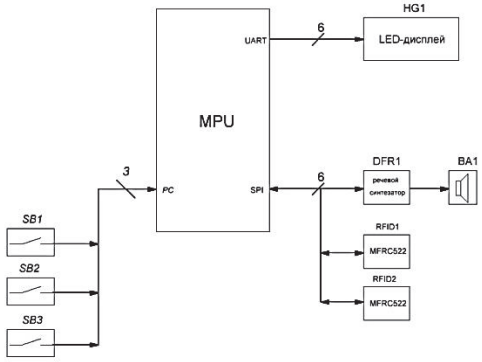


Рис. 1. Функциональная схема модуля интеграции радиочастотной идентификации в настольно-игровую среду

Таблица 1

Компоненты модуля интеграции радиочастотной идентификации

Обозначение на схеме	Название компонента	Функция
MPU	Плата микроконтроллера Arduino Leonardo atmega32u4	Реализация игровых и интерактивных функций устройства
SB1	Тактовая кнопка настройки	Задание числа игровых раундов и миниатюр, принимающих участие в игре
SB2	Тактовая кнопка подтверждения	Сохранение параметров, заданные кнопкой настройки
SB3	Тактовая кнопка сброса	Возвращение состояния устройства в момент, предшествовавший внесению настроек кнопкой настроек и кнопок настройки и подтверждения
HG1	LED – дисплей P10	Выведение визуальной информации о количестве победных очков каждой команды.
DFR1	Речевой синтезатор GSMIN KY-037	Преобразует интерфейсные текстовые фразы в речь
BA1	Динамик	Выведение аудио информации при совершении игроками взаимодействия с устройством.
RFID 1	Радиочастотный считыватель 1	Считывание радиочастотных меток с жетонов активации
RFID 2	Радиочастотный считыватель 2	Считывание радиочастотных меток с жетонов активации

Результаты разработки

Полученное устройство развивает идеи интеграции электронных компонентов в настольно-игровые среды, аналогичные разработки преследуют цель автоматизации игрового процесса, устройство, рассмотренное в статье, сохраняет тактильность и иммерсивность традиционных настольных игр, что является значительным преимуществом в сравнении с аналогичными устройствами, переводившими слишком большую часть игровых механик на цифровые или электротехнические элементы.

Заключение

Исследование проводилось в теоретическом ключе, так как несмотря на актуальность RFID – технологии в настоящее время, для настольно-игровых сред она не является полностью адаптированной. С разработкой описанного устройства – степень общей интеграции радиочастотных технологий повысится и, возможно сподвигнет разработчиков настольных игр на внедрение RFID-технологии в свои проекты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Peterson J. Playing at the world: A history of simulating wars, people and fantastic adventures, from chess to role-playing games. – San Diego, CA : Unreason Press, 2012. – С. 978-0615642048.
2. Teburu. Опубл.: 02.09.2025 // Tesera. URL: https://tesera.ru/article/2517564/ (дата обращения: 18.02.2026).
3. Настольные игры с высокими технологиями. Опубл.: 12.10.2015 // Mirif.ru URL: https://www.mirf.ru/games/hi-tech-boards (дата обращения: 17.02.2026).
4. De Boer C. J., Lamers M. H. Electronic augmentation of traditional board games //International Conference on Entertainment Computing. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004. – С. 441-444.
5. From analog to digital. Опубл.: 27.06.2023 //etechshout.com URL: https://etechshout.com/evolution-of-board-games-in-digital-age/ (дата обращения: 17.02.2026).

УДК 629.421.1

Минеева Кристина Валерьевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Mineeva Kristina Valeryevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Любушкина Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Liubushkina Nadezhda Nikolaevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА ДИММИРУЕМОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ
DEVELOPMENT OF DIMMABLE LED LIGHTING FOR INDUSTRIAL PREMISES

Аннотация. В статье рассмотрена разработка системы диммируемого светодиодного освещения для помещения склада комплектующих самолетостроительного предприятия. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения высоких требований к точности визуального контроля авиационных компонентов, соблюдения норм освещенности, регламентированных отраслевыми стандартами, а также значительного энергосбережения в условиях круглосуточной работы складских помещений.

Предложенная система построена на базе светодиодных линейных светильников High Bay с использованием цифрового протокола управления DALI (цифровой адресуемый интерфейс освещения) и радиолокационных датчиков присутствия K2150. Такое решение обеспечивает плавное диммирование светового потока в диапазоне от 5 до 100 %, автоматическое поддержание освещенности с учетом естественного света, а также интеллектуальное управление освещением по принципу «свет по потребности».

Abstract. The article discusses the development of a dimmable LED lighting system for the warehouse of aircraft component parts at an aircraft manufacturing enterprise. The relevance of this

work is due to the need to ensure high requirements for the accuracy of visual inspection of aviation components, compliance with the illumination standards regulated by industry standards, and significant energy savings in the context of 24-hour operation of storage facilities.
The proposed system is based on High Bay LED linear luminaires using the DALI (Digital Addressable Lighting Interface) digital control protocol and K2150 radar presence sensors. This solution provides smooth dimming of the light output in the range of 5 to 100 %, automatic maintenance of illumination taking into account natural light, as well as intelligent lighting control based on the principle of «light on demand».
Ключевые слова: светодиодная лампа, санитарные нормы освещения, цифровой протокол управления, датчик освещенности, датчик присутствия.
Key words: LED lamp, lighting standards, digital control protocol, light sensor, presence sensor.

Введение

Самолетостроительные предприятия предъявляют особые требования к организации складского хозяйства. Комплектующие для авиационной техники – от мелких крепежных элементов до крупных агрегатов планера – требуют тщательного визуального контроля при приемке, хранении и выдаче в производство. Ошибки при идентификации деталей, повреждения покрытий или дефекты поверхности могут привести к серьезным последствиям в процессе сборки и эксплуатации воздушных судов.

Освещение складских помещений играет ключевую роль в обеспечении качества контроля. Согласно отраслевым стандартам (ОСТ 5472003-82), регламентирующим искусственное освещение на предприятиях гражданской авиации, уровни освещенности рабочих мест персонала и рабочих зон должны обеспечивать безопасное и эффективное выполнение технологических операций. Для участков комплектации и контроля качества рекомендуемая освещенность составляет 300–500 люкс [1, 2].

Целью работы является разработка энергоэффективной системы диммируемого светодиодного освещения для самолетостроительного склада комплектующих, обеспечивающей:

- нормируемую освещенность 500 люкс в рабочих зонах и 200 люкс в зонах хранения;
- возможность плавной регулировки яркости в зависимости от потребности;
- автоматическое управление освещением с использованием датчиков присутствия;
- интеграцию с существующей инфраструктурой предприятия;
- экономию электроэнергии и длительный срок службы [2].

Разработка структурной схемы устройства

Освещение складских помещений самолетостроительного предприятия должно соответствовать следующим нормативным документам: ОСТ 5472003-82 «Освещение искусственное в эксплуатационных предприятиях гражданской авиации» – устанавливает значения освещенностей рабочих мест и зон технического обслуживания; СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»; ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерения».

Помимо общих норм освещенности, к складу комплектующих предъявляется ряд специфических требований: высокая цветопередача; отсутствие стробоскопического эффекта – движущиеся механизмы и вращающиеся детали не должны создавать иллюзию остановки при освещении пульсирующим светом; стабильность светового потока; электромагнитная совместимость – системы освещения не должны создавать помех для чувствительного контрольно-измерительного оборудования, используемого для проверки авиационных компонентов; взрывобезопасность [2]. Структурная схема диммируемой системы освещения приведена на рис. 1.

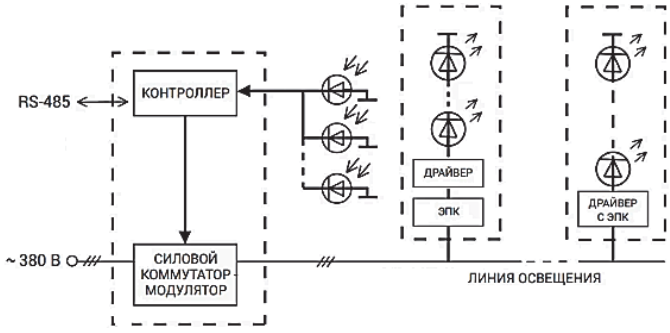


Рис. 1. Структурная схема устройства

Для системы освещения выбраны линейные LED High Bay светильники, они имеют узкую и длинную форму, что идеально подходит для освещения стеллажных проходов склада. Их светораспределение позволяет направлять световой поток точно в зону, где он необходим, минимизируя потери на освещение пустых пространств. Потери света при использовании линейных светильников с точным светораспределением составляют менее 5 %. Их параметры: мощность 200 Вт, световой поток 40000 лм, цветовая температура 5000 К, индект цветопередачи более 80, диапазон рабочих температур от – 40 до 60 ^{o}C, совместимы с протоколом DALI, PWM. Данный светильник обеспечивает высокую светоотдачу (200 лм/Вт), что позволяет достичь требуемой освещенности при меньшем количестве светильников и снизить энергопотребление [3].

Для реализации диммируемого освещения склада выбран протокол управления, обеспечивающий требуемую гибкость и надежность [4]. Выбран цифровой протокол DALI по следующим причинам:

1) Позволяет индивидуально настраивать каждый светильник или группу светильников, что важно для склада с различными зонами (приемка, стеллажи, резервное хранение).

2) Система получает информацию о состоянии каждого светильника (работает/не работает, текущая яркость, наработка часов), что упрощает техническое обслуживание. Система DALI удаленно обнаруживает и сообщает о неисправных светильниках (вплоть до конкретного адреса), превращая техническое обслуживание из реактивного аварийного ремонта в упреждающее планирование.

3) Цифровой сигнал DALI устойчив к электромагнитным помехам, что особенно важно в промышленной среде самолетостроительного предприятия (сварочные аппараты, электродвигатели, другое мощное оборудование).

4) Возможность перепрограммирования системы без изменения проводки. Группы светильников можно переназначать в любой момент через программное обеспечение.

5) DALI легко интегрируется с системой управления зданием (BMS) предприятия для централизованного мониторинга и управления.

6) Возможность создания и сохранения в памяти нескольких световых сцен: «рабочий режим», «энергосбережение», «дежурное освещение», «ночной режим», «уборка/инвентаризация».

В качестве оптимального решения выбран радиолокационный датчик присутствия К2150, датчик движения (присутствия) большого радиуса действия, разработанный и производимый в России. Используется для управления освещением и автоматизации складов высотой от 3 до 30 м, производственных зданий, промышленных и городских территорий, имеет высокую чувствительность, достаточно одного датчика на проход, отсутствуют «мертвые зоны» - фиксируют каждый шаг человека, могут работать в холодных помещениях.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана система диммируемого светодиодного освещения для самолетостроительного склада комплектующих. Проведен анализ требований к освещению складских помещений авиационного предприятия, определены нормируемые уровни освещенности. Выбрано оптимальное оборудование: линейные светодиодные светильники; система управления на базе цифрового протокола DALI, обеспечивающая адрес-

ное управление, двустороннюю связь и помехоустойчивость; радиолокационные датчики присутствия, работающие в любых климатических условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка освещенности на производстве : учебно-методическое пособие / А. И. Агошков, Е. А. Реймер, О. В. Полозова [и др.]. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2025. - 116 с. – ISBN 978-5-8158-2422-5. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2232874 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

2. Кокорин, О. Я. Системы и оборудование для создания микроклимата помещений : учебник / О.Я. Кокорин. – 2-е изд., испр. — Москва : ИНФРА-М, 2026. – 218 с. – (Среднее профессиональное образование). - ISBN 978-5-16-006509-0. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2180070 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

3. Водовозов, А. М. Микроконтроллеры для систем автоматики : учебное пособие / А. М. Водовозов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 168 с. - ISBN 978-5-9729-1071-7. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.com/catalog/product/1903136 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

4. Магда, Ю. С. Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств : практическое руководство / Ю. С. Магда. – Москва : ДМК Пресс, 2017. - 225 с. – ISBN 978-5-97060-551-6. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2248789 (дата обращения: 07.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

УДК 656.025.4

Монастырский Дмитрий Ярославович, аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Monastyrskii Dmitrii Yaroslavovich, Ph.D. Student of the Department “Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energetics”, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Kim Konstantin Konstantinovich, Doctor of Sciences in Engineering, Full Professor, Head of the Department “Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energetics”, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕТВЕ ТОПЛИВА И ИСТОЧНИКА ХОЛОДА В АВТОНОМНЫХ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ВАГОНАХ
POTENTIAL FOR THE APPLICATION OF LIQUEFIED NATURAL GAS AS FUEL AND A SOURCE OF COLD IN AUTONOMOUS REFRIGERATED RAILCARS

Аннотация. В докладе рассматривается эффективность использования сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива и источника холода в автономных рефрижераторных вагонах (АРВ). Проведен сравнительный технико-экономический анализ замещения дизельного топлива на СПГ, показавший снижение эксплуатационных расходов и срок окупаемости оборудования около 2,5 года. Выполнен расчет теплового баланса грузового отделения при рекуперации холода газификации СПГ. Установлено, что использование энергетического потенциала СПГ обеспечивает дополнительную холодопроизводительность в размере 7,8 % от номинальной мощности типовой установки АРВ. Это позволяет использовать СПГ в качестве дополнительного источника холода и стабилизировать температурный режим перевозки при экстремальных внешних температурах (выше +30 °С).

Abstract. The report examines the efficiency of using liquefied natural gas (LNG) as motor fuel and a source of cold in autonomous refrigerated railcars. A comparative technical and economic analysis of substituting diesel fuel with LNG was carried out, showing a reduction in operating costs and an equipment payback period of about 2.5 years. The heat balance of the cargo compartment was

calculated taking into account cold recuperation during LNG gasification. It has been established that the use of the energy potential of LNG provides additional cooling capacity amounting to 7.8 % of the nominal capacity of a typical refrigerated railcar unit. This allows using LNG as an additional source of cold to stabilize the transportation temperature regime at extreme external temperatures (above +30 °C).
Ключевые слова: автономный рефрижераторный вагон, сжиженный природный газ, рекуперация холода, холодопроизводительность, энергоэффективность.
Key words: autonomous refrigerated railcar, liquefied natural gas, cold recuperation, cooling capacity, energy efficiency.

Введение

Основная тенденция грузоперевозок скоропортящихся продуктов в Российской Федерации – переход к перевозкам при помощи рефрижераторного подвижного состава, в частности к АРВ. В настоящее время глобальные потери продукции при транспортировке достигают 360 млн т в год [1]. Применение специализированного подвижного состава позволяет снизить эти потери вдвое [2]. Однако в то же время на долю рефрижераторного транспорта приходится около 15 % глобального потребления ископаемого топлива [3]. Традиционные системы энергоснабжения АРВ используют энергетическое оборудование, работающем на дизельном топливе, что в условиях роста цен на топливо и ужесточения экологических норм снижает рентабельность перевозок [4]. Несмотря на активное внедрение газомоторного топлива, рекуперация низкотемпературного потенциала (холода) СПГ в процессе его регазификации для оборудования малой мощности остается мало изученным ресурсом повышения энергоэффективности. Целью данной работы является оценка технико-экономической эффективности АРВ на СПГ с применением технологии рекуперации холода.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования принят типовой АРВ. Оценка эффективности перевода энергетического оборудования на СПГ производилась методом сравнительного анализа с дизельным аналогом. Условия эксплуатации и стоимостные показатели энергоносителей актуализированы для 2026 года. Принятые для расчета параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики АРВ и топлива

Параметр	Значение	Единицы измерения
Внутренний объем грузового отделения	125,0	$м^3$
Площадь теплоотдачи ограждений ($S_т$)	287,0	$м^2$
Коэффициент теплопередачи ограждений (k)	0,4	$Вт/(м^2 \cdot К)$
Средний расход дизельного топлива	2,0	л/ч
Стоимость дизельного топлива	76	руб./л
Стоимость СПГ в рознице	45	руб./кг
Время наработки оборудования ($\tau_{экс}$)	2000	ч/год

Методика расчета включает два этапа. На первом этапе определяется экономический эффект от замещения дизельного топлива для СПГ. Срок окупаемости модернизации ($T_{ок}$) в годах определяется отношением разности капитальных вложений (K) к годовой экономии эксплуатационных расходов ($\Delta C_{эк}$):

$$T_{ок} = \frac{K_{спг} - K_{диз}}{\Delta C_{эк}}$$

где $K_{спг}$ и $K_{диз}$– капитальные затраты на систему СПГ и дизельный аналог соответственно.

На втором этапе рассчитывается тепловой баланс грузового отделения, где размещен теплообменник для регазификации СПГ. Учитывается, что при регазификации СПГ во время кипения жидкой фазы происходит поглощение значительной доли теплоты из окружающей среды, за счет чего производится рекуперация холода [5], а также теплоемкость паров СПГ. Температура хранения СПГ принята −162 °C. Теплофизические свойства метана приняты по-

стоянными и усредненными, влияние состава СПГ на холодопроизводительность в рамках данной оценки не рассматривалось.

Для оценки тепловой нагрузки на оборудование был выполнен расчет суммарных теплопритоков (Q_{Σ}, Вт) через ограждающие конструкции кузова при экстремальной температуре наружного воздуха $T_{\text{нар}}$ = +40 °C.

$$Q_{\Sigma} = k \cdot S_{\text{т}} \cdot \left(T_{\text{нар}} - T_{\text{вн}}\right) \cdot (1 + \beta) \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопередачи Вт/(м^2·К); $S_{\text{т}}$ – площадь теплоотдачи; $T_{\text{вн}}$ – температура внутри АРВ при перевозке замороженных грузов (–20 °C); β – коэффициент, учитывающий дополнительные теплопритоки от инфильтрации и теплопритоков от солнечной радиации, принятый равным 0,43 при стоянке в условиях жаркой погоды; при изменении условий эксплуатации β требует уточнения.

Предварительный расчет теплового баланса по формуле (1) показал, что при температуре наружного воздуха +40 °C суммарные теплопритоки в грузовое отделение достигают 9,85 кВт. Это превышает номинальную холодопроизводительность штатной установки (9,5 кВт) в режиме заморозки, что создает риск нарушения температурного режима.

Для стабилизации используется низкотемпературный потенциал фазового перехода СПГ. Для корректного расчета холодильной мощности определен массовый расход СПГ ($G_{\text{спг}}$, кг/ч) при работе установки под максимальной нагрузкой. Расчет выполнен исходя из условия энергетической эквивалентности с дизельным двигателем тепловой мощностью 38,0 кВт, потребляющим в пиковом режиме 3,8 л/ч (B_{max}):

$$G_{\text{спг}} = B_{max} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{д}}}{Q_{\text{н}}^{\text{г}}},$$

где $\rho_{\text{д}}$ – плотность дизельного топлива, 0,85 кг/л; $Q_{\text{н}}^{\text{д}}$ и $Q_{\text{н}}^{\text{г}}$ – низшая теплота сгорания дизельного топлива и природного газа, 42,7 МДж/кг и 47,0 МДж/кг соответственно. Влияние различий КПД дизельного и газового двигателя в данной оценке не учитывалось ввиду второстепенности показателя при сравнении стоимости топлива и эксплуатационных режимов термического оборудования. Дополнительная холодопроизводительность ($Q_{\text{рек}}$, Вт), получаемая при газификации топлива, определяется по формуле:

$$Q_{\text{рек}} = \frac{G_{\text{спг}}(r + c_{\text{р}} \cdot \Delta T)}{3{,}6},$$

где r – удельная теплота парообразования метана, 510 кДж/кг; $c_{\text{р}}$ – теплоемкость паров СПГ, 2,23 кДж/(кг·К); ΔT – перепад между температурой перед подачей в двигатель (20 °C) и температурой кипения СПГ, принятый 182 К.

Результаты

В совокупности рекуперация холода от СПГ дает прирост холодопроизводительности на 7,8 %, что обеспечивает запас для компенсации теплопритоков и позволяет стабилизировать температурный режим в грузовом отделении при различных температурах. Использование комбинированной системы энергоснабжения позволяет поддерживать заданную температуру груза при росте температуры окружающей среды (рис. 1).

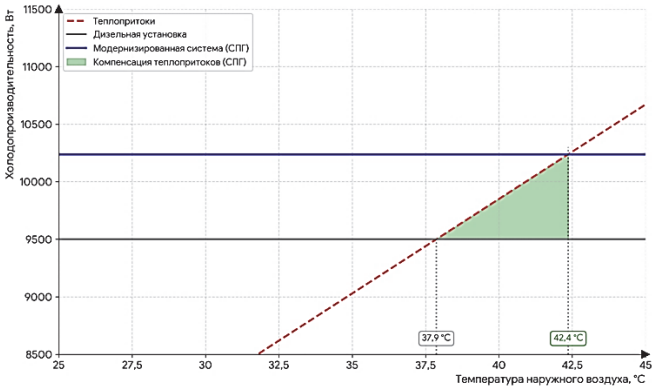


Рис. 1. Потенциал компенсации теплопритоков в грузовое отделение АРВ при использовании холода от рекуперации СПГ

Сводные данные расчета общих преимуществ от перевода энергетического оборудования АРВ с дизельного топлива на СПГ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты сравнения технико-экономических показателей

Показатель	Дизель	СПГ	Эффект
Экономические показатели			
Часовые затраты на топливо, руб./ч	152,0	69,5	–54,3%
Капитальные вложения (K), тыс. руб.	2000,0	2602,8	+30 %
Годовые экспл. расходы, ($C_{эк}$), тыс. руб.	1642,6	1421,8	–13 %
Срок окупаемости ($T_{ок}$), лет	–	2,5	–
Технические показатели			
Теплопритоки в грузовое отделение, $Q_{пр}$	9,85 кВт		
Номинальная холодопроизводительность, ($Q_{х}$)	9,50 кВт		
Номинальная холодопроизводительность, ($Q_{сум}$)	10,24 кВт		
Прирост холодопроизводительности (от $Q_{рек}$)	–	+0,738 кВт	+7,8 %

Заключение

В ходе анализа получены следующие результаты:

1. Замещение дизельного топлива на СПГ обеспечивает снижение эксплуатационных затрат на энергоносители в 2,2 раза. При расчетной наработке 2000 часов в год срок окупаемости капитальных вложений в криогенное оборудование составляет 2 года 6 месяцев.

2. Внедрение системы рекуперации холода СПГ добавляет 7,8 % к холодильной мощности за счет рекуперации, тем самым обеспечивая устойчивость температурного режима в различных условиях внешней среды. Полученная оценка эффекта от рекуперации соответствует верхней границе потенциально извлекаемого холода и рассматривается как добавочный резерв холода для компенсации теплопритоков в условиях тепловой нагрузки.

Таким образом показано, что модернизация системы энергоснабжения АРВ для использования СПГ в качестве топлива и источника холода является обоснованным техническим решением для эксплуатации при экстремальных температурах наружной среды или при росте тепловых нагрузок от внутренних источников АРВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. United Nations Environment Programme (UNEP). Food Waste Index Report 2024: Think Eat Save, Tracking Progress to Halve Global Food Waste. UNEP, 2024. – URL: https://digitallibrary.un.org/record/4042857 (дата обращения: 10.02.2026).

2. Friedman-Heiman A., Miller S. A. The impact of refrigeration on food losses and associated greenhouse gas emissions throughout the supply chain //Environmental Research Letters. – 2024. – Т. 19. – №. 6. – С. 064038. DOI 10.1088/1748-9326/ad4c7b.

3. Adekomaya O., Jamiru, T., Sadiku R., Huan Z. Sustaining the Shelf Life of Fresh Food in Cold Chain–A Burden on the Environment. //Alexandria Engineering Journal. – 2016. – Т. 55. – №. 2. – С. 1359-1365. DOI 10.1016/j.aej.2016.03.024.

4. Киселев, И. Г. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами / И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – № 4. – С. 104-113. – DOI 10.20295/2223-9987-2021-4-104-113. – EDN GQVUYV.

5. Оценка возможности применения теплоотрицательной энергетики в комплексах сжиженного природного газа / А. И. Довгялло, Д. В. Сармин, Д. А. Угланов, А. А. Шиманов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2013. – № 3-1(41). – С. 93-97. DOI 10.18287/1998-6629-2013-0-3-1(41)-93-97. – EDN RYADXR.

УДК 62-52
Недоедко Александр Олегович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Nedoedko Aleksandr Olegovich, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сухоруков Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sukhorukov Sergei Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ВАРИАНТОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF SENSOR OPTIONS FOR ASSESSING DEFORMATIONS OF LARGE-SIZED WORKPIECES THAT OCCUR DURING ROBOTIC PROCESSING

Аннотация. При автоматизации производства элементов внешней обшивки летательных аппаратов могут возникать деформации, которые необходимо компенсировать, так как они могут негативно сказаться на качестве конечного изделия. Для выявления деформаций выполнен анализ вариантов датчиков, которые позволят вычислять степень деформации и в последствии компенсировать их.
Abstract. When automating the production of aircraft exterior skin elements, deformations may occur that need to be compensated, as they may adversely affect the quality of the final product. To identify deformations, an analysis of sensor options has been performed that will allow us to calculate the degree of deformation and subsequently compensate for them.
Ключевые слова: автоматизация производства, самолётостроение, выявление деформаций, акселерометр, гироскоп.
Key words: automation of production, aircraft engineering, detection of deformations, accelerometer, gyroscope.

Введение

Одной из задач в процессе производства самолётов, которая на данный момент ещё недостаточно автоматизирована, является сборка отдельных элементов внешней обшивки летательных аппаратов, таких как двери и люки. Автоматизация позволит исключить человеческий фактор из этого этапа сборки, повысит точность производства и качество продукта, что является важными факторами в самолётостроительной сфере. Так как автоматизация сборки элементов внешней обшивки летательных аппаратов требует перемещения и наклона изделий для доступа инструментов в различные зоны обшивки, то могут возникать деформации собираемых элементов, а деформации в последствии влияют на точность сборки и соответственно на качество конечных изделий.

Чтобы иметь возможность устранить возникающие деформации [1] их необходимо выявлять, потому далее в статье рассматриваются различные датчики, с помощью которых можно выявлять деформации и получать значения, используя которые можно рассчитывать степень деформаций и в последствии компенсировать их.

Основная часть

Выявлять деформации можно при помощи различных датчиков. Бывают датчики распределённых измерений, позволяющие оценить конструкцию целиком и датчики точечных измерений для измерения отклонений в конкретных точках конструкции [2]. К первому варианту относятся тензодатчики в нашем случае они не подойдут, так как не позволяют измерить конкретную величину деформации в различных точках детали в миллиметрах, поэтому рассмотрим более подробно второй вариант датчиков.

1 Инклинометры (рисунок 1) – датчики определения угла наклона относительно горизонта. Для измерения деформации инклинометры необходимо закрепить в разных точках

конструкции и измерить их показания в недеформированном состоянии собираемой конструкции. При наклоне заготовки относительно горизонта показания датчиков будут изменяться, а по разнице в показаниях и жёсткости конструкции можно рассчитать деформации.



Рис. 1. Примеры внешнего вида инклинометров

Разброс характеристик инклинометров: 2 оси измерения угла наклона, диапазон измерений углов наклона от -14° до +14°, дискретность измерения углов наклона 0,001°, среднеквадратичную погрешность в указанном диапазоне ±0,01, частоту опроса не более 35 Гц, габаритные размеры инклинометра 87x59x28 мм.

2 Гироскопы (рисунок 2) – датчики измерения угла поворота в пространстве от начального положения. Для измерения деформации датчики необходимо привести в базовую позицию без деформаций, произвести сброс показаний к нулевым значениям и при перемещении заготовки одновременно обсчитывать показания со всех датчиков, и по разнице сигналов рассчитывать насколько переместились разные точки конструкции.

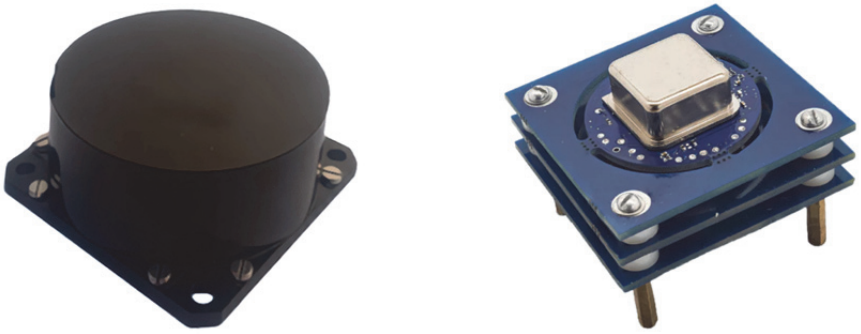


Рис. 2. Примеры внешнего вида гироскопов

Разброс характеристик гироскопов: диапазон измерений ±500°/с, стабильность смещения нуля <3°/ч, Ø50x25 мм.

3 Акселерометры (рисунок 3) – датчики измерения ускорения по разным осям. Акселерометры могут быть использованы для косвенных вспомогательных измерений, по их показаниям будут рассчитываться вибрации, возникающие на заготовке в процессе её перемещения. В случае возникновения вибраций автоматизированная система будет принимать решения позволяющие снизить от этих вибраций, например, снизить скорость перемещения детали, выдать соответствующее предупреждение оператору и т.д.

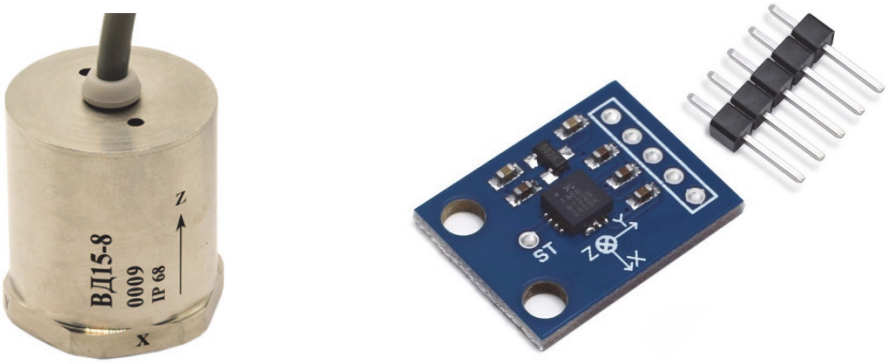


Рис. 3. Примеры внешнего вида акселерометров

Разброс характеристик акселерометров: диапазон измеряемых ускорений по каждой оси ±0,5-±106 м/с², диапазон измеряемых скоростей для вектора скорости 0-20/50/100/200 мм/с, габаритные размеры Ø29х40 мм.

Также существуют комбинированные датчики, сочетающие в себе сразу и гироскоп, и акселерометр.

Заключение

Проанализировав различные наборы датчиков и их параметры, мы выяснили, что наиболее подходящими датчиками для измерения деформаций заготовки при работе системы являются промышленные датчики, потому что обеспечивают наиболее высокую точность и надёжность в отличие от их аналогов. К датчикам, которые нам наиболее подходят, относятся гироскопы, акселерометры и инклинометры, эти датчики при работе в комплексе дают наилучший набор показаний, определяя наличие вибраций установки и показывая значения, по которым может рассчитываться деформация собираемых изделий. Выявляя вибрацию и деформацию, впоследствии можно будет их устранять, что повысит качество сборки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев В.П. Специальный раздел механики. Деформации и разрушение стальных изделий. - 1-е изд. - СПб: Лань, 2017. - 232 с.

2. Зудин В.Л., Жуков Ю.П., Маланов А.Г. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий. - 2-е изд. - Москва: Юрайт, 2025. - 199 с.

УДК 621.3

Никеенко Елизавета Максимовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Nikeenko Elizaveta Maksimovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Frolov Alexey Valerievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

НАСТОЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ГОНЧАРНОМУ ДЕЛУ С СИСТЕМОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ 3D- СКАНИРОВАНИЯ
DESKTOP PLATFORM FOR TEACHING POTTERY WITH A 3D SCANNING-BASED PRODUCT QUALITY ASSESSMENT SYSTEM

Аннотация. Целью проекта является разработка платформы для обучения гончарному делу с системой оценки качества изделий с помощью 3D-сканирования. Итоговым результатом является устройство с встроенными уроками по гончарному делу и системой экспертной оценки полученного в рамках урока результата, состоящее из привода с гончарным кругом, дисплея для визуализации уроков и прочей выводимой информации, кнопок управления параметрами устройства и выбора уроков (этапов уроков), фотокамеры и системы 3D-сканирования объекта и его экспертной оценки на основе искусственного интеллекта.

Abstract. The project goal is to develop a platform for teaching pottery with a system for assessing the quality of products using 3D scanning. The final result is a device with built-in lessons on pottery and a system for expert assessment of the result obtained within the lesson, consisting of a drive with a pottery wheel, a display for visualizing lessons and other information displayed, buttons for controlling the device parameters and selecting lessons (lesson stages), a photo camera, and a system for 3D scanning of an object and its expert assessment based on artificial intelligence.

Ключевые слова: самообучение, гончарное ремесло, гончарный круг, электропривод, сканирование, электрическая схема.

Key words: self-study, pottery, potter`s wheel, electric drive, scanning, electrical circuit.

Введение

В современном мире в образование и творчество активно внедряют технологические решения, позволяя сделать процесс обучения более доступным, интерактивным и эффективным. Одной из традиционных, но требующих большого практического опыта является гончарное дело. Для его освоения необходимы не только теоретические знания, но и формирование мышечной памяти, понимание свойств материала и способность контролировать форму изделия в процессе его создания. Однако самостоятельное обучение сопряжено с трудностями, такими как отсутствие обратной связи, сложность объективной оценки результата и потребность в постоянном присутствии мастера.

Настольная обучающая платформа для гончарного дела, объединяющая традиционный инструментарий с цифровыми технологиями, не только предоставляет обучающие материалы, но и реализует экспертную оценку качества изготовленного изделия на основе методов 3D-сканирования и анализа данных. Это позволяет обучиться ремеслу без наставника, опираясь объективную оценку результата.

Существует множество аналогов данному проекту: все разновидности гончарных кругов как современные, так и устаревшие устройства, и более простые инструменты, например, турнетка. Однако, нет ни одного аналога гончарного круга с системой обучения и обратной связи, позволяющей изучать ремесло самостоятельно.

Практическая значимость работы заключается в создании прототипа устройства, который может быть использован в образовательных учреждениях, творческих мастерских и для самостоятельного обучения. Разработанная платформа демонстрирует пример успешного симбиоза механики, электроники и программного обеспечения для решения прикладной задачи.

Техническая характеристика

Ориентируясь на поставленные задачи и цель, были разработаны следующие требования к проектируемому устройству

Состав системы: гончарный круг, электропривод гончарного круга, пульт управления (клавиатура, индикаторы, дисплей), микроконтроллер, сканер.

Режимы работы: Лепка и сканирование. Переключение между режимами 1 отдельной кнопкой, индикация режима с помощью многоцветного индикатора дублируется на дисплее.

Лепка: режим обеспечивает включение/отключения электропривода 2 кнопками, вращение круга только по часовой стрелке с регулировкой скорости от 0 до 300 оборотов/мин и шагом 15 оборотов/мин. Стабилизирует частоту вращения, изменение частоты вращения, как до включения электропривода, так и во время его работы. Регулирует частоты вращения с помощью педали (усилие вращения 2 Н*м). Круг подстраиваться под урок самостоятельно, устанавливая необходимую для упражнения скорость, когда обучающая система выключена скорость можно регулировать педалью.

Сканирование: режим запускает или останавливает сканирования с тех же кнопок что и управление режимом лепки. Скорость вращения 5 оборотов/мин в направлении часовой стрелки. Сканирование осуществляется методом лазерной фотограмметрии. 2 параллельных лазера под определённым углом к камере светят на объект, камера считывает кривизну линии свечения и строит карту высот, по которой далее создает облако точек.

Взаимодействие с видеоплеером: 15 видеоуроков. номер воспроизводимого ролика передается по 4-х проводной параллельной шине от платы Arduino Nano на Raspberry Pi (включает нужное видео), 1 проводная шина управления (воспроизведение/ стоп).

Питание: однофазная сеть переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 В , напряжение питания элементов схемы- 5 В,12 В, допускается 48 В

Материалы необходимые для реализации проекта: Диск для гончарного круга диаметром 25 см, шаговый мотор с энкодером 4,5 Н/м, блок питания для двигателя, плата Rasberry 5 8 Гб, плата Arduino Nano, 2 муфты, экран для вывода обучающих видео, педаль для контроля скорости вращения, корпус для двигателя, 2 кнопки (вкл./выкл.), 21 провод, светодиод RG, инкрементальный энкодер, вал и брызговик.

Схема устройства

Разработанная схема (рис. 1) содержит следующие составляющие: плата уплавления Arduino Nano (U1), инкрементальный энкодер (SB1), педаль управления скоростью (R1), шаговый двигатель с драйвером (U5), светодиод с двухцветной индикацией (H1), жидкокристаллический дисплей (H2), сканер, Raspberry Pi.

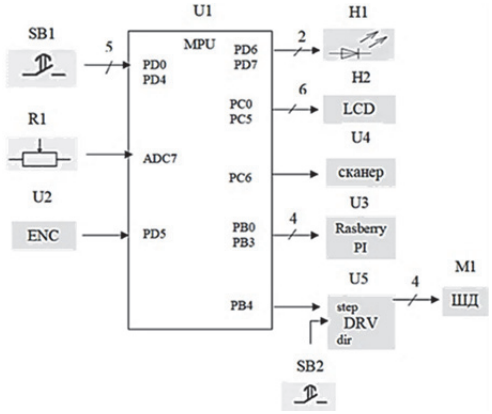


Рис. 1. Функциональная схема устройства

Центральным элементом схемы является блок управления, построенный на базе двух микроконтроллеров: Arduino Nano (U1) и Raspberry Pi. Такое разделение обусловлено различными типами решаемых задач. Arduino Nano, как специализированный микроконтроллер реального времени, отвечает за низкоуровневое управление исполнительными механизмами и опрос периферии. Raspberry Pi, обладая большей вычислительной мощностью, выполняет функции мультимедийного центра (воспроизведение видеоуроков) и обработки данных с камеры для 3D-сканирования.

Рассмотрим взаимодействие компонентов подробнее:

- На схеме конкретизировано подключение органов управления к портам Arduino Nano. Инкрементальный энкодер (SB1) подключен к двум цифровым входам, что позволяет с высокой точностью выбирать номер урока или этап работы, а также регулировать скорость вращения круга в ручном режиме. Педаль управления скоростью представлена как потенциометр (R1), подключенный к аналоговому входу (A0). Изменение сопротивления при нажатии на педаль преобразуется в цифровой сигнал, который Arduino использует для задания частоты вращения двигателя.

- Две кнопки «Пуск/Стоп» и «Режим» подключены к цифровым входам с подтяжкой к питанию. Состояние устройства (режим лепки или сканирования) индицируется двухцветным светодиодом (H1), катоды которого подключены к цифровым выходам Arduino для зажигания зеленого или красного цвета.

- Важным элементом является связка Arduino с Raspberry Pi. Связь организована по двум типам шин: 4-битная параллельная шина используется для передачи номера выбранного урока от Arduino к Raspberry Pi. Это простой и надежный способ, не требующий сложных протоколов обмена. 1-проводная шина управления служит для передачи команд «Воспроизвести/Стоп». Arduino, получив команду от пользователя, подает сигнал на Raspberry Pi, который, в свою очередь, запускает соответствующий видеофайл на дисплее (H2).

- Сердцем этого блока является шаговый двигатель с драйвером (U5). Выбор шагового двигателя обусловлен необходимостью точного позиционирования (в режиме сканирования) и поддержания стабильного крутящего момента на малых оборотах (в режиме лепки). Драйвер двигателя (например, популярный A4988 или TMC2209) подключен к Arduino Nano всего по двум линиям управления: STEP (шаг) и DIR (направление). Arduino генерирует на линии STEP импульсы определенной частоты: чем выше частота, тем быстрее вращается двигатель. Количество импульсов строго соответствует углу поворота, что критически важно для поворота изделия на фиксированный угол при сканировании. Линия DIR устанавливает логический уровень «0» или «1», задавая направление вращения (только по часовой стрелке, согласно техническому заданию).

- Блок, к которому подключена камера (Raspberry Pi Camera Module), реализован на базе Raspberry Pi. Два полупроводниковых лазерных модуля закреплены под фиксированным углом относительно камеры и освещают объект.

Принцип работы, отраженный на схеме, соответствует методу лазерной триангуляции. Во время сканирования Arduino подает команду драйверу на вращение двигателя с минимальной скоростью (5 об/мин). Raspberry Pi синхронизирует захват изображений с камеры

с положением поворотного столика. Лазеры проецируют на объект вертикальную линию. Камера фиксирует эту линию, искажения которой повторяют рельеф поверхности. Программное обеспечение на Raspberry Pi анализирует эти искажения, строит карту высот и генерирует облако точек — цифровую 3D-модель изделия.

Заключение

В рамках данной работы была разработана схема настольной платформы для обучения гончарному делу с системой оценки качества изделий с помощью 3D-сканирования, предназначенной для самообучения гончарному ремеслу с системой обратной связи. Устройство представляет собой симбиоз механики, электроники и программного обеспечения для решения прикладной задачи.

Благодарности

Выражаю благодарность руководителю проекта Фролову Алексею Валерьевича за помощь в реализации устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров И.И., Сидоров П.П. Применение шаговых двигателей в малогабаритных устройствах с числовым программным управлением // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 5. С. 22–27. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=4567890 (дата обращения: 20.02.2026).
2. Pauwels E., Hall P. 3D Scanning for Educational Makerspaces: A Review of Technologies and Open-Source Solutions // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 115432-115448. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3218756
3. Ковалев Д.С., Николаева Е.А. Технологии цифрового производства в дополнительном художественном образовании // Образование и наука. 2021. Т. 23. № 3. С. 145–168. https://doi.org/10.17853/1994-5639-2021-3-145-168
4. Santoso T., Syahputra M.F. Development of a Low-Cost 3D Scanner Using Laser Line Triangulation Method for Small Cultural Artifacts // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1569. № 2. P. 022012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/2/022012

УДК 621.331.3.025.1

Ничипорчук Ивона Вонгиевна, студент, ФГБОУ ВО ДВГУПС
Nichiporchuk Ivona Vongievna, student, FESTU
Ковалев Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные, телекоммуникационные и электротехнические системы», ФГБОУ ВО ДВГУПС
Kovalev Vladimir Aleksandrovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Automated, Telecommunication and Electrical Systems, FESTU

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 25 КВ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ
INCREASING THE EFFICIENCY OF 25 kV AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM UNDER HEAVY TRAFFIC CONDITIONS

Аннотация. Работа посвящена актуальному вопросу обеспечения функционирования системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока 25 кВ. Рост грузооборота электрифицированной железной дороги сопровождается повышением потенциалов рельсов относительно земли. Установлено, что потенциалы рельсов в современных условиях могут достигать опасных для жизни значений, а также создавать риск возникновения отказов устройств СЦБ и объектов железнодорожной инфраструктуры. Повышение эффективности функционирования СТЭ предложено достигнуть отсоединением заземленных конструкций от рельсов и переходом к беспроводным системам связи при организации интервального регулирования движения.

Abstract. Paper examines the pressing issue of ensuring the operation of 25 kV AC traction power supply systems (TPS). The growth of freight turnover on electrified railways is accompanied by an increase in rail potentials relative to ground. It has been established that rail potentials under modern conditions can reach life-threatening levels and pose a risk of failure of signaling and interlocking devices and railway infrastructure. It is proposed that improved TPS efficiency can be achieved by disconnecting grounded structures from the rails and switching to wireless communication systems for interval traffic control.
Ключевые слова: электробезопасность, потенциалы рельсов, переходное сопротивление, информационное моделирование, система тягового электроснабжения 25 кВ, тяжеловесное движение
Key words: electrical safety, rail potentials, transition resistance, information modeling, 25 kV traction power supply system, heavy haulage

Введение

К основным механизмам увеличения объемов перевозок грузов и пассажиров, предусмотренного Транспортной стратегией РФ до 2030 года, относятся сокращение интервалов попутного следования, повышение скорости движения, использование составов повышенной массы и длины и др. Применение данных мероприятий, например, на электрифицированных участках, в частности на ДВЖД, способствовало увеличению грузооборота за последние 5 лет в среднем на 3,4% (6 млн. тонн) в год.

Известно, что на электрифицированных участках рельсовая сеть используется в качестве проводника тока от электроподвижного состава (ЭПС) на подстанцию. Рост грузооборота электрифицированной железной дороги сопровождается увеличением токов и потенциалов в обратной тяговой сети в системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ. Результаты современных исследований [1-3 и др.] показывают, что в условиях тяжеловесного движения потенциалы рельсов могут достигать значений в несколько киловольт, что недопустимо по условиям электробезопасности. Кроме того, поскольку рельсы используются для заземления конструкций (по нормам ЦЭ-191), находящихся в пределах 5 м от полотна железной дороги, а также к ним присоединены устройства регулирования движения поездов (СЦБ), повышенные значения потенциалов могут приводить к повреждениям сооружений железнодорожной инфраструктуры и устройств СЦБ (опоры контактной сети, стойки телемеханики и др.).

Известно о применении искровых промежутков и газоразрядных приборов защиты, включаемых в цепь заземления в целях защиты опор и присоединенных к рельсам конструкций от токов утечки и повышенных потенциалов. Данные устройства обеспечивают электрическое соединение конструкции с рельсом, например, при коротком замыкании и отсоединение ее в нормальном режиме работы. Однако, данный подход не исключает риска поражения человека электрическим током, например, при одновременном касании «до» и «после» искрового промежутка. Кроме того, большинство промежутков и приборов защиты рассчитаны на напряжения 800-1700 В, что может приводить к их ложному срабатыванию и замыканию на рельс конструкции с дальнейшим ее повреждением.

Целью данной работы является анализ целесообразности использования рельсовой сети в качестве заземляющего устройства для объектов инфраструктуры на электрифицированных участках железной дороги, а также проводника системы интервального регулирования движения поездов СЦБ.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Проанализировать факторы, влияющие на значение потенциалов рельсов.
2. Выполнить моделирование потенциалов рельсов для нагрузок, характерных в условиях тяжеловесного движения.
3. Разработать предложения по дальнейшему совершенствованию условий функционирования СТЭ переменного тока 25 кВ.

Материалы и методы

Известно, что в СТЭ переменного тока 25 кВ потенциал рельсов в точке с координатой x межподстанционной зоны зависит от переходного сопротивления между рельсами и

землей r_n, электрического сопротивления рельсов с учетом влияния земли $\underline{z}_p$, а также значения протекающего по рельсам тока. В общем случае, ток в обратной тяговой сети принято разделять на две составляющие: «тяговая», обусловленная нагрузкой ЭПС $\dot{I}_{эпс}$, а также «вихревая», вследствие наличия взаимоиндукции между контактной сетью и рельсами. Результаты современных исследований показывают, что потенциал рельсов зависит, главным образом, от тяговой составляющей тока. В этой связи анализ значений потенциалов выполним без учета «вихревой» составляющей тока в рельсах.

В СТЭ переменного тока 25 кВ протяженность межподстанционной зоны может достигать порядка 50 км. Тяговый ток ЭПС стекает в рельсы и землю в точке местонахождения поезда и возвращается на подстанцию. При этом отмечается [4], что полное стекание тока из рельсов в землю происходит на существенно меньших расстояниях от ЭПС, чем в СТЭ постоянного тока (6-10 км). Тогда, например, при нахождении ЭПС посредине зоны, потенциал рельсов от тяговой составляющей тока в точке *x* может быть определен по выражению (1):

$$\dot{\varphi}(x) = 0{,}5\sqrt{\underline{z}_p r_n}\cdot \dot{I}_{эпс}\cdot e^{-x\sqrt{\frac{\underline{z}_p}{r_n}}} \qquad (1)$$

Наибольший потенциал, как следует из выражения (1) будет непосредственно в точке местонахождения ЭПС.

В работе выполнено информационное моделирование потенциалов рельсов относительно земли для реального участка ДВЖД.

Расчетный участок – двухпутный, протяженность межподстанционной зоны – 50 км, тип рельса – Р65, количество ЭПС на участке – один, поезд находится посредине зоны. В точке местонахождения ЭПС к рельсам присоединена конструкция (опора контактной сети) с сопротивлением 100 Ом.

Известно, что в условиях тяжеловесного движения, токи ЭПС в режиме тяги могут достигать значений 1000 А и более. В этой связи значения $\dot{I}_{эпс}$ при моделировании потенциалов приняты для диапазона токов, характерного для тяжеловесного движения, 400 – 1200 А.

Эквивалентное сопротивление рельсов 2-хпутного участка, принятое для диапазона токов в рельсах 0-300 А (соответствует току ЭПС порядка 1200 А), $\underline{z}_p$=0,108+*i*0,466 Ом/км. Значение переходного сопротивления между рельсами и землей является сезонно изменяющейся величиной и зависит от сопротивления шпал, балласта, земляного полотна и др. Расчетное значение r_n принято по данным [5] для районов БАМ 4-12 Ом·км.

При моделировании приняты следующие допущения:

1. Гармонические искажения кривой тягового тока отсутствуют.
2. Стекание тягового тока с рельсов в землю происходит на расстоянии 4 км от ЭПС.

Результаты моделирования потенциалов рельсов для принятых условий представлены в таблице (табл. 1).

Таблица 1

Значения потенциалов рельсов в точке местонахождения ЭПС для принятых расчетных условий

$I_{эпс}$, А	r_n, Ом·км				
	4	6	8	10	12
400	260	350	440	535	630
600	390	525	660	800	950
800	520	700	880	1070	1260
1000	650	870	1100	1340	1580
1200	780	1050	1300	1600	1900

Полученные результаты показывают, что значения потенциалов рельсов и, соответственно, заземленных на рельсы конструкций, могут в 2 и более раз превышать допустимые по нормам значения напряжения прикосновения ([3, табл. 2.1]). Наибольшее влияние на рост потенциалов при этом оказывает ток ЭПС. При нескольких ЭПС в пределах межподстанци-

онной зоны значения потенциалов рельсов могут принимать опасные для жизни значения при токах и менее 1 кА.

Дальнейший рост объемов грузооборота приведет к обострению рассматриваемой проблемы. На основании вышеизложенного, к основным предложениям по совершенствованию СТЭ переменного тока 25 кВ в условиях повышенных потенциалов рельсов считаем целесообразным отнести:

1. Отсоединение заземленных на рельсы устройств и сооружений с оборудованием выносных (индивидуальных) контуров заземления.
2. Ускоренное внедрение систем интервального регулирования движения поездов на основе GPS и ГЛОНАСС и других, предусматривающих обмен информацией о координате и скорости движения ЭПС посредством беспроводной связи (интернет, радиосвязь).

Заключение

1. Выполнен анализ факторов, влияющих на значения потенциалов рельсов относительно земли. Определено, что наибольшее влияние на значения потенциалов оказывает ток ЭПС.
2. Установлено, что в условиях тяжеловесного движения потенциал рельсов может существенно превышать допустимые по нормам электробезопасности и условиям нормального функционирования системы движения поездов значения.
3. В качестве основных мер для современных условий функционирования СТЭ переменного тока 25 кВ предложено выполнять отсоединение заземленных на рельсы конструкций, а также использование систем беспроводной связи при организации движения поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Наумов А.В. Выбор параметров и правила построения обратной тяговой рельсовой сети на электрифицированных железных дорогах со скоростным и тяжеловесным движением / А.В. Наумов, А.А. Наумов // – М.: Интекст, 2005 – 143 с.
2. Tryapkin. E., Ignatenko I., Vlasenko S., Onischenko A., Kovalev V.: Impact of return traction current harmonics on the value of the potential of the rail ground for the AC power supply system. Advances in intelligent systems and computing, pp. 117–127 (2020). ISSN: 2194-5357
3. Дынькин, Б. Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети монография / Б. Е. Дынькин ; ДВГУПС. – Хабаровск, 1999. – 170 с.
4. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К.Г. Марквардт –4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1982. – 528 с.
5. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока железных дорог / Е. П. Фигурнов, А. Л. Быкадоров, Ю. И. Жарков [и др.] // Электричество. – 2021. – № 11. – С. 35-44 с.

УДК 621.3

Павлова Мария Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Pavlova Mariia Nikolaevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Марущенко Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Marushchenko Sergey Grigorievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕТЕРОДИНА С КВАРЦЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ
SIMULATION OF THE OPERATION OF A HETERODYNE WITH QUARTZ FREQUENCY STABILIZATION

Аннотация. Целью данной работы является исследование на модели принципов работы гетеродина с кварцевой стабилизацией частоты. Определение по результатам моделирования стабильности генерируемой частоты и диапазона регулирования частоты. В статье рассматривается принцип работы гетеродинного приемника, основные типы гетеродинов, их досто-

инства и недостатки. Основное внимание уделено нестабильности частоты гетеродина, предложена схема гетеродина с кварцевой стабилизацией, реализована его модель и приведены результаты моделирования.

Abstract. The purpose of this work is to study the principles of operation of a quartz frequency stabilization heterodyne on a model. Determination of the stability of the generated frequency and frequency control range based on the simulation results. The article discusses the principle of operation of a heterodyne receiver, the main types of heterodynes, their advantages and disadvantages. The main attention is paid to the instability of the heterodyne frequency, a quartz-stabilized heterodyne circuit is proposed, its model is implemented, and simulation results are presented.

Ключевые слова: гетеродин, преобразование частоты, фазовый шум, нестабильность частоты, кварцевый резонатор.

Key words: heterodyne, frequency conversion, phase noise, frequency instability, quartz resonator.

Введение

Современные радиоприемные устройства строятся по гетеродинной схеме. Гетеродин – это маломощный генератор электрических колебаний, применяемый для преобразования частот сигнала супергетеродинных радиоприёмников.

Данный генератор является важнейшей частью супергетеродинного приемника, структурная схема, которого показана на рис. 1 [1]. Радиосигнал из антенны подается на вход усилителя высокой частоты, а затем на вход смесителя - специального элемента, осуществляющего операцию преобразования сигнала по частоте. На второй вход смесителя подаётся сигнал с гетеродина, который генерирует стабильный синусоидальный сигнал определенной частоты, отличающейся от частоты принимаемой радиостанции, подаваемый на смеситель, вследствие чего при вычитании частоты гетеродина из частоты принимаемого сигнала образуется промежуточная частота (ПЧ). Поскольку ПЧ является постоянной величиной, мы можем использовать для её фильтрации неизменный фильтр, настроенный на эту частоту. Это позволяет добиться высокой избирательности, не зависящей от частоты принимаемой радиостанции. Разностный сигнал постоянной ПЧ выделяется с помощью полосового фильтра и усиливается в усилителе ПЧ, далее поступает на демодулятор, восстанавливающий сигнал низкой (звуковой) частоты.

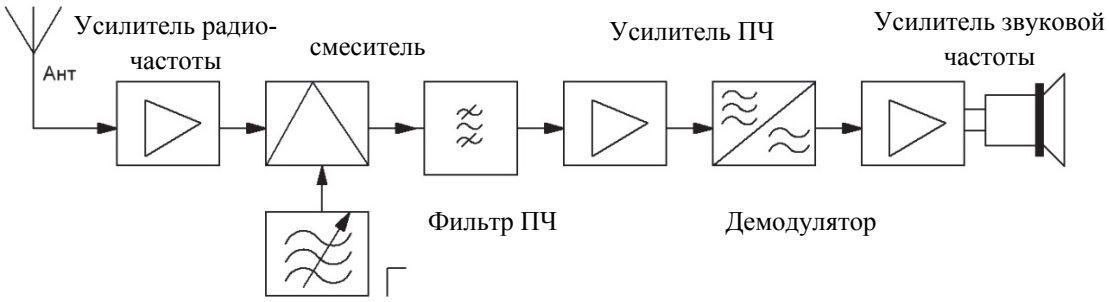


Рис. 1. Структурная схема супергетеродинного приемника

Существует несколько видов гетеродина:

1. LC – гетеродин, в котором частота задается катушкой и конденсатором, а перестраивается с помощью переменного конденсатора или же варикапа. Такой тип гетеродина прост в сборке, позволяет плавно перестраиваться в широком диапазоне (1 – 30 МГц), но обладает низкой стабильностью частоты и высоким уровнем фазового шума.

2. Кварцевый гетеродин. В нем используется кварцевый резонатор, в котором пьезоэлектрический эффект и явление механического резонанса применяются для построения высокодобротного резонансного элемента электронной схемы. Данный генератор обладает высокой стабильностью, низкими фазовым шумом, но не имеет возможности менять частоту, а диапазон перестройки – единицы КГц. Если гетеродин не будет менять частоту, приёмник

сможет принимать только единственную радиостанцию или очень узкий диапазон, что делает неисполнимым переключение каналов.

3. Синтезатор на основе фазовой автоподстройки частоты – гетеродин, содержащий синтезатор частоты, генератор, управляемый напряжением с разветвителем сигнала и петлевой фильтр низких частот. Петля ФАПЧ делит частоту выходного сигнала генератора, сравнивает полученный сигнал с опорным, а затем подстраивает управляющее напряжение генератора, чтобы его выходная частота была синхронизирована относительно известного опорного сигнала. У данного генератора кварцевый резонатор сохраняет свою частоту неизменной при изменении внешних условий. Также он обладает возможностью широкой перестройки. Несмотря на положительные качества генератора с ФАПЧ, уровень фазовых шумов значительно выше, нежели у гетеродина с кварцевым резонатором.

На основе анализа типов гетеродина было уделено внимание кварцевому гетеродину, как наиболее эффективному в использовании из-за низкого уровня фазовых шумов, высокой стабильности, а при внесении изменений в схему возможностью регулирования резонансной частоты.

Основная часть

За основу модели была выбрана схема генератора на двух транзисторах с положительной обратной связью в виде последовательного колебательного контура и параллельным соединением двух кварцевых резонаторов, описанная в [2] (рис. 2).

Отличительной особенностью данной схемы является реализация возможности регулирования резонансной частоты благодаря подключенным параллельно кварцевым резонаторам и последовательно с ними переменной емкостью. Но, к сожалению, NI Multisim - среда, в которой была разработана схема, не имеет возможности выполнять моделирование данной конфигурации из-за наличия кварцевых резонаторов.

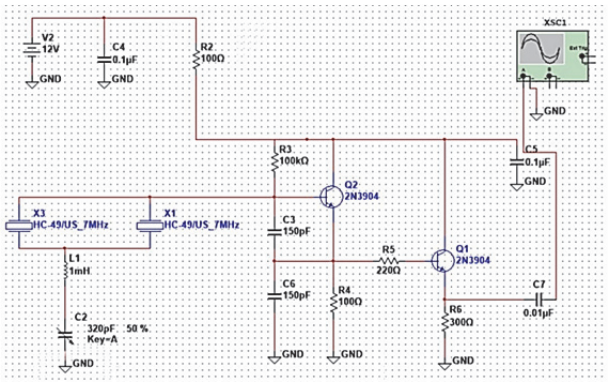


Рис. 2. Схема гетеродина с кварцевыми резонаторами

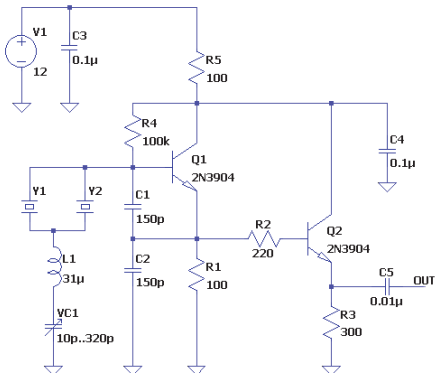


Рис. 3. Модель гетеродина в среде LTspice

Вследствие этого реализация модели была выполнена в программе LTspice. Схемная модель приведена на рис. 3.

В виду специфики расчета модели в программе LTspice, переменная емкость в схеме была заменена эквивалентной схемой замещения (рис. 4).

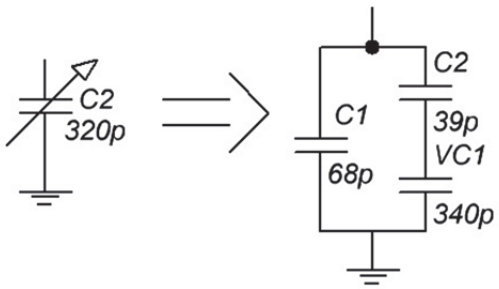


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения переменной емкости

Моделирование данной схемы показало на выходе наличие квазигармонического сигнала (рис.5) с довольно богатым спектральным составом (рис.6).

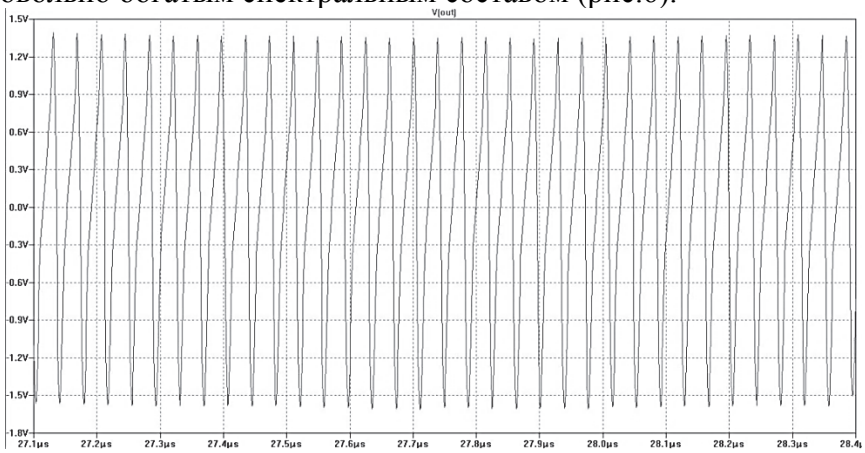


Рис. 5. Выходной сигнал, полученный в результате моделирования схемы

Из спектральной диаграммы видно, что в спектре выходного сигнала присутствуют гармоники с частотами 4,4 МГц, 5,2 МГц, 6,8 МГц 7,2 МГц. Необходимую частоту гармоники можно выделить соответствующим фильтром.

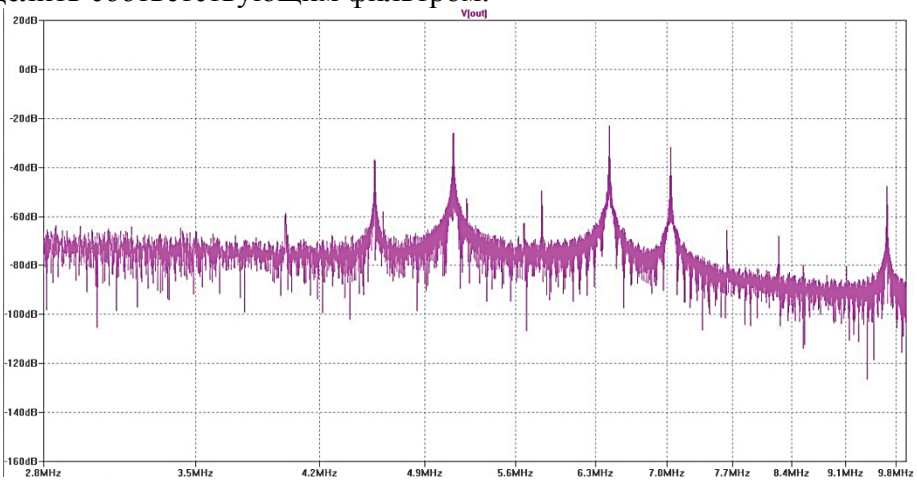


Рис. 6. Спектр выходного сигнала

Моделирование проводилось для двух крайних значений переменной емкости: VC1= 12 пФ и VC1= 320 пФ. На обоих значениях емкости наблюдалась устойчивая генерация.

Заключение

Полученные результаты подтвердили работоспособность предлагаемой схемы гетеродина с кварцевой стабилизацией частоты. Основываясь на данных, моделирования был определен диапазон регулирования частоты, который составил 600 кГц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. [Супергетеродинный радиоприёмник] // РУВИКИ : [сайт]. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Супергетеродинный_радиоприёмник.

2. Генератор переменной частоты Super VXO // eax.me : [сайт]. – 2020. – 5 авг. – URL: https://eax.me/2020/2020-08-05-supervxo.html.

УДК 621.3
Павлова Мария Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Pavlova Mariia Nikolaevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Alexey Valerievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО СЛИП-КОРРЕКТОРА
DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC SLIP-CORRECTOR

Аннотация. Целью работы является разработка носимого устройства, предназначенного для электростимуляции гипоталамуса через вестибулярный нерв в рамках борьбы с бессонницей и тревожностью. В статье представлены: анализ способов борьбы с бессонницей и разработанная электрическая схема устройства, обеспечивающего генерирование стимулирующих импульсов тока и позволяющее контролировать и корректировать работу через смартфон.
Abstract. The purpose of the research work is to develop a wearable device designed for electrostimulation of the hypothalamus as part of the fight against insomnia and anxiety.
The article presents an analysis of ways to insomnia treatment and a developed electrical circuit for a device that generates stimulating current pulses and allows for control and adjustment via a smartphone.
Ключевые слова: гипоталамус, электростимуляция, ток, бессонница, электрическая схема.
Keywords: hypothalamus, electrostimulation, current, insomnia, electrical diagram.

Введение

Бессонница - нарушение сна, которое характеризуется проблемами с засыпанием, поддержанием непрерывного сна или преждевременным пробуждением. Это приводит к недостаточной продолжительности или качеству сна, вследствие чего возникает чувство неудовлетворённости и дневная утомляемость. Бессонница является источником множества проблем и негативно влияет на качество жизни. К последствиям данной болезни относятся нарушение физиологических процессов, как например, обмен веществ, иммунная защита и регуляция гормонов аппетита, и ухудшение эмоционального состояния, характеризующееся снижением эмоциональной устойчивости, повышением уровня стресса, тревожности и увеличением риска развития психических расстройств.

Часть головного мозга, отвечающая за циркадные ритмы, бессонницу и гомеостаз организма - гипоталамус - структура, функционирующая как связующее звено между нервной и эндокринной системами. Нейросекреторные клетки гипоталамуса получают сигналы от высших отделов головного мозга, анализируют информацию о состоянии внутренней среды организма и в ответ выделяют специфические гормоны.

Разбор аналогов

Существует множество средств борьбы с бессонницей [1, 2]:

1. Травы с успокаивающим эффектом, которые входят в состав аптечных чаев. К таким травам относятся ромашка, мелиса, пустырник, валериана лекарственная и боярышник. Биологически активные вещества, содержащиеся в травяных сборах, мягко воздействуют на центральную нервную систему, замедляя передачу нервных импульсов, тем самым уменьшая реакцию на внешние раздражители, и усиливая тормозные процессы в коре головного мозга, что помогает организму естественным образом перейти в состояние покоя и сна. Но при всех положительных аспектах травяные сборы не универсальный вариант в борьбе с бессонницей, ведь они могут развить эффект «привыкания», негативно влияют на печень и почки, имеют такие побочные эффекты, как постоянная сонливость и снижение концентрации, противопоказаны людям с тяжелыми заболеваниями ЦНС (депрессия), а некоторым и вовсе могут не помочь.

2. Лекарственные средства, такие как мелатонин, гормон, регулирующий цикл сна и бодрствования, антигистаминные и снотворные эффективны для быстрого засыпания, помо-

гает при сбое циркадных ритмов, в некоторых случаях легкую тревожность. Но при этом мелатонин обладает низкой эффективность при хронической бессоннице, а антигистаминные и снотворное вызывают сильное привыкание.

3. Физическая активность способствует нормализации циклов сна. Как например, йога, бег, ходьба и аэробные тренировки увеличивает продолжительность сна и повышает его эффективность. В отличие от лекарств, физические упражнения содействуют снижению кортизола, повышению мелатонина и нейротрофического фактора, улучшающий соотношение фаз сна и когнитивные функции. Но не правильный подход к тренировкам может усугубить проблемы со сном. Высокоинтенсивные тренировки менее чем за 1-2 часа до сна повышают частоту сердечных сокращений, температуру и адреналин, что способствует увеличению цикла бодрствования. Также чрезмерные нагрузки вызывают симптомы, противоположные желаемым.

4. Одним из самых эффективных методов в борьбе с бессонницей является нейростимуляция, предусматривающая воздействие на отделы головного мозга сигналами различной природы.

Виды нейростимуляторов [3, 4]:

1. Аудиостимуляция широко применяется в исследованиях сна. Звуковые стимулы околопороговой интенсивности на различных стадиях сна применяют для ускорения засыпания и углубления сна. Помимо воздействия на сон, улучшается общее самочувствие и когнитивные функции в бодрствовании.

2. Транскраниальная магнитная стимуляция - это неинвазивный метод, который использует магнитные импульсы для нормализации повышенной активности мозга, характерной для бессонницы. Современные исследования подтверждают его эффективность, особенно при использовании низкочастотного протокола. ТМС снижает возбудимость головного мозга и способствует восстановлению нейронных связей благодаря низкочастотной стимуляции (1 Гц). Несмотря на быстрый результат, безопасность проведения процедуры и доказанную эффективность, транскраниальная магнитная стимуляция противопоказана людям с ферромагнитными металлическими имплантатами в голове, имеет побочный эффект в виде легкой и быстропроходящей головной боли или чувства дискомфорта в области стимуляции. К сожалению, к данному методу не каждый человек имеет доступ в силу дорогостоящего оборудования.

3. Наиближайший аналог предлагаемой разработке – Modius Sleep с системой VeNS – электрической стимуляции вестибулярного нерва. На сегодняшний день это самый эффективный доказанный метод лечения бессонницы через воздействия на системы, связанный с гипоталамусом. Modius Sleep – портативное, неинвазивное устройство, исключающее побочные эффекты. Электроды, прикреплённые за ушами, выдают безопасный импульсный ток низкой частоты (0,25 Гц – 1 мА), который активирует работу гипоталамуса, дабы запустить естественный процесс засыпания.

В связи с вышеизложенным, задача настоящей статьи заключается в разработке неинвазивного портативного устройства отечественного производства, имеющего форму ободка с электродами, выдающими импульсный ток низкой частоты. Разрабатываемое устройство отличается от американского аналога возможность управления через телефон и отслеживания динамики улучшения сна, что может позволить врачу удаленно корректировать лечение.

Схема устройства

Разработанное устройство (рис. 1) содержит следующие компоненты:

- кнопка управления SB1;
- микроконтроллер (МК) U1;
- никель-металл гибридный аккумулятор G1;
- аттенюатор A1;
- фильтр нижних частот Z1;
- регулируемый усилитель A2;
- преобразователь «напряжение – ток» U2;
- дискретный светодиодный индикатор HG1.

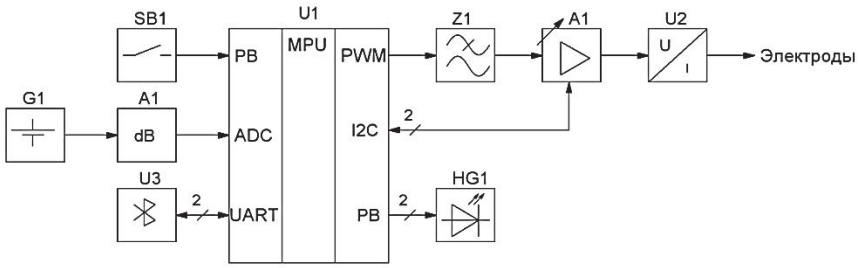


Рис. 1. функциональная схема

Схема работает следующим образом. Для начала работы нажимается кнопка SB1. После чего МК начинает генерировать аналоговые сигналы. Для отключения прибора необходимо повторно нажать на указанную кнопку.

Генератор сигналов работает следующим образом. В память МК записаны значения отсчётов генерируемого сигнала. Преобразование отсчётов в аналоговый сигнал выполняется с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) по схеме ЦАП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), при чём ШИМ используется из состава МК. Для преобразования ШИМ сигнала в аналоговый используется пассивный фильтр нижних частот Z1. Для регулирования амплитуды генерируемых сигналов используется усилитель с регулируемым коэффициентом усиления A2. Управление коэффициентом усиления осуществляется по шине I2C. Преобразователь U2 преобразует сигналы напряжения в токовые. Кроме того, блок U2 ограничивает максимальный ток и максимальное напряжение, подаваемые на электроды.

Во время работы на дискретном индикаторе HG1 отображается режим работы. Кодирование режима работы выполняется цветом (используется двухцветный индикатор): зелёный, оранжевый, красный; а также режимом свечения: непрерывный, мигающий.

Для своевременного выявления разряда аккумулятора используется схема измерения напряжения аккумулятора, состоящая из аттенюатора A1 и аналого-цифрового преобразователя из состава МК.

Для связи с мобильным устройством управления на базе смартфона или планшетного компьютера используется BlueTooth модуль U3, подключенный к МК по шине UART.

Для обеспечения электробезопасности разработанное устройство имеет автономное низковольтное электропитание и схему защиты от высоких токов.

Заключение

В рамках данной работы была разработана электрическая схема «слип-корректора», предназначенного для лечения бессонницы путем воздействия на гипоталамус через электростимуляцию вестибулярного нерва, что запускает естественный процесс засыпания. Данное устройство обеспечивает возможность управления через смартфон и удаленной корректировки лечения врачом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорохов, Е. В. Нейротехнологии нефармокологической терапии нарушений сна / Е. В. Дорохов [и др.] // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2022. – Т. 72, №1. – С.22.

2. Физиотерапия инсомний: современные представления (обзор) / О. Л. Кирюхин, Л. Е. Дерягина, С. В. Булатецкий, Е. П. Глушкова // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2025. – Т. 17, № 4. – С. 611-658. – DOI 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1185.

3. Патент № 2078556 C1 Российская Федерация, МПК A61H 39/00, A61N 5/02. Устройство для поиска и радиочастотного воздействия на биологически активные точки кожного покрова организма : № 5015482/14 : заявл. 05.12.1991 : опубл. 10.05.1997 / О. Е. Столетова, М. Г. Голубков, Я. Г. Тарновский [и др.].

4. Опыт восстановительного лечения пациентов с постковидным синдромом в условиях санаторно-курортной организации / А. А. Нижегородцева, И. И. Урусова, А. В. Молчанова, А. Ю. Дзюбенко // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2021. – Т. 98, № 3-2. – С. 134-135.

УДК 621.3
Павлова Мария Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Pavlova Mariia Nikolaevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Alexey Valerievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАСТОЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ РАБОТНИКОВ НА ОСНОВЕ RFID МЕТОК
UNIVERSAL DESKTOP PLATFORM FOR TRAINING HEALTHCARE PROFESSIONALS BASED ON RFID TAGS

Аннотация. Целью проекта является разработка универсальной настольной платформы на основе RFID меток, предназначенной для упрощения процесса обучения медицинских работников. Итоговым результатом является полноценное устройство, состоящее из настольной платформы с дисплеем хорошего качества, на который выводится изображение (рентген кисти, внутреннее строение мозга и т.п.), RFID/NFC считывателей, кнопок для выбора обучающей программы и набора отдельных кубиков с RFID/NFC метками, которые необходимо будет выставлять в нужной последовательности, в зависимости от изображения. Таким образом, обучающийся сопоставляет выделенный на изображении объект (кость кисти, ткань мозга и т.п.) с его названием, путем установки кубиков с RFID метками на нужные RFID считыватели.
Abstract. The project goal is to develop a universal desktop platform based on RFID tags, designed to simplify the training process for medical professionals. The final result is a full-fledged device consisting of a desktop platform with a good quality display, which displays an image (X-ray of the hand, internal structure of the brain, etc.), RFID/NFC readers, buttons for selecting a training program and a set of individual cubes with RFID/NFC tags, which will need to be set in the right sequence, depending on the image. Thus, the student matches the object highlighted in the image (hand bone, brain tissue, etc.) with its name by placing the cubes with RFID tags on the appropriate RFID readers.
Ключевые слова: обучение, игровая форма, RFID, запоминание информации, электрическая схема.
Key words: learning, game form, RFID, memorization of information, and an electrical circuit.

Введение

Одной из основных проблем обучения медицинских работников является огромное количество терминов и названий все возможных заболеваний, препаратов, строения органов и т.д., которые требуется запомнить.

Универсальная настольная платформа для обучения медицинских работников на основе RFID меток позволит существенно упростить процесс запоминания за счет средства геймификации.

Существует множество аналогов данному проекту, например, платформы для обучения детей (физические программируемые игрушки), использующие физические блоки для управления цифровым контентом. Ближайший аналог по механике взаимодействия, но подходящие только для детей. Также существуют интерактивные анатомические паззлы, представляющие собой физические модели органов (с метками), которые нужно правильно собрать на платформе. Платформа проверяет правильность сборки и дает обратную связь. Данное устройство высокотактильное, помогает эффективно запомнить важную информацию, но имеет недостаток: ограничение в темах.

Предложенная разработка поможет в игровой форме запомнить информацию в различных сферах, как, например, в анатомии, биологии и даже в электронике. В предлагаемой

статье я бы хотела подробнее описать принцип работы одной из важных частей устройства – электронная составляющая, обеспечивающая работу настольной обучающей платформы.

Техническая характеристика

На основании обзора аналогов и поставленных задач были разработаны следующие требования к проектируемому устройству. Электронная часть настольной обучающей платформы должна обеспечивать считывание состояния 10 ответов, обеспечить работу с 10 вариантами ответов, содержать экран, пульт управления (клавиатуру, жк дисплей, светодиоды), блок управления экраном, систему считывания ответов, блок питания. Связь между блоком управления экраном и системой считывания ответов осуществляется по параллельной 4х проводной шине (передача номера картинки) и однопроводной шине (готовность к тесту), способ считывания ответов бесконтактный с помощью rfid меток. Устройство получает питание от сети 220В 50Гц, также предусмотрено питание от аккумулятора.

Алгоритм работы настольной платформы:

1. Включение платформы;
2. С помощью кнопок выбирается картинка с определениями;
3. При постановке кубиков в ячейки программа считывает ответ;
4. Загорается индикатор, показывающий правильность ответа.

Схема обучающей платформы

Разработанная схема (рис. 1) содержит следующие устройства: RFID метки (10шт), дисплей, одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 5, плата Arduino uno, светодиод (20шт), кнопки управления, RFID считыватель RC522 , дисплей ЖК, дешифратор, регистр.

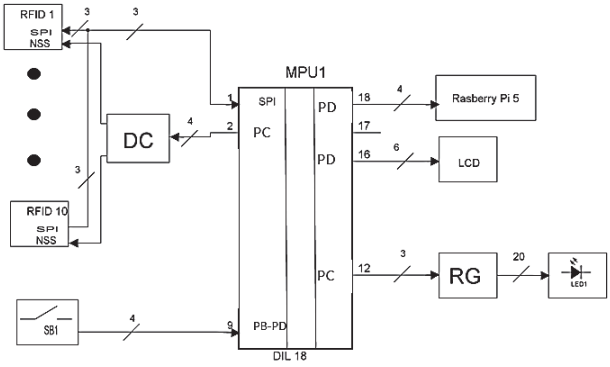


Рис. 1. Функциональная схема

Схема работает следующим образом. Кубики с вариантом ответа содержат в себе RFID метки. Для определения правильности ответа кубик помещается в одну из десяти ячеек, в каждой из которых размещён считыватель RFID меток (RFID1 – RFID10). Считыватели управляются по шине SPI с независимым подключением подчинённых устройств. При этом для экономии портов микроконтроллера MPU1 используется дешифратор адреса DC на шине выбора подчинённого устройства.

Микроконтроллер MPU1 получает со считывателей RFID меток номера кубиков, помещённых в соответствующие ячейки, затем полученные данные сравнивает с заданными правильными ответами и формирует сигналы управления индикаторами LED1.

Всего используется 10 двухцветных светодиодных индикатора LED1, размещенных рядом с ячейками для ответов – по одному индикатору рядом с каждой ячейкой. Если ответ правильный, то соответствующий индикатор светится зелёным цветом, если ошибочный – красным цветом. Для экономии портов микроконтроллера индикаторы подключаются через два 10-разрядных регистр сдвига RG, для управления которыми используются три сигнала (данные, тактовый, выдачи данных).

Для выбора вопроса предусмотрена клавиатура SB1, состоящая из четырёх кнопок: больше, меньше, ввод, отмена. Кнопки подключаются непосредственно к микроконтроллеру. Для индикации номера выбранного вопроса предусмотрен жидкокристаллический дисплей-

ный модуль LCD. Модуль подключается по стандартной шести проводной параллельной шине к микроконтроллеру.

Тестовое задание в виде изображения воспроизводится на отдельном дисплее, который управляется с помощью одноплатного компьютера RaspberryPi. В памяти указанного компьютера размещаются до 15 изображений заданий. Для выбора номера отображаемого задания используется четырёхпроводная параллельная шина, по которой передаётся двоичный код задания. Код «0» соответствует режиму работы «Стоп».

Заключение

В рамках данной работы была разработана схема универсальной настольной обучающей платформы на основе RFID-меток, предназначенной для повышения эффективности и интерактивности процесса обучения медицинских специалистов. Устройство представляет собой комплексное решение, интегрирующее аппаратные и программные компоненты для тактильного и визуального изучения анатомических структур.

Благодарности

Выражаю благодарность руководителю проекта Фролову Алексею Валерьевичу за помощь в реализации устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Инструкция по работе с RFID-модулем RC522 для Arduino [Электронный ресурс] // Instructables. – URL: https://www.instructables.com/.
2. Ziv A. et al. Simulation-based medical education: an ethical imperative //Academic medicine. – 2003. – Т. 78. – №. 8. – С. 783-788.
3. Официальный сайт Tangible Media Group, MIT Media Lab [Электронный ресурс]. – URL: https://tangible.media.mit.edu
4. Образовательные проекты с RFID/NFC [Электронный ресурс] // Hackster.io. – URL: https://www.hackster.io.

УДК 681.5.01

Петровский Константин Павлович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Petrovskiy Konstantin Pavlovich, Student, Komsomolsk-na-Amure State University
Савельев Дмитрий Олегович, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Savelyev Dmitriy Olegovich, Senior Lecturer, Komsomolsk-na-Amure State University
Сбитнев Никита Романович – студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sbitnev Nikita Romanovich, Student, Komsomolsk-na-Amure State University

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
THE APPLICATION OF HIGH-PRECISION MODELING IN THE CONTEXT OF THE DEVELOPMENT OF MODERN CONTROL SYSTEMS

Аннотация. Статья посвящена анализу проблем традиционного моделирования и современным решениям в области высокоточного моделирования. В частности, применения высокоточного моделирования и HIL-тестирования. Описана концепция высокоточных решений в области имитационного моделирования систем управления. Рассмотрены экономическая и техническая составляющие при проектировании и тестировании высокоточных систем управления.

Abstract. The article analyzes the challenges of traditional modeling and explores modern solutions in the field of high-fidelity modeling, with a particular focus on the application of high-fidelity modeling and HIL-testing. It describes the concept of high-fidelity solutions in the field of simula-

tion modeling of control systems. The economic and technical aspects of designing and testing high-fidelity control systems are also examined.
Ключевые слова: высокоточное моделирование, система управления, HIL-моделирование, имитационная модель.
Key words: high-precision modeling, control system, HIL-modeling, simulation model.

Введение

С учетом современного развития и усложнения автономных систем и мобильной робототехники всё чаще возрастает значимость проектирования отдельных компонентов при моделировании алгоритмов управления. Эффективность управления объектом напрямую зависит от того насколько точно имитационная модель отражает реальный объект [1], не смотря на используемую архитектуру управления (централизованную или децентрализованную). Традиционно, на этапе разработки имитационных моделей, используются упрощённые кинематические схемы, однако на практике такой подход несёт в себе определённые риски и существенные недостатки при переносе на физическое устройство [2].

Проблематика традиционного моделирования

Основная проблема традиционного подхода к моделированию перемещения объектов управления заключается в недостаточном соответствии между имитационной моделью и физическим объектом. Большинство имитационных моделей и симуляторов оперируют идеализированными кинематическими зависимостями, где объект управления рассматривается как материальная точка или твёрдое тело без учёта физических параметров и динамических характеристик. Это приводит к ряду неточностей, таких как мгновенное перемещение, некорректность алгоритмов поиска траектории и игнорирование масштабируемости. Алгоритмы управления составлены для идеализированных условий, оказываются не эффективными в системах.

Концепция высокоточного моделирования

Для исключения выше описанных проблем необходимо использование детального моделирования объекта. В теории управления данный подход классифицируется как высокоточное моделирование (high-fidelity modeling). Ключевые принципы данного подхода включают в себя такие особенности как учёт динамики приводов роботизированной платформы, учёт физических характеристик, а также нелинейные факторы, обусловленные аппаратной реализацией. Такой подход позволяет выявить ошибки управления на этапе прототипирования имитационной модели объекта, предотвращая повреждения оборудования при натурных испытаниях.

Применение HIL-моделирования

Особую актуальность высокоточное моделирование приобретает при проведении испытаний на реальных объектах управления, либо при HIL-моделировании (hardware-in-the-loop), когда реальный контроллер тестируется в виртуальной среде, имитирующей объект управления. В случае, когда используется упрощенная модель объекта управления, контроллер получает некорректные значения по обратной связи, что приводит к ошибкам в работе настроенных в ходе тестов регуляторов и, соответственно, неправильной работе на реальном объекте. Так как объект управления находится в виртуальной среде, становится доступны проверки, которые традиционно тестируются на поздних этапах разработки, такие как моделирование аварий, короткое замыкание, падения напряжений и т.д. Такой подход позволяет безопасно и без риска для оборудования тестировать и настраивать устройство.

Для того чтобы использовать аппаратно-программное моделирование (далее HIL-моделирование), необходим контроллер, который позже будет использоваться в реальной системе. Имитационная модель такого контроллера должна быть максимально приближена к объекту управления для точной настройки и тестирования данного.

Практические аспекты внедрения высокоточных моделей

Достижение максимальной приближенности имитационной модели к реальному объекту требует системного подхода на этапе проектирования. В отличие от упрощенных кинематических и электромеханических схем, создание высокоточной модели предполагает этап

идентификации параметров, включающий в себя сбор физических данных и характеристик объекта, а также электроприводов [3]. Данный процесс часто итеративен, так как исходная имитационная модель калибруется по результатам тестовых запусков реального прототипа. Такой процесс позволяет минимизировать расхождение между имитационной моделью и физическим устройством, приближая ее к цифровому двойнику.

Несмотря на приведенные преимущества, высокая детализация физики процессов требует больших вычислительных ресурсов, что может стать ограничением и повлиять на работу в реальном времени. Однако развитие вычислительной техники и оптимизация алгоритмов позволяют интегрировать высокоточные модели в контур HIL-моделей для тестирования без критических задержек при симуляции. Также использование таких моделей открывает возможности для создания цифровых двойников, которые сопровождают роботизированную систему на протяжении всего жизненного цикла, позволяя прогнозировать износ оборудования и оптимизировать режимы ее эксплуатации [4].

Экономическая и техническая эффективность

Переход к высокоточному моделированию и HIL-тестированию обусловлен не только техническими, но и экономическими факторами. Отладка алгоритмов управления на упрощенных моделях часто приводит к выявлению критических ошибок уже на этапе натурных испытаний, что влечет за собой простои, повреждение дорогостоящего оборудования и необходимость доработок. Виртуальная отработка сценариев работы систем управления, включая аварийные ситуации и предельные режимы работы, позволяет устранить большинство дефектов до момента физического запуска на объекте управления. Тестирование алгоритмов управления на реальном роботе в экстремальных условиях может представлять угрозу для персонала и окружающей инфраструктуры. Высокоточная виртуальная среда позволяет безопасно моделировать столкновения, отказы датчиков и потерю устойчивости управления, обеспечивая не только надежность системы управления, но и безопасность перед допуском к реальной эксплуатации [5].

Заключение

Проведённый в статье анализ демонстрирует, что традиционные методы моделирования, основанные на упрощенных кинематических зависимостях, становятся недостаточными для современных задач в мобильной робототехнике. Игнорирование физических ограничений приводит к существенным расхождениям между поведением модели и реального объекта, что выражается в эффектах мгновенного перемещения, ошибках навигации и нестабильности управления.

Внедрение высокоточного моделирования в совокупности с технологией HIL-моделирования и тестирования позволяет воссоздать физическую среду в виртуальных условиях, максимально приближенную к реальным условиям эксплуатации. Такой подход к имитационному моделированию систем управления обеспечивает возможность безопасной отработки аварийных сценариев, точной настройки регуляторов и значительного снижения финансовых рисков внедрения. Таким образом, детальное воспроизведение физических характеристик объекта управления является необходимым условием для создания надёжных, эффективных и безопасных автономных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сбитнев Н. Р. Повышение точности имитационной модели на основе физической мехатронной системы / Н. Р. Сбитнев, Д. О. Савельев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 265-268. – EDN MOOPGK.

2. Емельянов К. А. Исследование методов аппаратной оптимизации алгоритмов управления сложных кинематических систем по быстродействию / К. А. Емельянов, С. П. Черный // Техника и технология современных производств : Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пенза, 12–13 апреля 2021 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2021. – С. 15-18. – EDN ISUYAA.

3. Сбитнев Н. Р. Повышение точности имитационной модели на основе физической мехатронной системы / Н. Р. Сбитнев, Д. О. Савельев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 265-268. – EDN MOOPGK.

4. Логинов Б. М. Методика создания цифровых двойников электромеханических систем на основе Simulink Real Time и моделирования HIL-/ Б. М. Логинов // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 2(67). – С. 35-44. – DOI 10.18503/2311-8318-2025-2(67)-35-44. – EDN LCCUMC.

5. Kukartseva O. I. Simulation modeling of production processes at the enterprise / O. I. Kukartseva, O. V. Kuimova // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2022. – No. 21. – P. 277-278. – EDN HJWMHY.

УДК 621.38

Подоляк Елена Викторовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Podolyak Elena Viktorovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Любушкина Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Liubushkina Nadezhda Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics and Innovative Technologies, Komsomolsk-on-Amur State University

РАЗРАБОТКА РЕФЛЕКТОМЕТРА
DEVELOPMENT OF A REFLECTOMETER

Аннотация. Данная работа посвящена разработке лабораторного TDR-рефлектометра для диагностики силовых кабельных линий. Рассмотрены методы диагностики, проведен анализ существующих технических решений и предложена структура устройства. Разработанное решение обеспечивает определение расстояния до повреждения кабеля с высокой точностью при низких затратах.

Abstract. This work is devoted to the development of a laboratory TDR reflectometer for the diagnostics of power cable lines. The methods of diagnostics are considered, the analysis of existing technical solutions is carried out, and the structure of the device is proposed. The developed solution provides the determination of the distance to the cable damage with high accuracy at low cost.

Ключевые слова: рефлектометрия, TDR, кабельные линии, диагностика, микроконтроллер.
Key words: reflectometry, TDR, cable lines, diagnostics, microcontroller.

Введение

Силовые кабельные линии используются для передачи электрической энергии и подвержены различным повреждениям: обрывам, коротким замыканиям и пробоям изоляции. Такие дефекты требуют оперативной локализации для минимизации простоев.

Наиболее эффективным методом диагностики является импульсная рефлектометрия (далее TDR), позволяющая определить расстояние до повреждения по времени отражения сигнала. В отличие от традиционных методов, TDR обеспечивает высокую точность и неразрушающий контроль [1.2].

Целью данной работы является разработка доступного TDR-рефлектометра для прелокализации повреждений (обрывы, КЗ, утечки $R_{ш}$ <500 Ом) на дистанции до 2 км с точностью ±1 м при волновом сопротивлении кабеля 25-100 Ом. Разработка ведется с учетом современных требований к средствам неразрушающего контроля, стандартов в области электроэнергетики и особенностей эксплуатации кабельных линий, регламентирующих надежность, точность и безопасность диагностики [3].

Основная часть

Существуют различные методы диагностики кабелей – измерение сопротивления изоляции, частичные разряды, тепловизионный контроль и рефлектометрия.

Наиболее эффективным является TDR-метод, основанный на регистрации отраженного импульса от неоднородностей линии. Расстояние до дефекта определяется по времени задержки сигнала.

Преимущества метода:

- высокая точность (до ±1%);
- возможность локализации повреждения;
- неразрушающий контроль.

Были рассмотрены существующие рефлектометры TDR-410, TDR500/3 и РИ-407.

Основные недостатки аналогов:

- высокая стоимость;
- сложность эксплуатации;
- избыточный функционал для учебных задач.

Это обуславливает необходимость разработки доступного лабораторного устройства [4].

Схема разработанного устройства

Структурная схема лабораторного рефлектометра представлена на рис. 1.

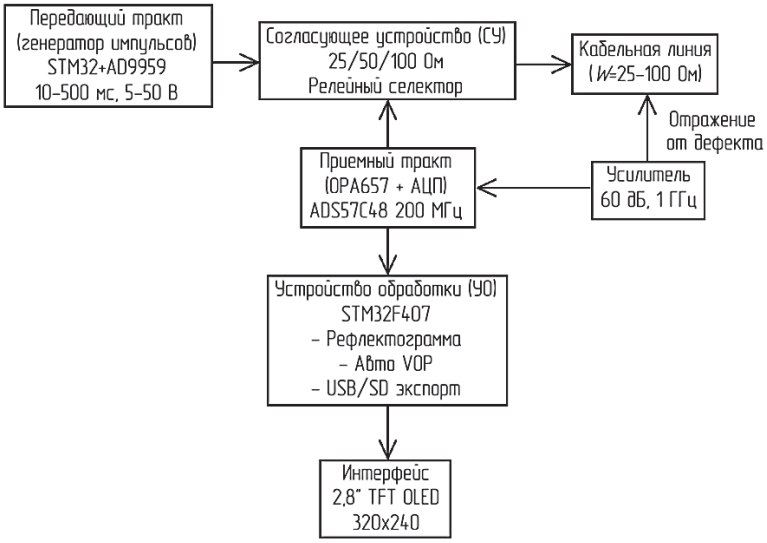


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого TDR-рефлектометра

Описание блоков структурной схемы:

- передающий тракт – микроконтроллер STM32F407 управляет DDS-генератором AD9959 (импульсы 10 – 500 нс) или дискретным генератором на MOSFET IRF510. Амплитуда 5 – 50 В, регулируемая;

- согласующее устройство (СУ) – релейный переключатель с номиналами 25/50/100 Ом для импедансного согласования с кабелем (ВВГ, АСБ, СИП);

- приемный тракт – широкополосный операционный усилитель OPA657 (1,6 ГГц) + АЦП ADS58C48 (8 бит, 200 МС/с) или встроенный АЦП STM32 (12 бит, 2,4 МС/с);

- устройство обработки – STM32F407 (168 МГц) выполняет деконволюцию, расчет VOP, определение дефектов и построение рефлектограммы;

- интерфейс – цветной TFT-дисплей 2,8" (320×240), USB Type-C и MicroSD для экспорта трасс в CSV.

Принцип работы – зондирующий импульс проходит через СУ в кабель, отражается от дефекта, усиливается, оцифровывается и отображается как рефлектограмма. Расстояние до дефекта:

$$d = \frac{c \cdot VOP \cdot t}{2},$$

где VOP калибруется автоматически.

Параметры разрабатываемого TDR-рефлектометра приведена в табл. 1.

Таблица 1

Параметры TDR-рефлектометра

Параметр	Значение
Дальность измерений, м	0 – 2000
Точность расстояния	±1% (2 м)
Разрешение, м	0,5-1
Частота дискретизации, МГц	200
Перекрываемое затухание, Дб	≥80

Программная реализация рефлектометра будет выполнена на языке C++ в Keil для STM32CubeIDE контроллера. Программу будет выполнять: автоматический расчет расстояния по первому отрицательному/положительному пику; калибровку VOP по известной длине кабеля; сохранение 50 трасс на SD-карту; экспорт в CSV для анализа в Python/MATLAB [5].

Заключение

Разработанный рефлектометр обеспечит выполнение учебных задач по диагностике силовых кабелей с параметрами, близкими к промышленным аналогам, при минимальных затратах. Преимущества предлагаемого решения^ экономичность – стоимость разработки около 10 тыс. руб. в сравнении с аналогами 150-500 тыс. руб.; универсальность – силовые кабели ВВГ, АСБ, СИП, контрольные КВВГ; обучаемость – открытая архитектура STM32; интеграция – USB/Python для учебных лабораторий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максина, Е. Л. Радиотехника : учебное пособие / Е. Л. Максина. — 2-е изд. — Саратов : Научная книга, 2019. — 159 c. — ISBN 978-5-9758-1774-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/81047.html (дата обращения: 03.04.2026).

2. Токарев, А. Б. Статистическая радиотехника : лабораторный практикум / А. Б. Токарев. — Воронеж : Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2024. — 242 c. — ISBN 978-5-7731-1167-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/141249.html (дата обращения: 03.04.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

3. Синицын, Ю. И. Основы радиотехники : учебное пособие для СПО / Ю. И. Синицын, Е. И. Ряполова. — Саратов : Профобразование, 2020. — 246 c. — ISBN 978-5-4488-0550-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/92138.html (дата обращения: 03.04.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

4. Березовский, П. П. Основы радиотехники и связи : учебное пособие / П. П. Березовский ; под редакцией Л. Г. Доросинского. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2017. — 212 c. — ISBN 978-5-7996-2093-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/106751.html (дата обращения: 03.04.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

5. Самойлов, С. А. Программирование логических интегральных схем в радиотехнике : учебное пособие / С. А. Самойлов. — Владимир : Издательство Владимирского государственного университета, 2024. — 148 c. — ISBN 978-5-9984-1817-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/143832.html (дата обращения: 03.04.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

УДК 621.3
Пукас Александр Юрьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Alexander Yurevich Pukas – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-naAmure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Aleksei Valerevich Frolov, PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru

СТЕНД ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ
INPUT CONTROL STAND FOR INDUSTRIAL VENTILATION CONTROL SYSTEMS

Аннотация. Приводятся результаты разработки стенда контроля систем управления приточными и вытяжными вентиляционными системами. Стенд включает в себя: имитаторы термометров сопротивления типа Pt1000; имитаторы дискретных сигналов типа «сухой контакт»; стенд контролирует сигналы силовых цепей 220/380 В, слаботочные дискретные сигналы «сухой контакт» и «+24 В», аналоговые сигналы 0-10 В. Под управлением микроконтроллера стенд имитирует работу реальных систем вентиляции: канальные датчики температуры, дифференциальные реле давления воздуха, температурное реле, систему пожарной и аварийной сигнализации, преобразователи частоты, циркуляционный насос внутреннего контура отопления, электроприводы воздушных заслонок. Стенд позволяет имитировать как штатные, так и аварийные ситуации. В схеме предложено оригинальное решение имитаторов термометров сопротивления на основе импульсного цифрового потенциометра, отличающееся схемной простотой и дешевизной.
Abstract. The results of the development of a test bench for control systems of supply and exhaust ventilation systems are presented. The test bench includes: Pt1000 resistance thermometer simulators; dry contact discrete signal simulators; the test bench monitors 220/380 V power circuit signals, low-current dry contact and +24 V discrete signals, and 0-10 V analog signals. Under the control of a microcontroller, the stand simulates the operation of real ventilation systems: duct temperature sensors, differential air pressure switches, temperature switches, fire and emergency alarm systems, frequency converters, a circulation pump for the internal heating circuit, and electric drives for air dampers. The stand allows simulating both normal and emergency situations. The circuit proposes an original solution for simulating resistance thermometers based on a digital pulse potentiometer, distinguished by its simple design and low cost.
Ключевые слова: стенд, входной контроль, вентиляция, система управления, имитация.
Key words: stand, input control, ventilation, control system, simulation.

Введение

В настоящее в России много производителей систем вентиляции, а сами системы достаточно разнообразные. Нет единого стандарта, а это значит, что, системы управления промышленной вентиляцией индивидуальны, собираются под конкретный проект. В связи с мелкосерийным, и даже индивидуальным, характером производства систем управления вентиляцией в практике наблюдаются ошибки как в электрических схемах, допускаемых на этапах сборки шкафов управления, так и дефекты программного обеспечения контроллеров этих шкафов. В результате указанные ошибки зачастую приводят к аварийным ситуациям, возникающих как при пуско-наладочных работах, так и во время дальнейшей эксплуатации при стечении ряда определённых обстоятельств. Поэтому для своевременного выявления дефектов шкафов управления вентиляционными установками и предотвращения аварийных

ситуаций необходим входной контроль указанных систем управления с имитацией работы реальных датчиков и исполнительных устройств в различных режимах, включая аварийные.

Существующие стенды комплексной проверки систем управления вентиляционными установками

Поиск существующих решений показал, что на рынке отсутствуют приемлемые готовые устройства. В частности, существуют отдельные имитаторы сигналов термометров сопротивлений с высокими техническими характеристиками, но они отличаются высокой ценой, зарубежным производством и отсутствием возможности интеграции в комплексный стенд проверки шкафов управления. Многофункциональные имитаторы исполнительных механизмов также отличаются высокой ценой, отсутствием возможности интеграции в стенд комплексной проверки и обладают ограниченным функционалом. Готового стенда комплексной проверки в продаже найти не удалось.

Цели и задачи работы

Цель работы - разработка электрической схемы универсального стенда комплексной проверки систем управления промышленными вентиляционными установками, включающей имитацию работы реальных измерительных и исполнительных систем и механизмов.

Анализ существующих типовых систем управления вентиляционными установками и опыта их пуско-наладки показал, что проектируемое устройство должно удовлетворять следующим требованиям:

- контроль дискретных сигналов 24 В с гальванической развязкой;
- контроль аналоговых сигналов 0-10 В с гальванической развязкой;
- контроль силовых линий подачи напряжения питания исполнительных механизмов 220/380 В с гальванической развязкой;
- имитация сигналов дискретных датчиков включено или выключено;
- имитация сигналов «Авария ПЧ» и сигнал «Пожар»;
- имитация сигналов резистивных датчиков температуры типа Pt 1000;
- иметь возможность изменения алгоритма проверки систем, имитируя поведение реальных исполнительных устройств.

Функциональная схема разработанного устройства

Спроектированная схема (рис. 1) включает в себя следующие блоки.

Микроконтроллер *U*1 осуществляет сбор данных с датчиков, их обработку и управление схемами формирования выходных сигналов, а также взаимодействие с оператором. Человеко-машинный интерфейс включает в себя: инкрементальный энкодер *SB*1, выполняющий роль клавиатуры; дискретный светодиодный индикатор *HL*1, *HL*2, и жидкокристаллический дисплей *HG*1 для вывода данных оператору. Трёхканальный блок измерения аналоговых сигналов «0 - 10 В», включающий: аттенюатор *A*1, осуществляющий согласование измеряемого сигнала со входом аналого-цифрового преобразователя *U*3; *U*4 - оптический цифровой изолятор информационной шины I^2C; гальванически развязанный *DC*/*DC* преобразователь *U*6. Два последних блока необходимы для гальванической изоляции схем измерения как друг от друга, так и от остальной схемы. Четырёхканальный блок контроля напряжения сетевого напряжения, включающий выпрямитель *U*16, оптический изолятор *U*17. Двухканальный блок контроля сигналов «+24 В», включающий оптоэлектронный изолятор с токоограничивающим резистором. Блок контроля сигнала типа «сухой контакт», включающий ограничитель напряжения *U*26. Все блоки контроля и анализа входных сигналов выполнены с гальванической изоляцией и защитой от переполюсовки и высокого напряжения. Трёхканальный блок имитации сигналов термоэлектрических преобразователей выполнен на импульсных гальванически изолированных цифровых потенциометрах *U*2. Трёхканальный блок имитации сигналов «сухой контакт» выполнен на гальванически изолированном транзисторном ключе *SW*1. Алгоритм работы стенда задаётся в специализированной программе и хранится на карте памяти *U*12. Для расширения портов ввода-вывода микроконтроллера используются регистры сдвига *U*14 – *U*15.

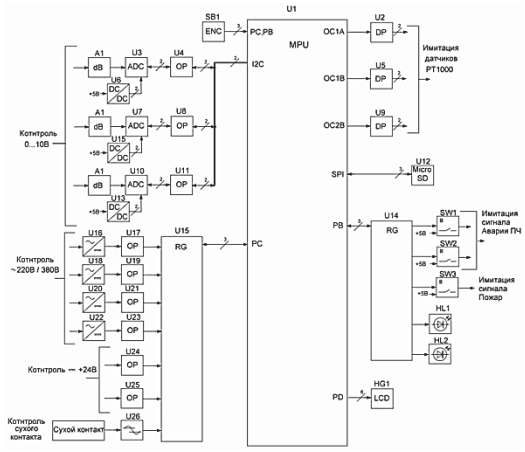


Рис. 1. Функциональная схема стенда входного контроля

Заключение

В работе решена задача разработки схемы универсального стенда комплексной проверки систем управления промышленными вентиляционными установками. Указанная схема позволяет производить проверку работоспособности и алгоритма работы различных систем управления в различных режимах работы, в том числе имитировать аварийные ситуации, а также производить отладку управляющих программ для ПЛК без риска повреждения реальных исполнительных устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власенко А.А., Применение цифровых потенциометров фирмы Analog Devices // Компоненты и технологии. 2005. № 8 (52). С. 58-60.

2. Белов А.В., Конструирование устройств на микроконтроллерах. СПб.: Наука и Техника, 2005. 255 с.

3. Бурцев С.И., Монтаж, эксплуатация и сервис систем вентиляции и кондиционирования воздуха. — СПб.: Профессия, 2005. 376 с.

4. Стефанов Е.В., Вентиляция и кондиционирование воздуха. СПб: Авок Северо-Запад, 2005. 399 с.

УДК 621.317

Романова Мария Константиновна, студентка, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Romanova Maria Konstantinovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Скрипилев Александр Александрович, канд. технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Skripilyov Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (АИИС КУЭ)
MODERNIZATION OF THE AUTOMATED INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR COMMERCIAL ACCOUNTING OF ELECTRICITY (AIIS KUE)

Аннотация. В эпоху нарастающей необходимости в сбережении энергии и строгом надзоре за ее использованием, что особенно важно для предприятий и энергетической сферы, автоматизированные системы учета электроэнергии (АИИС КУЭ) становятся ключевым элементом инфраструктуры. Эти комплексы, объединяющие разнообразное оборудование и программное обеспечение, выполняют функции сбора, обработки, хранения и передачи данных

о потреблении электричества. Стоит отметить, что, подобно любой технологической разработке, АИИС КУЭ постепенно морально устаревают и требуют регулярного совершенствования, чтобы поддерживать высокую эффективность, оставаться в тренде и соответствовать актуальным нормам и стандартам.

Abstract. In an era of increasing need for energy conservation and strict monitoring of energy usage, which is particularly important for businesses and the energy sector, automated electricity metering systems (AIIS MES) have become a key element of infrastructure. These systems, which combine various equipment and software, are responsible for collecting, processing, storing, and transmitting data on electricity consumption. It is worth noting that, like any technological development, AIIS MES are gradually becoming obsolete and require regular improvements to maintain high efficiency, stay on trend, and comply with current regulations and standards.

Ключевые слова: потери электроэнергии, учет электроэнергии, прибор учета электроэнергии, модернизация.

Key words: electricity losses, electricity metering, electricity metering device, modernization.

Введение

Автоматизированные системы информационно-измерительного учета коммерческого потребления электрической энергии (АИИС КУЭ) занимают центральное место в современной энергетической отрасли, его инструментальное обеспечение, представляет собой совокупность систем, приборов, устройств, каналов связи, алгоритмов и т.п. для контроля и управления параметрами энергопотребления [1,2]. Информация, которую они накапливают и анализируют, служит основой для эффективного управления энергетическими ресурсами. На фоне быстрого технологического развития и перемен в рыночных условиях модернизация АИИС КУЭ превращается в неотъемлемое условие поддержания конкурентоспособности и стабильной работы предприятий. Для улучшения показателей следует уделить внимание основным направлениям: внедрение современных цифровых инструментов, использование искусственного интеллекта для роста эффективности операций и повышении защиты от цифровых атак. Эти действия повышают точность замеров, снижают утечки энергии и помогают создавать интеллектуальные сети с гибким контролем потребления и интеграции возобновляемых источников, что в итоге сформирует более надежную, продуктивную энергетическую инфраструктуру[3,4].

Основная часть

Производимые, передаваемые, потребляемые энергетические ресурсы подлежат обязательному учету с применением приборов учета используемых энергетических ресурсов. Модернизация автоматизированной системы информационно-измерительного учета коммерческого потребления электроэнергии (АИИС КУЭ) является важной инициативой, ориентированной на реализацию следующих задач:

Повышение качества учета: Внедрение передовых технологий гарантирует максимальную точность фиксации энергопотребления, сокращает неточности и минимизирует потери.

Увеличение эффективности процессов: Автоматизация сбора и анализа данных значительно ускоряет подготовку отчетов и снижает вероятность человеческих ошибок.

Открытие новых горизонтов: Интеграция с современными технологиями, позволяет проводить глубокий анализ, точнее прогнозировать объемы использования и рационализировать распределение ресурсов.

Улучшение клиентского сервиса: Современные платформы дают пользователям возможность получать данные о своем потреблении в онлайн-режиме в режиме реального времени, что укрепляет доверие и повышает уровень удовлетворенности.

Этапы обновления АИИС КУЭ включают в себя:

Анализ текущего состояния: Первоначально требуется тщательно оценить работу существующей системы, выявить уязвимые места и определить компоненты, требующие улучшения или полной замены.

Выбор передовых решений: Рынок предлагает широкий спектр технологий для совершенствования АИИС КУЭ. Необходимо выбрать оптимальные варианты, соответствующие особенностям предприятия и обеспечивающие совместимость с текущей инфраструктурой. К таким решениям относятся "умные" счетчики с удаленным считыванием данных, аналитические платформы для работы с большими объемами информации и облачные сервисы для оперативного доступа к ресурсам.

Внедрение инноваций: На этом этапе осуществляется установка нового оборудования, конфигурация программного обеспечения и подключение обновленных элементов к действующим системам. Перед запуском в эксплуатацию проводится детальное тестирование всех частей модернизированной структуры.

Подготовка персонала: Эффективное использование усовершенствованной системы предполагает квалифицированную работу сотрудников. Поэтому важно организовать обучающие программы, чтобы снизить риски ошибок и повысить общую производительность.

Наблюдение и поддержка: После завершения установки комплекса необходимо постоянно отслеживать его работу и обеспечивать техническое обслуживание. Это позволит своевременно устранять проблемы и адаптироваться к изменениям в отрасли.

Обновление системы автоматизированного коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) – это комплексный процесс, приносящий выгоды, но также предъявляющий значительные требования:

Финансовые издержки: Модернизация аппаратной части и внедрение новаторских технологий требуют крупных капиталовложений. Важно тщательно рассчитать возврат инвестиций и найти оптимальные способы финансирования.

Техническое совмещение компонентов: Новинки с работающей системой могут стать сложной задачей, нуждающейся в специализированных знаниях и опыте. Неправильное использование может вызвать нарушения в функционировании и потерю данных.

Защита от киберрисков: Современные версии АИИС КУЭ, основанные на интернете вещей (IoT) и облачных платформах, становятся уязвимее к хакерским нападениям. Утверждается перечень и спецификация защищенных протоколов передачи данных, которые могут быть использованы для организации информационного обмена между компонентами интеллектуальной системы учета электрической энергии (мощности) и приборами учета электрической энергии, которые могут быть присоединены к такой системе.

Управление преобразованиями: Введение новых технологий может столкнуться с сопротивлением персонала, привыкшего к старым методам. Важно провести разъяснительные мероприятия и организовать курсы обучения для сотрудников, чтобы облегчить переход.

Соблюдение правовых норм: Изменения в законодательстве, регулирующем учет электроэнергии, могут потребовать корректировок в обновленной системе. Следует внимательно следить за нормативными обновлениями и быстро адаптировать инфраструктуру к новым требованиям.

Заключение

Обновление автоматизированной системы информационно-измерительного учета коммерческого потребления электроэнергии (АИИС КУЭ) – это непростая задача, требующая не только технических компетенций, но и стратегического планирования. Удачная модернизация приносит ощутимые преимущества: основной вклад в получаемый эффект для сетевых компаний даёт снижение потерь электроэнергии и соответствующий рост выручки за счёт достоверного формирования объёма оказанной потребителям услуги. В эпоху стремительного развития технологий вложения в улучшение АИИС КУЭ становятся гарантией успеха для любой энергетической организации. С помощью современных инструментов мониторинга и анализа мы можем оперативно снижать потери электроэнергии и предоставлять потребителям более прозрачные сведения о расходах. Это мотивирует их к осознанному потреблению и экономии ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника». – Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2018. - 22 с.
2. И. А. Павлова «Внедрение системы АИИС КУЭ» (журнал «Вестник магистратуры», 2019)
3. Постановление Правительства РФ от 19 июня 2020 г. N 890 "О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)"
4. Федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ "Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации"

УДК 681.515

Саъдуллоев Комрон Алишерович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Sadulloev Komron Alisherovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Черный Сергей Петрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Chernyy Sergey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Electric Drive and Automation of Industrial Installations", Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С ГЕТЕРОГЕННЫМ ВНУТРЕННИМ КАСКАДОМ
RESEARCH OF FUZZY CONTROL SYSTEM MODELS FOR ELECTRIC DRIVES WITH A HETEROGENEOUS INTERNAL CASCADE

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования и анализа систем нечеткого управления электроприводами, архитектура которых включает гетерогенный внутренний каскад. Использование гетерогенных структур позволяет сочетать различные типы регуляторов и алгоритмов обработки сигналов, что актуально для сложных динамических объектов. На основе современных подходов к построению многокаскадных нечетких систем предлагается усовершенствованная модель, обеспечивающая повышение качества переходных процессов и точности регулирования в условиях неопределенности параметров и внешних возмущений.

Abstract. The article discusses the issues of modeling and analysis of fuzzy control systems for electric drives, the architecture of which includes a heterogeneous internal cascade. The use of heterogeneous structures allows combining different types of regulators and signal processing algorithms, which is important for complex dynamic objects. Based on modern approaches to the construction of multi-stage fuzzy systems, an improved model is proposed that improves the quality of transient processes and control accuracy in conditions of parameter uncertainty and external disturbances.

Ключевые слова: нечеткое управление, электропривод, гетерогенный каскад, многокаскадный нечеткий регулятор, интеллектуальные системы, математическое моделирование.

Key words: fuzzy control, electric drive, heterogeneous cascade, multi-stage fuzzy controller, intelligent systems, mathematical modeling.

Введение

Эффективность функционирования современных автоматизированных электроприводов в значительной степени определяется качеством процессов управления в их внутренних контурах. Особую сложность представляют системы с гетерогенным внутренним каскадом, где компоненты имеют различную физическую природу или описываются принципиально разными математическими аппаратами. Основы нечеткой логики в задачах управления были заложены еще во второй половине прошлого века [1], однако большинство существующих моделей ориентированы на гомогенные структуры, где все связи однородны.

В последние годы активно развиваются многокаскадные нечеткие системы управления, позволяющие снизить алгоритмическую сложность и информационную избыточность за счет иерархической организации [2]. Такие системы строятся по принципу внешнего классифицирующего каскада и набора внутренних исполнительных модулей, что дает возможность реализовывать сложные законы регулирования без гипертрофированного роста базы правил. Настоящая статья обобщает и развивает эти подходы применительно к электроприводам с гетерогенным внутренним каскадом.

Проблема управления гетерогенными каскадами заключается в том, что входящие в них подсистемы обладают разной динамикой – например, быстрые электромагнитные процессы соседствуют с медленными механическими. Это порождает перекрестные связи, которые классические регуляторы компенсируют плохо, а традиционные нечеткие системы требуют введения большого числа лингвистических переменных и, как следствие, сталкиваются с «проклятием размерности». Кроме того, отсутствуют унифицированные методики синтеза функций принадлежности для таких разнородных сред, что затрудняет практическое применение интеллектуального управления.

Предлагаемое в статье решение базируется на комбинации двух механизмов нечеткого вывода: быстрый алгоритм Сугено используется для внешнего каскада, отвечающего за классификацию режимов, а более плавный алгоритм Мамдани – для внутренних модулей, непосредственно формирующих управляющие сигналы [2, 3]. Такая архитектура позволяет адаптивно переключаться между законами управления в зависимости от текущего состояния объекта, сохраняя высокое быстродействие и робастность к вариациям параметров. Дополнительно вводится гетерогенность внутреннего каскада за счет включения модулей с разной структурой и настройкой, что обеспечивает гибкость при работе с разнородными физическими процессами.

Целью исследования является разработка и исследование математических моделей нечетких систем управления электроприводами с гетерогенным внутренним каскадом на основе многокаскадных нечетких регуляторов. Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи формализации гетерогенного каскада, разработки алгоритмов нечеткого вывода с комбинацией различных механизмов, создания имитационной модели и проведения сравнительного анализа с традиционными системами.

Модели и методы

Для объединения разнородных компонентов, таких как двигатели, преобразователи и механические передачи, применяется теория пространства состояний, структурная декомпозиция и аппарат теории графов. Каждый узел описывается системой дифференциальных уравнений, связывающей входные и выходные переменные. Гетерогенность связей учитывается через передаточные функции разной размерности и физической природы [4, 5].

В основу многокаскадного нечеткого регулятора положена иерархическая структура, состоящая из внешнего каскада и нескольких вложенных модулей. Внешний каскад выполняет функции классификации режимов или выбора закона управления, а внутренний каскад реализует конкретные управляющие воздействия. Математическое описание такого регулятора строится на комбинации алгоритмов Мамдани и Сугено [2]. Для внешнего каскада с алгоритмом Мамдани степени истинности правил определяются через операцию минимума, выходные нечеткие множества агрегируются, а четкое значение вычисляется центроидным методом. При использовании во внешнем каскаде алгоритма Сугено нулевого порядка консеквенты правил представляют собой константы, а итоговый сигнал находится как средневзвешенное.

Для двухкаскадной структуры с комбинацией Сугено-Мамдани выходные сигналы внешнего каскада поступают на входы внутренних модулей, каждый из которых реализует вывод Мамдани. Итоговое управляющее воздействие формируется суммированием взвешенных выходов внутренних модулей. Компенсация нелинейностей и использование мягких вычислений для этой цели подробно рассмотрены в работе.

Для учета разнородности внутреннего каскада предложено использовать модули с различными алгоритмами вывода: например, алгоритм Сугено для быстрых процессов и алгоритм Мамдани для медленных. Также применяются операторы произведения и суммы для формирования уставок вложенных каскадов. Такой подход обеспечивает гибкость настройки и робастность к нестационарности параметров [3].

Имитационное моделирование проводилось в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотек Fuzzy Logic Toolbox и Simscape. Рассматривались электропривод постоянного тока с двухзонным регулированием скорости и частотно-регулируемый электропривод переменного тока. Гетерогенность имитировалась включением в один каскад гидравлических подвесок (инерционных звеньев) и быстрых электромагнитных подсистем.

Результаты моделирования

На рисунке 1 представлены переходные процессы скорости при отработке ступенчатого задающего воздействия. Классический ПИД-регулятор демонстрирует перерегулирование около двенадцати процентов и заметную колебательность. Предложенный многокаскадный нечеткий регулятор с комбинацией Сугено-Мамдани обеспечивает практически нулевое перерегулирование и сокращает время регулирования примерно на четверть по сравнению с классическим [2].

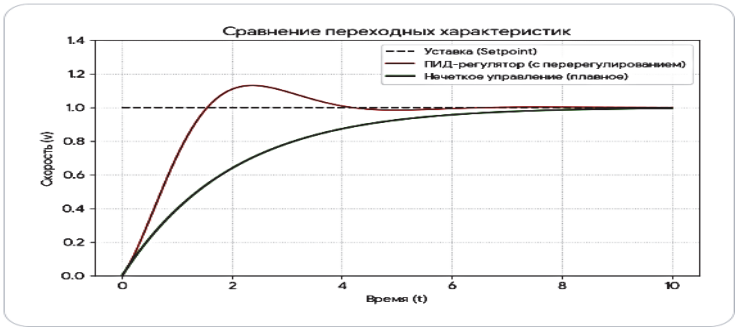


Рис.1. Сравнение переходных характеристик

При ступенчатом набросе момента сопротивления (рис. 2) классическая система дает просадку скорости на восемь процентов с длительными затухающими колебаниями, длящимися три-четыре периода. Многокаскадный нечеткий регулятор уменьшает просадку до трех процентов, сокращает время восстановления на сорок процентов, а колебания практически отсутствуют [3].

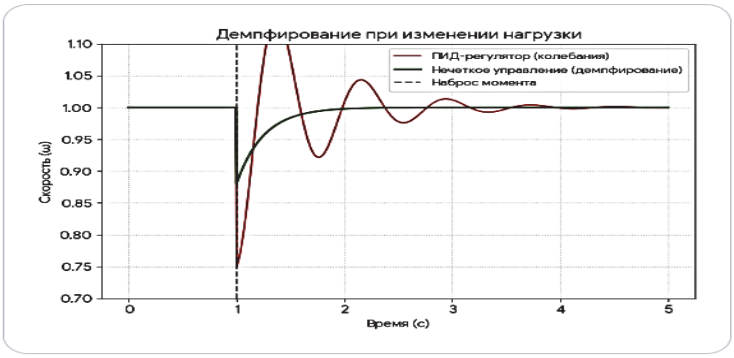


Рис. 2. Демпфирование при изменении нагрузки

Исследовано влияние изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя в диапазоне плюс-минус тридцать процентов от номинала. Для классической системы перерегулирование возрастает до двадцати процентов, тогда как для многокаскадного нечеткого регулятора оно остается в пределах двух-трех процентов. Аналогичные результаты получены при изменении потокосцепления в электроприводе переменного тока. Повышение энергоэффективности при использовании интеллектуальных алгоритмов отмечается в работе.

Выводы

Разработана математическая модель многокаскадной нечеткой системы управления с гетерогенным внутренним каскадом, позволяющая комбинировать различные алгоритмы вы-

вода, такие как Мамдани и Сугено, а также операторы агрегации. Модель учитывает нестационарность параметров и перекрестные связи между каскадами.

Предложенный многокаскадный нечеткий регулятор обеспечивает существенное улучшение качества переходных процессов. Перерегулирование снижается до нуля-трех процентов против двенадцати-пятнадцати процентов у ПИД-регулятора. Время регулирования сокращается на двадцать пять-тридцать процентов. При набросе нагрузки просадка скорости уменьшается в два-три раза, а время восстановления – на сорок процентов.

Разработанная система демонстрирует робастность к вариации внутренних параметров, таких как коэффициент усиления преобразователя или потокосцепление, в диапазоне плюс-минус тридцать процентов без необходимости перенастройки регулятора. Классическая система требует перенастройки уже при отклонении в пятнадцать процентов.

Реализация многокаскадного нечеткого регулятора на стандартном промышленном контроллере подтверждает его пригодность для реальных систем автоматизации. Вычислительная сложность компенсируется современными вычислительными средствами, а выигрыш в качестве управления делает предложенный подход перспективным для электроприводов в станкостроении, робототехнике и транспортных системах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соловьев В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учебное пособие / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 267 с. – ISBN 978-5-8044-1120-7. – EDN QMVIJD.

2. Черный С.П. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2(55). – С. 32-39. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-32-39. – EDN HJOQPK.

3. Susdorf V. I. Optimization of Series Motor Drive Dynamics / V. I. Susdorf, S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – Vladivostok, 2019. – P. 8934344. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934344. – EDN LNUSOQ.

4. Терехов В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М., 2006.

5. Савельев Д.О. Способ компенсации статических нелинейностей с использованием мягких вычислений / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 35-42. – EDN TSONQJ.

УДК 681.5

Саяпина Полина Олеговна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sayapina Polina Olegovna, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сухоруков Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sukhorukov Sergei Ivanovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ И РАСКРОЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ
ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF CONTROL AND CUTTING PROTECTIVE COATINGS FOR ITS FURTHER AUTOMATION

Аннотация. В данной работе рассматривается технология размерного химического травления крупногабаритных деталей. Определены технологические этапы требующие перехода от ручного труда к автоматизированной системе. Представлен ряд операций по автоматизации

производства, необходимый для повышения точности и качества при технологии раскроя защитных покрытий, применяемой при размерном химическом травлении.
Abstract. This article examines the technology of dimensional chemical etching of large-scale parts. It identifies the process steps that require a transition from manual labor to an automated system. A series of operations on automation of production, selection of accuracy and quality using the technology of cutting protective coatings applied under increased chemical influence are presented.
Ключевые слова размерное химическое травление, защитное покрытие, автоматизация.
Key words: dimensional chemical etching, protective coating, automation.

Введение

Одной из важных тенденций в современных производствах является автоматизация технологических процессов, благодаря которой появляется возможность повышения качества, оптимизация затрат и повышается эффективность производства. Однако, до сих пор имеются производства, в которых преобладает ручной труд. Примером производств с большой долей ручного труда может являться авиастроительное производство. Это связано с малыми объемами выпускаемых партий продукции и высокой сложностью собираемых конструкций. При этом значительная часть операций на начальных этапах (изготовление отдельных деталей) выполняется с применением автоматизированного оборудования (например, фрезерованием на станках с ЧПУ), а сборочные операции в большинстве своем выполняются вручную. Одним из примеров ручного труда в изготовлении отдельных деталей является технология применения защитных покрытий при размерном химическом травлении. Данная технология применяется для формирования зон утоньшения некоторых элементов (внешних стенок обшивки фюзеляжа).

Технология размерного химического травления требует применения специальных защитных покрытий (каучуковые, эпоксидные). Данные покрытия необходимы, защитить металл детали из тонкого листового металла в тех местах, где травление не требуется. При этом в тех местах, где требуется утоньшить деталь, покрытие перед травлением должно быть удалено. Проблема, рассматриваемая в работе, связана непосредственно с данным защитным покрытием, поскольку к его качеству нанесения и точности формирования зон, подвергающихся травлению, предъявляются достаточно высокие требования: покрытие не должно иметь дефектов (для предотвращения травления в непредусмотренных местах), в зонах с удаленным покрытием не должно быть повреждений поверхности металла и т.д.

Процессы связанные с размерным химическим травлением, сегодня выполняются вручную. Для повышения качества и снижения доли брака при применении защитных покрытий предлагается внедрение автоматизированного комплекса. В рамках данной работы рассматриваются основные аспекты технологии применения защитных покрытий, что позволит определить список основных операций, требующих автоматизации, и параметры технологических процессов, требующие

Основная часть

Рассмотрим технологию применения защитных покрытий и особенности ее реализации, которые необходимо учесть при автоматизации производства. Технология реализуется следующим образом: предварительно, детали из тонкого листового металла фрезеруют на станках, производят процессы связанные с формообразованием(формовка), очищаются от мелкого мусора и пыли, обезжиривают поверхность перед нанесением защитного покрытия. На подготовленную деталь наносится специализированное защитное покрытие при помощи краскопульта. После высыхания покрытия его осматривают визуально или при помощи специализированных приборов на наличие дефектов нанесения (недостаточность покрытия, тонкий слой, поры в материале защитного покрытия). Наличие дефектов в защитном слое покрытия может повлечь за собой брак детали в процессе дальнейшей обработки. Мелкие дефекты сложно выявить при визуальном осмотре, поэтому необходимо использовать дополнительное оборудование. При ручной реализации данного процесса затрачивается большое количество времени. При нахождении участка с дефектами, его отмечают, чтобы по

окончании процесса проверки произвести повторное точечное покрытие. После нанесения повторного покрытия его необходимо высушить и повторить процедуру контроля на наличие/отсутствие дефектов.

Далее, в защитном покрытии необходимо по заранее подготовленным шаблонам, соответствующим индивидуальной конструкторской документации каждой детали, прорезать границы и удалить защитное покрытие для дальнейшего процесса травления. Процесс прорезания защитного покрытия производится при помощи набора шаблонов, накладываемых на поверхность защитного покрытия детали и специализированным инструментом, вручную прорезают защитное покрытие. К процессу такого раскроя предъявляются жесткие требования: нельзя повреждать поверхность металла (даже мелкая риска на поверхности приводит к дефекту в процессе травления) и покрытие должно быть прорезано на всю глубину (это необходимо для нормального снятия покрытия в зоне травления). Исходя из накопленного опыта авиастроительных предприятий, наиболее универсальным инструментом для прорезания защитных покрытий является термонож [1]. После удаления защитного покрытия в местах, подготовленных для дальнейшего процесса травления, деталь помещают в гальваническую ванну. Через определенный промежуток времени, описанный в соответствующей технической и конструкторской документации, деталь достают из гальванической ванны, удаляют остатки химических реагентов после процесса травления, сушат, удаляют все защитное покрытие и проводят итоговый контроль качества детали. Главной задачей размерного химического травления является получение из заготовки листового металла с равномерной толщиной детали, имеющей переменную толщину[2].

Рассмотренная технология имеет ряд проблем, требующих решения:

- необходимость контроля глубины прорезания защитного покрытия при раскрое;
- контроль усилия нажатия на инструмент при раскрое (должно быть обеспечено усилие, позволяющее гарантированно прорезать покрытие без нанесения риски или царапин на поверхность самой детали);
- низкая точность раскроя, связанная с применением накладных шаблонов, по которым осуществляется раскрой, а также значительные расходы на сами шаблоны, их коррекцию и обновление;
- невозможность быстрой или разовой коррекции форм и траекторий раскроя;
- сложность выявления дефектов покрытия и риски повреждения деталей при дальнейшей обработке через невыявленные дефекты. Это повышает количество брака и расходы на производство конечного летательного аппарата [3].

В задаче автоматизации технологии применения защитных покрытий в технологическом процессе размерного химического травления ряд этапов уже являются автоматизированным, либо могут быть автоматизированы с применением распространенных подходов (например, первичное нанесение покрытия представляет собой частный случай процесса автоматизированной покраски). Однако, для автоматизации оставшихся этапов требуется проведение дополнительных исследований и разработок.

В рамках представленной работы будет предложен подход автоматизации процессов контроля и раскроя защитного покрытия в технологическом процессе размерного химического травления.

Для описанных ранее, процессов контроля и раскроя защитных покрытий сформируем требования , необходимые для выполнения разрабатываемой автоматизированной системы:

- контроль расположения и координат границ заготовки в рабочей зоне автоматизированной системы;
- выявление дефектов покрытия в некоторой локальной зоне на детали;
- возможность перемещения локальной зоны выявления дефектов по всей поверхности детали;
- автоматическое нанесение защитного покрытия в точках с выявленными дефектами;
- наличие инструмента для выполнения раскроя с контролем технологических параметров процесса;

- перемещение инструмента для раскроя по необходимым траекториям, соответствующим конструкторской документации на деталь;

- контроль и компенсация возможных отклонений траектории раскроя от конструкторской документации.

Заключение

В данной работе была проанализирована технология применения защитных покрытий, используемая в авиастроительном производстве. Рассмотрены технологические этапы, требующие автоматизации, что в дальнейшем позволит разработать автоматизированную систему, которая позволит уйти от использования ручного труда, что в последствии повысит точность и качество контроля раскроя защитных покрытий на крупногабаритных заготовках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Физулаков Р.А. Применение лазерного скрайбирования в технологии размерного химического травления // Авиационная промышленность. 2013 – № 4. – С. 17-21. – EDN SDJAHH.

2. Физулаков Р. А. Применение газолазерного раскроя полимерного покрытия обшивок фюзеляжа// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5-2(36). – С. 113-117. – EDN RTSGSV.

3. Григорец Р. Д. Разработка обобщенной структуры автоматизированной системы оценки параметров деформации крупногабаритных заготовок // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Кемерово, 21–23 ноября 2024 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 138-141. – EDN UPOKVF.

УДК 681.5.032; 536.24

Сбитнев Никита Романович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sbitnev Nikita Romanovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Савельев Дмитрий Олегович, старший преподаватель, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Savelyev Dmirtiy Olegovich, Senior Lecturer «Electric drive and automation of industrial installations» Department, Komsomolsk-na-Amure State University
Соловьев Вячеслав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Solovyev Vyacheslav Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, professor, «Electric drive and automation of industrial installations» Department, Komsomolsk-na-Amure State University

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДИНАМИКУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
INFLUENCE OF THERMAL PROCESSES ON THE DYNAMICS OF THE ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM

Аннотация. В статье рассматривается комплексное влияние теплового состояния электродвигателя на переходные процессы системы управления электроприводом. Проведен анализ деградации параметров объекта управления при повышении температуры. Оценено воздействие нагрева электродвигателя на работу электропривода и на качество управления. Результаты анализа показывают необходимость учета тепловой динамики, как интегральной части модели объекта для обеспечения надежности привода в условиях теплового стресса.

Abstract. This paper examines the complex effect of the electric motor's thermal state on the transient processes of the electric drive control system. An analysis of the degradation of the controlled object's parameters under increasing temperature conditions was conducted. The impact of electric motor heating on the operation of the electric drive and on control quality was evaluated. The anal-

ysis results indicate the necessity of incorporating thermal dynamics as an integral component of the controlled object model to ensure the reliability of the electric drive under thermal stress conditions.
Ключевые слова: тепловой процесс, электродвигатель, система управления электроприводом, термическая модель, надежность привода.
Key words: thermal process, electric motor, electric drive control system, thermal model, drive reliability.

Введение

В настоящее время в большинстве производственных процессов с применением электроприводов, составляют системы управления на основе пропорциональных и пропорционально-интегральных регуляторов. Теоретическое преимущество пропорционально-интегрального регулятора (далее ПИ-регулятора) в виде отсутствия статической ошибки на практике нивелируется сложностями его реализации. В связи с этим классические пропорциональные регуляторы (далее П-регуляторы) получили более широкое распространение в управлении электроприводами. Основным преимуществом их использования является простота настройки. Однако, данный тип регулятора имеет существенные недостатки, влияющие на качество управления. Для организации точного перемещения в плоскости или пространстве по нескольким координатам, требуется значительное время на его калибровку. Более того, корректная работа классической системы зависит не только от качества настройки, но и от внешних условий.

Основным системным недостатком классических систем управления в применении к электроприводам является их неадаптивность к изменению тепловых параметров объекта в процессе эксплуатации. Такие системы управления не способны в реальном времени компенсировать существенные нелинейности, вызванные нагревом, изменение предельного тока обмоток в зависимости от температуры при длительной работе под нагрузкой и снижение максимальной скорости электропривода. Все это приводит к возникновению статической ошибки системы управления, перерегулированию или длительному времени установления переходных процессов, что критично для задач точного позиционирования и следования по траектории в условиях нестационарной тепловой среды или нагрузок, возникающих из-за нее.

Точное математическое моделирование объекта управления и системы управления электропривода, включающее в себя решение уравнений электромеханики, учет температурных зависимостей обмоток якоря и других компонентов, позволяет приблизить имитационную модель к физическим параметрам реального объекта и реальным условиям внешней среды. Такой подход к имитационному моделированию позволит не только изучать объект регулирования, но и апробировать на нем различные законы управления, в том числе интеллектуальные, обладающие более высоким потенциалом для регулирования объектом в условиях указанных ограничений.

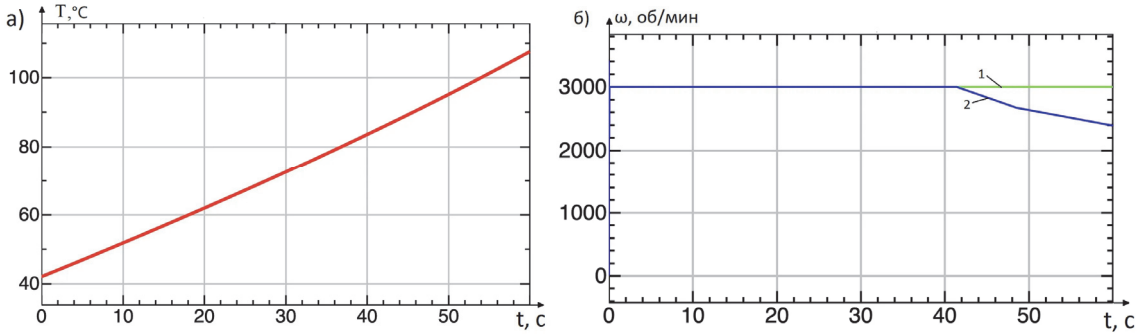
Термические эффекты в обмотках статора

Наиболее очевидным следствием перегрева является увеличение активного сопротивления обмоток статора. Например, для медных проводников коэффициент изменения сопротивления в зависимости от температуры составляет приблизительно $3{,}9 \cdot 10^{-3}$ °C. В таком случае это означает увеличение сопротивления приблизительно на 40% при нагреве от 20 до 120°C. В результате электрические характеристики привода ухудшаются: при постоянном напряжении наблюдается спад тока якоря, приводящий к потере крутящего момента. Система управления, стремясь поддержать заданную скорость и уменьшить накопившуюся ошибку, реагирует увеличением скважности ШИМ-сигнала, что, ведёт к большему росту потерь мощности и усилению нагрева. Таким образом, из-за физических процессов возникает положительная обратная связь, способная привести к тепловой нестабильности и даже к тепловому разгону [1].

Кроме того, изменение сопротивления влияет на электрическую постоянную времени цепи якоря. Поскольку индуктивность обмоток остаётся практически неизменной, уменьшение знаменателя приводит к увеличению электрической постоянной времени, которая влечет

за собой замедление переходных процессов в токовом контуре. Если коэффициенты регулятора тока были настроены для холодного или идеализированного двигателя, то при нагреве система может стать либо излишне инерционной, либо колебательной.

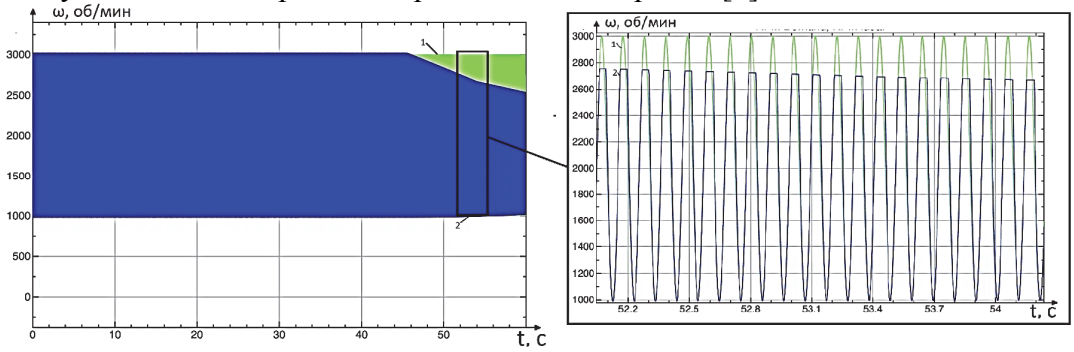
Для изучения влияния тепловых потерь на переходные процессы была реализована имитационная модель типового электродвигателя постоянного тока. Для оценки влияния перегрева было проведено исследование в режиме непрерывной работы электродвигателя в течение одного часа при постоянной нагрузке в 3.8 Н/м, что позволило оценить снижение качества характеристик двигателя в условиях перегрева. На вход системы в качестве сигнала задания скорости использовался ступенчатый сигнал равный 3000 об/мин. Результаты моделирования представлены на рис. 1 [2].



1 – сигнал задания; 2 – сигнал с объекта управления

Рис. 1. Переходные процессы по скорости и температуре электродвигателя а – график температуры; б – график скорости

Исходя из графиков, наблюдается аппроксимально линейный рост температуры на протяжении всего периода работы, что свидетельствует о накоплении тепловой энергии в объекте управления и увеличению роста сопротивления на обмотках якоря [3]. На графике скорости, при достижении критического температурного порога, наблюдается значительное уменьшение фактической скорости от заданной, что подтверждает существенное влияние температур на показатели электродвигателя. Для проверки работы системы в условиях динамического разгона и торможения использовался смешанный сигнал задания скорости с функцией Хевисайда равной 2000 об/мин и гармонической функцией с амплитудой в 1000 об/мин. Результаты моделирования представлены на рис. 2 [4].



1 – сигнал задания; 2 – сигнал с объекта управления

Рис. 2. Переходный процесс по скорости электродвигателя с гармонической функцией разгона и торможения

Представленный график иллюстрирует снижение качества регулирования на высоких температурах при работе в динамических режимах с часто меняющимся заданием скорости, что характерно для реальных условий эксплуатации электродвигателя [5].

Заключение

Исходя из приведенного анализа было выявлено, что снижение мощности электродвигателя обусловлено температурно-зависимыми изменениями её параметров в процессе эксплуатации. Результаты имитационного моделирования продемонстрировали, что при длительной работе под нагрузкой в течение одного часа температура двигателя возрастает от начальной, равной 42°C до 115°C. Такое увеличение температуры сопровождается падением

скорости вращения приблизительно на 20% относительно заданного значения даже при сохранении постоянного управляющего воздействия. Полученные данные подтверждают недостаточную эффективность применения классического подхода к реализации типового моделирования для задач точного управления электроприводом в условиях нестационарной тепловой среды и подтверждают актуальность разработки высокоточных имитационных моделей и адаптивных систем управления, учитывающих температурную динамику объекта в реальном времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черепанов Н. И. Система подчиненного регулирования электроприводом на базе двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением / Н. И. Черепанов, В. А. Соловьев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 315-317. – EDN UCARWF.

2. Гайдук А.Р. Методы синтеза нелинейных систем управления (квазилинейный подход) : учебное пособие для вузов / А. Р. Гайдук. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 288 с. – ISBN 978-5-507-50082-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/439808 (дата обращения: 01.02.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Савельев Д. О. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / Д. О. Савельев, С. П. Черный, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 213-221. – DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-3-213-221. – EDN LTMDTP.

4. Черный С.П. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров / С. П. Черный, Д. О. Савельев, Н. Р. Сбитнев, П. О. Саяпина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 1(73). – С. 4-10. – EDN WKOYPI.

5. Лямин М.А. Многокаскадная нечеткая система согласованного управления взаимосвязанными электроприводами роботизированной транспортной платформы / М. А. Лямин, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4-3(70). – С. 120-127. – DOI 10.37220/MIT.2025.70.4.014. – EDN VYBXPR.

УДК 004.414:697.9

Соколова Вера Сергеевна, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sokolova Vera Sergeevna, senior lecturer, Komsomolsk-on-Amur State University

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ UML-КЛАССОВ
DEVELOPMENT OF AN INFORMATION MODEL OF MICROCLIMATE PARAMETERS OF INDUSTRIAL PREMISES USING UML CLASSES

Аннотация. В статье представлены результаты разработки информационной модели параметров микроклимата производственных помещений с использованием нотации UML-классов. Исследование направлено на формализацию структуры взаимосвязей между элементами системы управления микроклиматом для последующего математического моделирования и разработки алгоритмов управления. В предложенной модели выделены основные классы объектов, их атрибуты и методы, а также типы взаимосвязей, отражающие семантику взаимодействия элементов системы.

Abstract. The article presents the results of developing an information model of microclimate parameters of industrial premises using UML class notation. The study aims to formalize the structure of relationships between the elements of the microclimate control system for subsequent mathematical modeling and development of control algorithms. The proposed model identifies the main ob-

ject classes, their attributes and methods, as well as the types of relationships reflecting the semantics of the interaction of system elements.

Ключевые слова: информационное моделирование, UML-диаграммы классов, управление микроклиматом, производственное помещение, температурно-влажностный режим.
Key words: information modeling, UML class diagrams, climate control, industrial premises, temperature and humidity conditions.

Введение

В современных условиях автоматизации производственных процессов особое значение приобретает создание эффективных систем управления микроклиматом, обеспечивающих поддержание оптимальных параметров температуры и влажности воздуха в производственных помещениях. Сложность данной задачи обусловлена наличием множества взаимосвязанных элементов, каждый из которых вносит вклад в формирование итогового микроклиматического режима [1].

На сегодняшний день моделирование является ключевым подходом к исследованию сложных технических систем. Unified Modeling Language (UML) выступает в качестве стандарта моделирования и одного из основных инструментов объектноориентированного подхода [2]. Нотация UML-классов позволяет проиллюстрировать связи между параметрами элементов системы и характер их взаимодействия, что создаёт основу для последующего математического описания процессов тепло- и влагопереноса.

Цель работы заключалась в разработке информационной модели параметров микроклимата производственных помещений с использованием диаграмм классов UML, обеспечивающей формализацию структуры взаимосвязей между элементами системы управления микроклиматом для последующего построения математической модели и алгоритмов управления.

Основная часть

Информационная модель элементов системы управления микроклиматом производственного помещения в общем виде представляет собой совокупность UML-классов, содержащих необходимые объекты, их параметры (атрибуты) и методы. Данные параметры подлежат учету при составлении математического описания температурно-влажностного режима, что в дальнейшем позволит построить математическую модель, используемую для разработки алгоритмов управления.

Рассмотрим ключевые фрагменты предложенной информационной модели.

Класс «Отопительный прибор» (рис. 1) представляет собой элемент системы управления микроклиматом, решающий задачу передачи тепловой энергии в помещение. Для эффективного управления температурным режимом требуется знание фактических параметров данного объекта, среди которых ключевым является коэффициент теплоотдачи. Данный показатель характеризует способность отопительного устройства отдавать тепловую энергию с учетом его индивидуальных конструктивных особенностей.

Атрибуты класса «Отопительный прибор» включают: тип прибора (радиатор, конвектор, панель), материал изготовления, площадь поверхности теплообмена, коэффициент теплоотдачи, тепловую инерционность. Методы класса обеспечивают вычисление теплового баланса и теплоемкости отопительного прибора. Для выполнения данных вычислений требуется обращение к другим классам, имеющим связанные параметры.

На рис. 2 продемонстрируем UML-диаграмму теплоносителя. Класс «Теплоноситель» содержит атрибуты, определяющие физические свойства рабочей среды, циркулирующей в системе отопления: тип теплоносителя (вода, антифриз, пар), температура на входе и выходе, массовый расход, удельная теплоемкость, плотность. Параметры данного класса позволяют определить средний показатель температуры поверхности отопительного прибора, необходимый для расчета динамики изменения тепловой энергии воздушной массы в помещении.

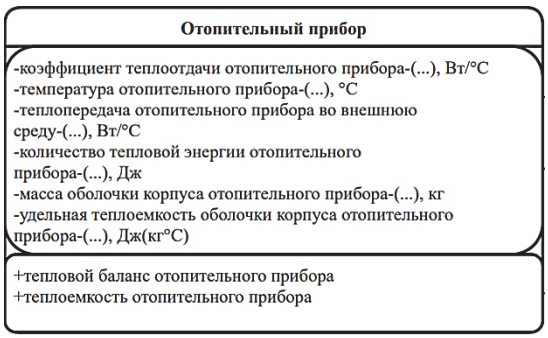


Рис. 1. UML-класс «Отопительный прибор

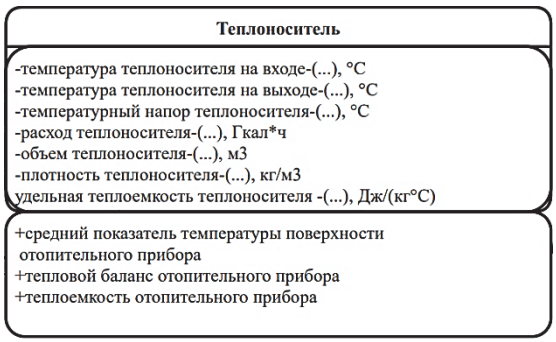


Рис. 2. UML-класс «Теплоноситель»

Класс «Производственное помещение» (рис. 3) выступает в качестве центрального элемента информационной модели. Его атрибуты включают геометрические характеристики (площадь, высота потолков, объем), теплофизические параметры ограждающих конструкций (коэффициент теплопередачи через наружные стены, коэффициент теплопередачи во внутренние стены, теплопроводность внутренних стен, теплоемкость внутренних стен, теплоемкость помещения), а также эксплуатационные характеристики (назначение помещения, категория по взрывопожарной опасности, режим работы).

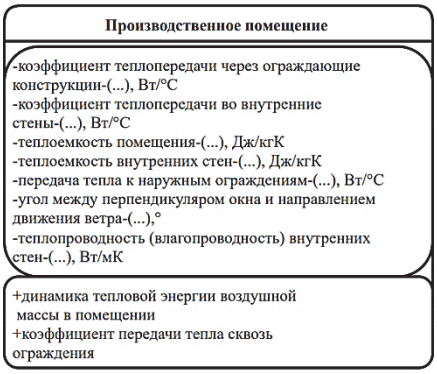


Рис. 3. UML-класс «Производственное помещение»

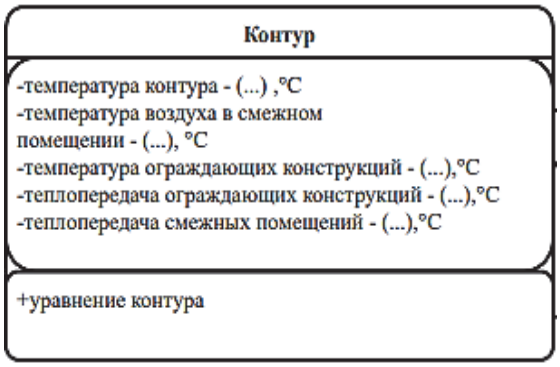


Рис. 4. UML-класс «Контур»

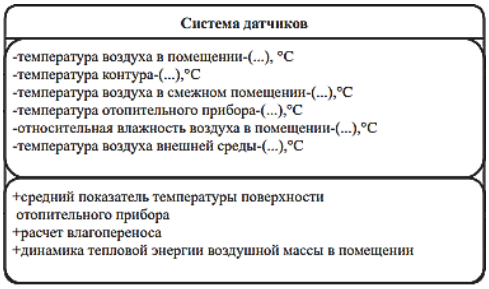


Рис. 5. UML-класс «Система датчиков»

Представленные параметры класса «Производственное помещение» позволяют рассчитать динамику тепловой энергии воздушной массы. Однако для полноценного расчета требуется использование параметров классов «Контур» и «Система датчиков». В предложенной информационной модели связи между параметрами классов отражают данную семантику. При этом класс «Производственное помещение» выступает в роли «клиента», а классы «Контур» и «Система датчиков» - в роли «поставщиков».

Класс «Контур» (рис. 4) включает в себя объекты, формирующие тепловой контур помещения: внутренние стены, перекрытия, смежные помещения, оконные и дверные проемы. На верхнем уровне декомпозиции данный класс содержит атрибуты, характеризующие суммарные теплопотери через ограждающие конструкции, термическое сопротивление многослойных конструкций, площадь остекления и коэффициент теплопередачи окон.

Класс «Система датчиков» представляет собой совокупность измерительных устройств, обеспечивающих сбор данных о текущем состоянии микроклимата. Атрибуты данного класса включают: относительную влажность воздуха в помещении, температуру воздуха в помещении, температуру воздуха внешней среды, скорость воздушных потоков, давление, а также технические характеристики самих датчиков (погрешность измерения, частота опроса, диапазон измерения).

Параметры класса «Система датчиков» позволяют рассчитать влагоперенос посредством построения уравнений влагопроводности и теплопроводности [3, 4]. При этом используется комплексное взаимодействие с параметрами класса «Производственное помещение», такими как теплопроводность и теплоемкость внутренних стен, теплоемкость помещения.

Все параметры классов предложенной информационной модели находятся во взаимосвязи и характеризуются определенными зависимостями. Диаграмма классов UML включает три типа взаимосвязей: ассоциацию (смысловая связь между классами «Отопительный прибор» и «Теплоноситель», а также между «Производственное помещение» и «Система датчиков»), агрегацию (отношение «часть-целое» между классами «Контур» и «Производственное помещение», а также между «Система датчиков» и отдельными типами измерительных устройств) и реализацию (связь между интерфейсом и классом, который его реализует, что в контексте системы управления микроклиматом характеризует реализацию алгоритмов управления через исполнительные устройства).

Заключение

Разработанная информационная модель в виде диаграммы классов UML позволяет установить формализованные взаимосвязи между параметрами элементов системы управления микроклиматом, что создает базу для построения математической модели температурно-влажностного режима и последующей разработки алгоритмов управления. Представленная совокупность UML-классов включает атрибуты элементов системы, а выявленные связи между параметрами отражают характер их взаимодействия, что может быть использовано при разработке имитационной модели процессов формирования микроклимата и управления им; в перспективе расширение модели найдет применение при разработке программного обеспечения для модулей управления, что позволит повысить эффективность автоматизированного управления и снизить энергозатраты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ершов, С. В., Сергеева, Т. Е. Математическое моделирование параметров помещений в интеллектуально адаптивных системах автоматического контроля микроклимата / С. В. Ершов, Т. Е. Сергеева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 12-2. С. 88-95.

2. Буч, Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Якобсон. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 496 с.

3. Соколова, В. С. Исследование вопроса учета влажности воздуха при математическом моделировании процессов формирования микроклимата в производственных помещениях / В. С. Соколова, И. В. Зайченко // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы vi всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3-х частях, Комсомольск-на-амуре, 10–14 апреля 2023 года. Том часть 1. – Комсомольск-на-амуре: комсомольский-на-амуре государственный университет, 2023. – с. 442-446. – EDN GKYYXE.

4. Соколова, В. С. Исследование динамического метода анализа теплового режима в производственном помещении при нестационарных параметрах микроклимата / В. С. Соколова, И. В. Зайченко, А. С. Сизинцева // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 246-249. – EDN BZYEAV.

УДК 621.314
Солодов Кирилл Алексеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Solodov Kirill Alekseevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Табаров Бехруз Довудходжаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета
Tabarov Bekhruz Dovudkhodzhaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ANALYSIS OF VOLTAGE AND LOAD CHANGES IN ELECTRICAL SYSTEMS AND THEIR EFFECT ON THE EFFICIENCY OF REACTIVE POWER COMPENSATORS

Аннотация. В статье проводился анализ изменения напряжения и нагрузки в электротехнических системах и влияние их на эффективность и нормальной работы потребителей электроэнергии и традиционных компенсаторов реактивной мощности для определения и выбора наиболее оптимального устройства и способа его управления. Анализ изменения напряжения и нагрузки в электротехнических системах показал, что с целью наибольшей эффективности работы компенсирующих устройств, для каждого предприятия учитывая их графика электрических нагрузок, возникает необходимости индивидуально рассматривать применить управляемых компенсаторов реактивной мощности с определенными ступенями регулирования. Как показывает практика, такой подход не только позволяет повысить эффективности работы электротехнических систем, но и улучшает эксплуатационные характеристики электрооборудования, прежде всего самых компенсаторов реактивной мощности.
Abstract. The article analyzes changes in voltage and load in electrical systems and their impact on the efficiency and normal operation of electric power consumers and traditional reactive power compensators to determine and select the most optimal device and its control method. The analysis of voltage and load changes in electrical systems has shown that in order to maximize the efficiency of compensating devices, for each enterprise, taking into account their schedule of electrical loads, it becomes necessary to individually consider the use of controlled reactive power compensators with certain control levels. As practice shows, this approach not only makes it possible to increase the efficiency of electrical systems, but also improves the operational characteristics of electrical equipment, primarily the reactive power compensators themselves.
Ключевые слова: электротехническая система, компенсация реактивной мощности, традиционное компенсирующее устройство, отклонение питающего напряжения и нагрузки, ступени регулирования.
Key words: electrical system, reactive power compensation, traditional compensating device, supply voltage and load deviation, control steps.

Введение

Поддержание баланса реактивной мощности в электротехнических системах при разных режимных параметрах сети и нагрузки остаётся одной из ключевых задач эксплуатации потребителей электроэнергии [1]. Индуктивные нагрузки (двигатели, трансформаторы и др.) вызывают сдвиг фаз между током и напряжением, что приводит к потерям и просадкам напряжения [2]. Один из путей решения — применение регулируемых компенсирующих устройств, однако многообразие их типов требует системного подхода при выборе [3].

Анализ литературы показывает эволюцию исследований от электромеханических систем к активным преобразователям [1, 2]. В работах по синхронным компенсаторам раскрыты вопросы плавного регулирования, но отмечена низкая экономичность [1]. Исследования

конденсаторных установок указывают на их доступность при дискретном регулировании [3]. Нестабильности напряжения и графика нагрузок создают необходимость дополнительных решений для повышения эффективности и сохранения продолжительности работы электротехнических систем (ЭТС). В представленной работе проводится анализ существующих ЭТС для выявления величины отклонения и колебания нагрузки. Целью работы является анализ ЭТС при нестабильности нагрузки и обоснование применения наиболее эффективных многоступенчатых компенсаторов реактивной мощности. Ниже рассматривается изменение нагрузки выше и ниже номинального уровня, а также изменение напряжения при нестабильности нагрузки.

Положительное отклонение нагрузки

К этой категории относятся промышленные объекты, чей суточный график потребления электроэнергии характеризуется значительным превышением номинальных значений в определенные периоды. К этой категории входят ряд предприятии, такие как горнодобывающие предприятия, металлургические заводы с электродуговыми печами, объекты нефтегазового сектора, машиностроительные заводы, цементные производства, горно-обогатительные комбинаты, предприятия химической промышленности, чёрной и цветной металлургии, целлюлозно-бумажные комбинаты, а также объекты с преобладанием асинхронной нагрузки (насосные станции, компрессорные и вентиляционные установки) [2].

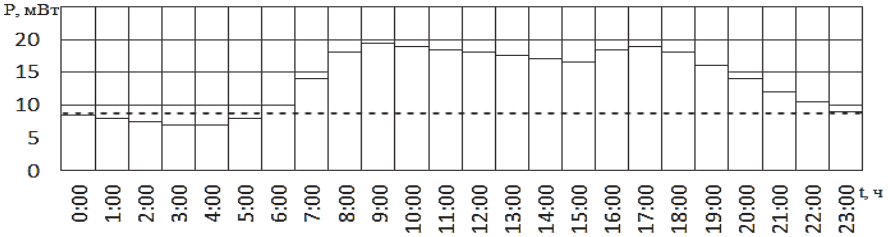


Рис. 1. Суточный график нагрузки горнодобывающего предприятия

Например, на АО «Лучегорский угольный разрез» (Приморский край) в 2025 году продолжено наращивание мощностей: поступление новых экскаваторов и самосвалов позволило увеличить добычу. На АО «Ургалуголь» (Хабаровский край) ведётся добыча на разрезах «Правобережный», «Буреинский» и шахте «Северная». Суточный график нагрузки таких предприятий имеет ярко выраженные пиковые зоны в утренние и дневные часы. На рисунке 1 представлен типичный суточный график горнодобывающего предприятия в период активной добычи.

Скиповые подъемники. На Кимкано-Сутарском ГОК (Еврейская автономная область) при разгоне подъемной машины происходит резкое увеличение реактивной мощности с просадкой напряжения [4]. Традиционные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) не способны компенсировать динамические колебания [4]. Исследования НГТУ показывают, что применение STATCOM позволяет стабилизировать напряжение и увеличить скорость подъема скипа на 15% [4].

Портовые терминалы. АО «Восточный порт» (Приморский край) — крупнейший угольный терминал России — использует портальные краны, создающие динамические нагрузки. В рамках модернизации предприятие инвестировало 20 млн рублей в энергосберегающее оборудование. Для компенсации реактивной мощности применяются автоматические установки (АУКРМ) с тиристорной коммутацией [3].

Отрицательное отклонение нагрузки

К этой категории относятся объекты с длительной работой на пониженных нагрузках: предприятия с дискретным циклом (машиностроительные заводы, производства электроники, приборостроения, мебельные фабрики, авиа- и судостроение, автомобилестроение, легкая и текстильная промышленность, предприятия пищевой промышленности с сезонным характером), а также объекты коммунальной инфраструктуры (водопроводные и канализационные насосные станции, котельные, трансформаторные подстанции, очистные сооружения, системы наружного освещения, дизельные электростанции резервного питания) [2].

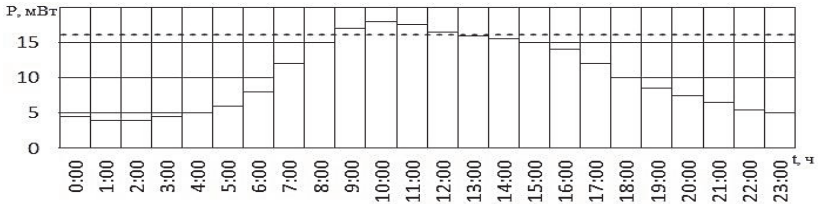


Рис. 2. Суточный график нагрузки предприятий со сменным режимом работы

Угольные разрезы в межсменные периоды. Для ООО «Разрез Тугнуйский» (Республика Бурятия) характерно снижение нагрузки в ночные часы, когда работают лишь водоотливные установки и вентиляция. Нагрузка варьируется от 5 МВт ночью до 18–20 МВт в пиковые часы. На рисунке 2 представлен суточный график с ночным провалом.

Обогатительные фабрики. На ГМК «Дальполиметалл» (Приморский край) нагрузка определяется графиком работы дробильно-размольного оборудования. В 2020 году предприятие получило 113 млн рублей субсидии на компенсацию затрат на электроэнергию . В межсменные перерывы коэффициент мощности может снижаться до 0,3–0,4, что требует высокой дискретности регулирования [4].

Объекты коммунальной инфраструктуры. Насосные станции водоснабжения имеют нагрузку, определяемую графиком водопотребления. В ночные часы нагрузка снижается на 40–60%, что создает проблемы с поддержанием коэффициента мощности [2].

Особенности работы компенсаторов при отклонениях напряжения

Эффективность компенсирующих устройств существенно зависит от уровня напряжения в точке подключения [4]. Для конденсаторных установок генерируемая мощность пропорциональна квадрату напряжения.

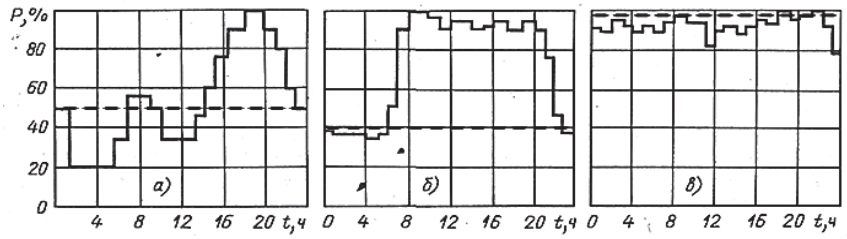


Рис. 3. Суточные графики потребления электроэнергии относительно номинального уровня: а – положительное и отрицательное отклонение нагрузки; б – положительное отклонение нагрузки; в – отрицательное отклонение нагрузки

Графики, представленные на рис. 3 подтверждают нестабильность нагрузки в ЭТС и необходимость применения управляемого компенсатора для нормальной работы, минимизации потерь и сохранения срока службы оборудования. Сравнительный анализ устройств FACTS показывает, что STATCOM наиболее эффективен для стабилизации напряжения при динамической нагрузке. Однако его применение ограничено более высокой стоимостью и сложностью обслуживания. Кроме того, при компенсации реактивной мощности возникают значительные гармонические составляющие [4].

Обоснование выбора оптимальных устройств

Проведенный анализ работы традиционных компенсирующих устройств при нестабильности питающего напряжения и нагрузки позволяет сформулировать рекомендации по выбору компенсирующих устройств [3, 4].

Для предприятий со стабильным графиком нагрузки (обогатительные фабрики, насосные станции) эффективны автоматические конденсаторные установки с 5–7 ступенями, обеспечивающие точность поддержания коэффициента мощности при минимальных затратах [3].

Для объектов с резкопеременной нагрузкой (скиповые подъемники, портальные краны) применение конденсаторных установок с контакторной коммутацией неэффективно из-за недостаточного быстродействия [4]. Оптимальны тиристорные компенсаторы или STATCOM [4].

При нелинейных искажениях максимальная эффективность достигается активными фильтрами [3]. STATCOM для объектов с циклической нагрузкой компенсирует реактивную мощность, подавляет высшие гармоники и стабилизирует напряжение [4]. Несмотря на высокую стоимость, при жестких требованиях к качеству электроэнергии такие устройства экономически оправданы.

Заключение

В работе выполнен анализ работы традиционных компенсирующих устройств при нестабильности питающего напряжения и нагрузки в электротехнических системах. Рассмотрены две категории предприятий: с нагрузкой выше номинальной (горнодобывающие предприятия, портовые терминалы) и ниже номинальной (угольные разрезы в межсменные периоды, обогатительные фабрики, объекты коммунальной инфраструктуры). Для каждой категории выявлены особенности графиков нагрузки и требования к компенсирующим устройствам.

Выбор компенсирующего устройства определяется характером графика нагрузки [3, 4], где для стабильных режимов достаточно 5–7 ступеней регулирования, а для динамических нагрузок требуется применение STATCOM или многоступенчатых традиционных компенсаторов с более широким пределом регулирования реактивной мощности.

Проанализировав технологические решения для повышения эффективности и обеспечения нормальной работы ЭТС и самих компенсаторов при нестабильности нагрузки, в качестве перспективного направления предлагается применение нового многоступенчатого компенсатора реактивной мощности для более оптимального регулирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2018. 832 с.
2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электрической энергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
3. Зобов И., Мелентьев А. Активные фильтры. Практика компенсации высших гармоник в электроустановках // Новости ЭлектроТехники. 2020. № 4–5 (124–125). С. 1–5.
4. Mitrofanov S.V., Balabanov A.M., Rusina A.G., Misnik Y.A., Shved I.A. Justification of STATCOM Systems Efficiency as an Objective of Improving the Quality of Electricity in a Mining Enterprise // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Yekaterinburg, 2022. P. 1370-1374. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017006.

УДК 681.586.32 : 004.438

Сомин Вадим Игоревич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Somin Vadim Igorevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kopytov Sergey Mihailovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

УПРАВЛЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМ АЦП HX711 ДЛЯ ВВОДА ДАННЫХ С ТЕНЗОМОСТОВ В LABVIEW С ПОМОЩЬЮ DAQ УСТРОЙСТВА
CONTROL OF A SPECIALIZED HX711 ADC FOR INPUTTING STRAIN GRID DATA INTO LABVIEW USING A DAQ DEVICE

Аннотация. В работе рассмотрен метод интеграции специализированного 24-битного АЦП HX711 в измерительный комплекс на базе среды LabVIEW. Разработана программа взаимодействия с микросхемой непосредственно через устройство сбора данных (DAQ), учитывающая специфику двухпроводного интерфейса HX711. Для получения требуемой длительности импульсов тактирования использован одновибратор на основе таймера типа NE555. Результаты работы могут быть применены при создании автоматизированных систем мониторинга веса и деформаций.

Abstract. This paper examines a method for integrating a specialized 24-bit HX711 ADC into a LabVIEW-based measurement system. A program for interacting with the chip directly through a data acquisition (DAQ) device was developed, taking into account the specifics of the HX711's two-wire interface. A monostable multivibrator based on an NE555 timer was used to achieve the required clock pulse duration. The results of this study can be applied in the development of automated weight and deformation monitoring systems.
Ключевые слова: тензомост, HX711, LabVIEW, DAQ-устройство, таймер NE555, автоматизация измерений.
Key words: strain gauge, HX711, LabVIEW, DAQ device, NE555 timer, measurement automation.

Введение

Специализированная микросхема HX711 представляет собой удобное и экономичное устройство для работы с тензомостами, преобразующими величину деформации в электрический сигнал [1]. Она имеет два канала A и B, к которым можно подключить два полных тензомоста. Каналы содержат входной дифференциальный усилитель и АЦП с разрешением 24 бит. Для канала A можно установить коэффициент усиления 64 или 128, а для канала B коэффициент усиления равен 32. Частота получения результатов измерений до 80 Гц. Для работы достаточно одного напряжения питания +5 В. Для работы с микросхемой производитель предлагает специализированный двухпроводный последовательный интерфейс.

На основе микросхемы HX711 выпускают Arduino-модули. Для работы с ними доступны библиотеки для использования в среде Arduino IDE. В случае автоматизации эксперимента на базе компьютера применение платформы Arduino является «узким местом» по нескольким причинам. Во-первых, результаты измерений контроллер Arduino передает в компьютер в текстовом виде через виртуальный COM порт, что существенно замедляет работу, отвлекает ресурсы и усложняет систему. Во-вторых, теряется гибкость управления, а в системе появляется «лишнее» промежуточное устройство в виде контроллера Arduino [2-4].

Преимущества использования среды LabVIEW для автоматизации экспериментальных работ известны [5]. Эта среда имеет возможность работать с платформой Arduino как по протоколу VISA через виртуальный COM порт, так и с помощью набора программных инструментальных средств LINX Toolkit. Однако более оптимальным решением является отказ от использования контроллера Arduino и непосредственное управление HX711 с помощью портов DAQ устройства. Это целесообразно потому, что в большинстве решений по автоматизации на базе среды LabVIEW используются подобные устройства для решения разнообразных задач.

Целью работы является разработка аппаратной и программной поддержки для проведения тензометрических измерений на базе среды LabVIEW и DAQ устройств.

Основная часть

Рассмотрим особенности управления микросхемой HX711. Временные диаграммы протокола обмена с микросхемой приведены на рис. 1 [1].

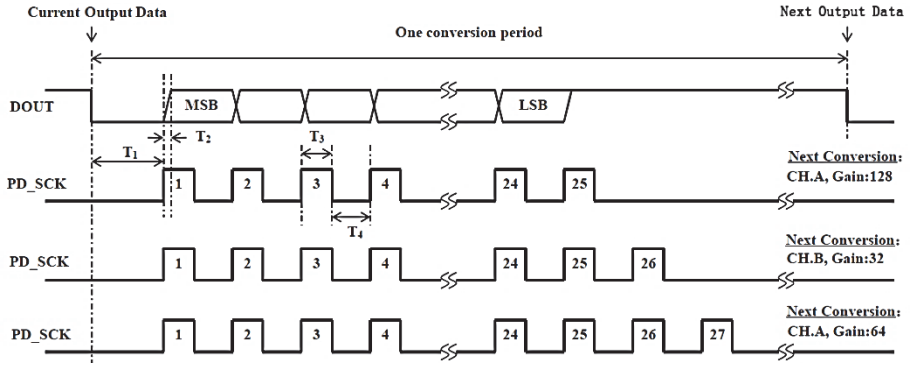


Рис. 1. Временные диаграммы и принципы управления выбором выходных данных, входа и усиления

Тактовые импульсы подают на вход PD_SCK, а биты измеренных данных считывают с выхода DOUT старшим битом вперед. Эти выводы используются не только для получения данных, но и для выбора входа, выбора коэффициента усиления и управления питанием. Если выходные данные еще не готовы к считыванию, то выход DOUT находится в высоком состоянии. Входной сигнал PD_SCK в это время должен быть низким. Когда выход DOUT переходит в низкое состояние, данные готовы. Для их получения необходимо подать от 25 до 27 положительных тактовых импульсов на вход PD_SCK. После прихода положительного фронта PD_SCK бит данных появляется на выходе DOUT. За 24 такта будут получены все биты, начиная со старшего. 25-й такт на входе PD_SCK переведет вывод DOUT в высокое состояние. Выбор входа и коэффициента усиления для следующего цикла считывания управляется количеством входных импульсов PD_SCK (табл. 1).

Таблица 1

Выбор входного канала и коэффициента усиления

Число импульсов PD_SCK	Входной канал	Усиление
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Длительность характерных временных интервалов, отмеченных на рисунке 1, должна соответствовать параметрам, приведенным в табл. 2. Необходимо обратить особое внимание на значение параметра T3 (время высокого уровня PD_SCK), максимальное значение которого не должно превышать 50 мкс. В случае превышения этого времени микросхема HX711 переходит в режим сна.

Таблица 2

Ключевые параметры временных диаграмм

Обозначение	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T1	DOUT от нисходящего фронта к восходящему фронту PD_SCK	0.1			мкс
T2	Переход от восходящего фронта PD_SCK к готовности данных DOUT			0.1	мкс
T3	Время высокого уровня PD_SCK	0.2	1	50	мкс
T4	Время низкого уровня PD_SCK	0.2	1		мкс

Поскольку такую длительность должно формировать использованное экономичное DAQ устройство типа NI USB-6009 с помощью программы, было проведено измерение фактического времени импульса, которое составило 1 мс. Для укорочения импульса использован таймер типа 555 (КР1006ВИ1). Схема его включения в режиме одновибратора, который запускается спадом входного сигнала, приведена на рис. 2.

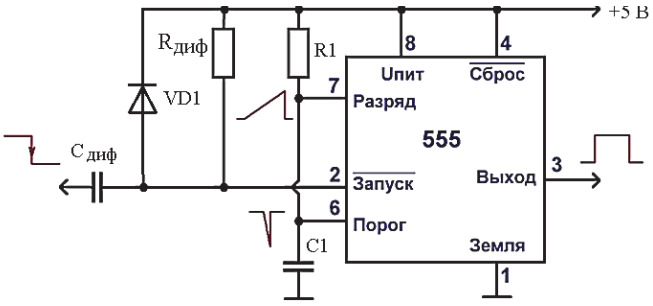


Рис. 2. Принципиальная схема одновибратора на основе КР1006ВИ1

Входная дифференцирующая CR-цепь формирует короткий отрицательный импульс при спаде входного сигнала. Ёмкость конденсатора составляет 100 пФ, а сопротивление резистора 10 кОм. Диод VD1 защищает вход таймера от всплесков напряжения выше питания при переходе входного сигнала в высокое состояние. Длительность выходного импульса порядка 8 мкс задает цепь R1C1. Сопротивление резистора 10 кОм, а емкость конденсатора 680 пФ.

Обмен с HX711 компьютер осуществляет, используя DAQ устройство типа NI USB-6009. Тактовые импульсы формируются с помощью линии порта P0.0, а ввод данных выполняется через линию порта P0.1. Линия P0.0 подключена ко входу дифференцирующей CR-цепи одновибратора, выход которого связан уже непосредственно со входом PD_SCK микросхемы HX711. Программа на LabVIEW, реализующая протокол обмена, приведена на рисунке 3.

Первоначально создаются два канала – выходной цифровой канал тактирования на линии P0.0 и входной цифровой канал ввода данных на линии P0.1. После этого во внешнем цикле While Loop происходит получение данных. Сначала во внутреннем цикле While Loop происходит повторяющийся опрос и ожидание спада уровня сигнала на выходе DOUT. Затем в цикле For Loop 25 раз последовательно происходят два действия. Первым действием является формирование спада сигнала на P0.0 для запуска одновибратора, а вторым чтение выхода HX711 и подача высокого уровня на P0.0 для подготовки к чтению следующего бита данных. Данная последовательность действий обусловлена использованием структуры Flat Sequence, которая выполнится только после того, как на ее границу поступят все потоки.

Массив выходных бит накапливается в индексируемом туннеле на правой границе цикла For Loop. После завершения данного цикла происходит обработка полученного массива бит. В рассматриваемом варианте программы из 25-разрядного массива сначала выделяется 16-разрядный массив со старшими разрядами значения. Затем осуществляется реверс полученного массива и преобразование массива битов в целое число со знаком.

а)

б)

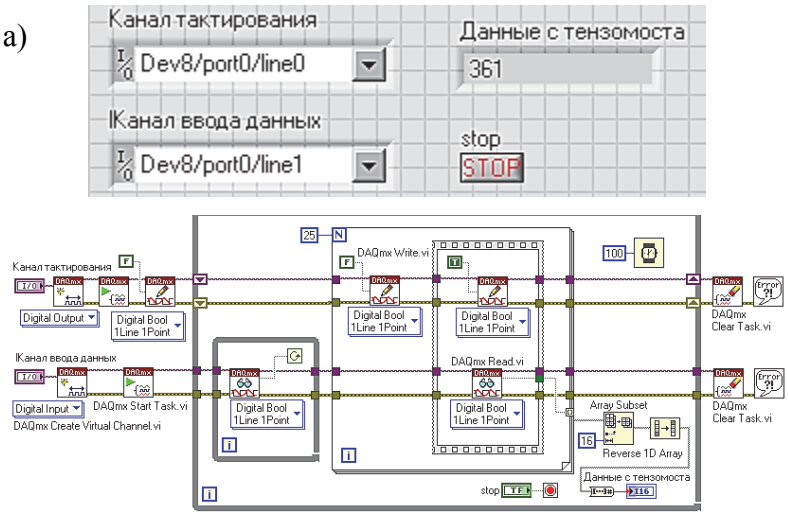


Рис. 3. Лицевая панель программы обмена (а) и ее блок-диаграмма (б)

Собранный макет устройства был протестирован и подтвердил свою работоспособность.

Заключение

Таким образом, в результате выполнения работы получены результаты, обладающие практической полезностью. Во-первых, решена задача преобразования длительности выходных импульсов DAQ устройства под временные параметры микросхемы HX711 за счет использования внешнего одновибратора. Во-вторых, разработана программа в среде LabVIEW для управления данной микросхемой, что позволяет проводить комплексную автоматизацию эксперимента с использованием тензометрических измерений на базе компьютера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. – URL: https://repository.umy.ac.id/bitstream/handle/123456789/19545/Lampiran4.pdf?sequence=13 (дата обращения: 22.03.2026).

2. Буримский Н. А., Терехин М. А., Чернова С. В. Программно-аппаратный комплекс контроля давления, прикладываемого захватным устройством к объекту // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 4. С. 165–176. doi: 10.21685/2307-5538-2025-4-19

3. Поздняков А. О., Чернышов М. И., Семенча А. В., Николаев В. И., Кобыхно И. А., Фадин Ю. А. Прибор для регистрации параметров трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 950–955.
4. Тензодатчики и HX711. Руководство пользователя. – URL: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo/ (дата обращения: 22.03.2026).
5. Магда, Ю. С. LabVIEW: Практический курс для инженеров и разработчиков / Ю. С. Магда. — М. : ДМК Пресс, 2012. — 208 с.

УДК 621.38
Султанова Татьяна Андреевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sultanova Tatyana Andreevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Любушкина Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Liubushkina Nadezhda Nikolaevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

РАЗРАБОТКА ГИГРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОКЛИМАТА
DEVELOPMENT OF A HYGROMETER FOR DETERMINING MICROCLIMATE INDICATORS

Аннотация. Гигрометр предназначен для системы контроля показателей микроклимата в помещении – в частности, уровня относительной влажности и температуры воздуха. Прибор обеспечивает не только измерение параметров, но и сохранение полученных данных с последующей передачей на электронный ресурс для дальнейшего анализа и визуализации. В ходе работы рассмотрены аналоговые и цифровые устройства аналогичного назначения, проанализированы их методы измерения и способы взаимодействия с окружающей средой.
Abstract. The hygrometer is designed for indoor microclimate monitoring systems, specifically relative humidity and air temperature. The device not only measures parameters but also stores the data and then transfers it to an electronic resource for further analysis and visualization. This paper examines analog and digital devices for similar purposes, analyzing their measurement methods and interactions with the environment.
Ключевые слова: Гигрометр, микроклимат помещения, относительная влажность воздуха, система контроля микроклимата, датчик влажности и температуры.
Key words: Hygrometer, indoor microclimate, relative air humidity, microclimate control system, humidity and temperature sensor.

Введение

Воздух и его параметры являются одним из ключевых факторов, обеспечивающих технологическую стабильность и безопасность на производстве гражданских самолетов. Температура и влажность воздуха напрямую влияют на качество сборки, состояние материалов и надежность конечного продукта - гражданского самолета [1].

В авиационной промышленности поддержание строго заданных климатических условий – не рекомендации, а обязательное требование. Отклонение температуры приводит к следующим последствиям:

- деформации композитных материалов и клеевых соединений;
- коррозии металлических элементов конструкции;
- нарушению герметизации узлов и систем;
- снижению точности измерительного и монтажного оборудования.

Непрерывный мониторинг и регулирование микроклимата в цехах путем проветривания и осушения воздуха, особенно в сборочных зонах, окрасочных камерах и складах – критически важная задача.

Гигрометр – это специализированный прибор, предназначенный для одновременного измерения двух ключевых параметров:

- относительная влажность воздуха – процентного содержания водяного пара. Для многих производственных процессов, таких как покраска или нанесения герметика, влажность должна находиться в узком диапазоне от 40 до 60 % влажности. Повышенная влажность провоцирует выпадение конденсата на поверхностях, что приводит к коррозии, нарушению химических процессов и необратимой порче материалов. С другой стороны, чрезмерно сухая среда вызывает испарение пластификаторов, возникновение внутренних поражений и, как следствие, образование микротрещин, а также критическое снижение адгезионной прочности покрытий и клеевых соединений [2, 3].

- температура воздуха – критический фактор, влияет на скорость химических процессов, вязкость материалов.

Стабильная температура в производстве является необходимым условием для обеспечения технологических процессов и, как следствие, стабильного качества выпускаемой продукции, а также соблюдение нормативов охраны труда.

В случае выхода параметров производственной среды за пределы допустимых значений в производственных подразделениях, должны быть предприняты следующие действия: информацию о завышенных или заниженных показателях заносят в журнал, принимаются меры, исключающие возможность попадания материалов, полуфабрикатов, деталей, сборочных агрегатов и покупных комплектовочных изданий в работу или для крепления на воздушное судно. Сотрудник, обнаруживший несоответствие, сообщает руководителю для дальнейшего оформления ведомости дефектов на изделия, при выполнении работ на котором были выявлены отклонения параметров производственной среды от допустимых значений согласно СТП 03-192. Работы в подразделении останавливаются до проведения параметров производственной среды до допустимых значений [3].

Разработка структурной схемы устройства

Литературный обзор показал, что приборы для определения температуры и влажности имеют большую номенклатуру и широкий функционал, у большинства моделей лишь один существенный недостаток – все гигрометры показывают параметры воздуха только в момент работы в режиме реального времени, не осуществляют фиксацию информации о параметрах воздуха в течения дня с заданными интервалами времени.

Для авиационного производства необходим компактный гигрометр на базе современного микроконтроллера, способный осуществлять непрерывный мониторинг параметров микроклимата в производственных помещениях [4].

Устройство должно:

- автоматически измерять ключевые показатели с заданной периодичностью;

- передавать данные в режиме реального времени в электронную таблицу с автоматическим обновлением информации;

- хранить собранные данные в течение одного месяца с последующей циклической перезаписью (удалением устаревших записей);

- минимизировать ручной труд и сократить лишние движения персонала, связанные со снятием показаний и ручной фиксацией результатов в учётных журналах.

Для реализации предложенной концепции разработана структурная схема устройства (рис. 1) [5].

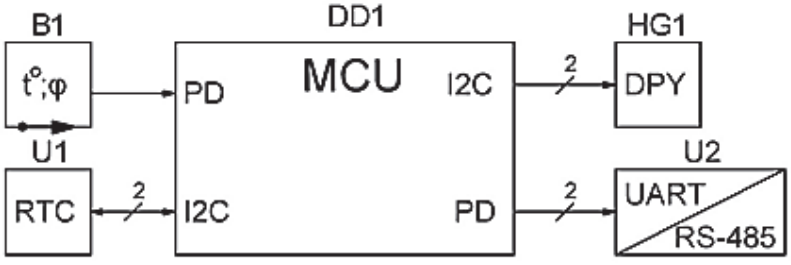


Рис. 1. Структурная схема устройства

Схема состоит из следующих компонентов:

- центральное устройство DD1 – плата Arduino Nano на базе микроконтроллера ATmega328, с увеличенным объёмом FLASH и EEPROM-памяти, а также с большей тактовой частотой. Плата имеет всю необходимую периферию – кварцевый резонатор, кнопки сброса, разъём Mini-USB;

- цифровой датчик B1 – датчик-сенсор, регистрирующий температуру и относительную влажность;

- модуль часов реального времени (RTC) U1 – для генерации временных меток;

- символьный LCD-дисплей HG1 модель LCD1602. Индикатор подключается по интерфейсу I2C, на нем визуализируются данные о температуре и влажности воздуха.

- USB-интерфейс U2 – осуществляет передачу собранных данных на персональный компьютер. Связь между микроконтроллером DD1, модулем RTC и дисплеем осуществляется через интерфейс I2C.

Заключение

В рамках разработана концепция компактного гигрометра для непрерывного контроля микроклимата на авиационном производстве. Измерительный прибор – это полноценная система мониторинга, она автоматически фиксирует температуру и влажность с заданной периодичностью, что сокращает лишние движения сотрудников производственного центра и исключает необходимость ручного сбора и записи данных.

Дополнительным преимуществом стала встроенная энергонезависимая память с месячным циклом хранения данных. По истечении этого срока система автоматически перезаписывает устаревшую информацию – это обеспечивает непрерывность мониторинга без дополнительного обслуживания. Такой функционал критически важен для авиационного производства, где отклонения температуры и влажности способны спровоцировать коррозию металлических деталей, деформацию композитных материалов или нарушение герметизации узлов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теплотехнические измерения и экспериментальные методы исследования : практикум / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020. – 134 с. – ISBN 978-5-7422-7060-7. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/116154.html (дата обращения: 01.04.2026). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

2. Лепявко, А. П. Методы измерения влажности газов. Поверка гигрометров : учебное пособие / А. П. Лепявко. – Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2008. – 48 с. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/44251.html (дата обращения: 01.04.2026). – Режим доступа: для авторизир. пользователей

3. Лепявко, А. П. Методы измерений влажности твердых и жидких веществ. Поверка влагомеров : конспект лекций / А. П. Лепявко. – Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2011. – 52 с. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/44347.html (дата обращения: 01.04.2026). – Режим доступа: для авторизир. пользователей

4. Макаров, С. Л. Arduino Uno и Raspberry Pi 4: от схемотехники к интернету вещей : практическое руководство / С. Л. Макаров. – 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : ДМК Пресс, 2024. - 242 с. – ISBN 978-5-93700-272-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2205061 (дата обращения: 01.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

5. Arduino®. Полный учебный курс. От игры к инженерному проекту : практическое пособие / А. А. Салахова, О. А. Феоктистова, Н. А. Александрова, М. В. Храмова. - Москва : Лаборатория знаний, 2024. - 178 с. - (Школа юного инженера). - ISBN 978-5-93208-670-4. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2167578 (дата обращения: 01.04.2026). – Режим доступа: по подписке.

УДК 621.3:669.1
Султонов Мехрон Низомджонович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sultonov Mehron Nizomdzhonovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Дерюжкова Нелли Егоровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Deryuzhkova Nelly Egorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИВОДОВ СТАЛЕВОЗА
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TECHNICAL – ECONOMIC INDICATORS STEEL CARRIER DRIVES

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ двух типов приводов, применяемых в конструкции сталевозных тележек металлургических предприятий. Оценка проведена по трем критериям: энергетическая эффективность (КПД) в диапазоне рабочих нагрузок, качество управления переходными процессами и годовые эксплуатационные затраты. Показано, что применение частотно-регулируемого электропривода обеспечивает двукратное снижение потерь энергии в режимах маневрирования и сокращение эксплуатационных расходов на 50 % по сравнению с гидравлическими системами.
Abstract. The paper presents a comparative analysis of two types of drives used in the design of steel-carrying vehicles at metallurgical plants. The evaluation was carried out according to three criteria: energy efficiency (EEF) in the operating load range, transient control quality and annual operating costs. It is shown that the use of a variable-frequency electric drive provides a twofold reduction in energy losses in maneuvering modes and a 50% reduction in operating costs compared to hydraulic systems.
Ключевые слова: сталевозная тележка, электропривод, гидравлический привод, коэффициент полезного действия, энергоэффективность, частотное регулирование.
Key words: steel-carrying vehicle, electric drive, hydraulic drive, efficiency factor, energy efficiency, frequency regulation.

Введение

Производительность металлургического комплекса в значительной степени определяется надежностью внутрицехового транспорта. Сталевозные тележки обеспечивают перемещение ковшей с расплавленным металлом от печей к участкам разливки, и любой простой этого звена приводит к сбоям во всей технологической цепи. Условия эксплуатации такого оборудования характеризуются комплексом негативных факторов: интенсивное тепловое излучение, запыленность воздуха абразивными частицами, вибрационные и ударные нагрузки при движении по рельсовым путям [1, 3].

Выбор типа привода – гидравлического или электрического – определяет не только надежность, но и экономику эксплуатации. Если гидравлические системы исторически доминировали благодаря компактности при передаче больших усилий, то развитие силовой электроники сделало электрические решения конкурентоспособными по всем ключевым параметрам. Цель настоящей работы – количественное сопоставление этих двух типов приводов применительно к условиям работы сталевозов.

Энергетическая эффективность при различных нагрузках

Для оборудования, работающего в циклическом режиме с частыми разгонами и торможениями, определяющее значение имеет КПД не только при номинальной, но и при частичной нагрузке. В табл.1 представлены значения КПД гидравлического привода и электропривода на базе частотного преобразователя с асинхронным двигателем (ПЧ + АД).

Таблица 1

Сравнение КПД гидравлического и электрического приводов при разных нагрузках [5]

Нагрузка, % от номинала	КПД гидравлического привода, %	КПД электропривода (ПЧ + АД), %
20	35	78
40	48	85
60	55	91
80	62	93
100	65	94

Из данных табл.1 видно, что гидравлическая система теряет до двух третей подводимой энергии при малых нагрузках. Это объясняется конструктивными особенностями: насос работает постоянно, а регулирование осуществляется дросселированным потока, что неизбежно ведет к нагреву рабочей жидкости. Электропривод, напротив, потребляет мощность пропорционально нагрузке, что обеспечивает стабильно высокий КПД во всем диапазоне. В режимах маневрирования (нагрузка 20–40 %), наиболее характерных для сталевозов, потери энергии в гидравлике в 2–2,5 раза выше.

Экспериментальные данные, опубликованные в работах [4] и [5], подтверждают этот вывод. В серии опытов, описанных в [5], замена дроссельного регулирования на частотное позволила снизить энергопотребление гидравлического стенда на 35–40 % при работе в повторно-кратковременном режиме. Даже специализированные разработки, направленные на повышение эффективности гидросистем (например, проект датской программы [5]), ставят целью достижение среднего КПД лишь на уровне 70 %, что уступает показателям серийных электроприводов. Аналогичные выводы о преимуществе электрических систем по показателю КПД при частичных нагрузках представлены в работе [2], где на примере промышленного оборудования показано, что применение частотного регулирования позволяет снизить потери энергии до 40 % по сравнению с дроссельным регулированием в гидравлических системах.

Технические показатели электроприводов

Оценка динамических характеристик показывает принципиальное различие в поведении двух типов приводов при пуске. Для гидравлической системы характерен резкий скачок ускорения в начальный момент, формирующий рывок, после чего скорость нарастает неравномерно. Первые секунды движения отличаются замедленным набором скорости, затем следует ускорение, что вносит нестабильность в движение. Это создает дополнительные импульсные нагрузки на ходовую часть и может приводить к колебаниям жидкого металла в ковше.

Использование частотно-регулируемого электропривода (ПЧ) позволяет реализовать иной закон управления. Плавное изменение выходной частоты преобразователя обеспечивает линейный рост скорости от нулевой отметки до требуемого значения. Благодаря этому исключаются рывки в момент трогания, ускорение остается равномерным на всем участке разгона, а динамические воздействия на трансмиссию сводятся к минимуму. Дополнительное преимущество ПЧ – возможность точного поддержания заданной скорости при маневрировании, что особенно важно при подводе ковша к разливочному желобу.

Эксплуатационные затраты

Сопоставление затрат на эксплуатацию позволяет выявить преимущества электрического привода перед гидравлическим. Основное различие обусловлено типом используемого энергоносителя. Гидравлические агрегаты потребляют дизельное топливо, стоимость которого подвержена рыночным колебаниям и имеет долгосрочную тенденцию к удорожанию. Электропривод работает от сети или аккумуляторов, используя электроэнергию, вырабатываемую в том числе гидро и ветроэлектростанциями, что делает ее цену более стабильной и в среднем ниже.

Дополнительный вклад вносит техническое обслуживание. В гидросистемах требуется периодическая замена рабочих жидкостей, фильтрующих элементов, уплотнительных колец, а также ремонт насосов и распределительной аппаратуры. Для электродвигателя с частотным преобразователем регламентные работы сводятся к плановым осмотрам и контролю

изоляции. Совокупный эффект от снижения энергозатрат и упрощения обслуживания делает электрический сталевоз экономически более предпочтительным вариантом при долгосрочной эксплуатации.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

Электропривод с частотным регулированием обеспечивает КПД на уровне 78–94 % во всем диапазоне нагрузок, что в 1,5–2 раза выше, чем у гидравлического аналога. Этот результат согласуется с данными зарубежных исследований [4, 5].

Линейный характер разгона, реализуемый средствами силовой электроники, исключает рывки при трогании с места и повышает безопасность транспортировки жидкого металла.

Годовые эксплуатационные затраты при использовании электропривода снижаются на 50 % за счет экономии энергии и сокращения расходов на техническое обслуживание.

Полученные результаты обосновывают целесообразность замены гидравлических систем на электрические при проектировании и модернизации сталевозного транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горшков А.И. Транспортные и погрузочно-разгрузочные машины металлургических заводов / А.И. Горшков, В.П. Захаров. – 3-е изд. – М.: Руда и Металлы, 2019. – 412 с.
2. Белов М.К. Сравнительный анализ энергоэффективности приводов промышленного оборудования / М.К. Белов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – № 2. – С. 23–29.
3. Фассбендер Д. Сравнение энергоэффективности различных концепций силовых приводов для большегрузных мобильных машин / Д. Фассбендер, К. Брах, Т. Минав // Международный журнал гидравлики и пневматики. – 2024. – Т. 25, № 2. – С. 127–144.
4. Fassbender D. Comparison of energy efficiency of different power drive concepts for heavy-duty mobile machinery / D. Fassbender K. Brach, T. Minav // International Journal of Fluid Power. – 2024. – Vol. 25, No. 2. – P. 127–144. Бенич Я. Детальное экспериментальное сравнение энергоэффективности пропорциональной гидравлической системы и системы с прямым приводом / Я. Бенич, Д. Брезак, Ж. Шитум и др. // Передовые инженерные разработки. Результаты. – 2023. – Т. 18. – С. 101178.
5. Benić J. Detailed experimental comparison of energy efficiency of proportional hydraulic system and direct driven hydraulics / J. Benić D. Brezak, Ž. Šitum et al. // Results in Engineering. – 2023. – Vol. 18. – P. 101178. Энергоэффективная автономная гидравлическая приводная концепция [Электронный ресурс] // EUDP (Датская программа развития энергетических технологий и демонстрации). – 2018–2021. – Режим доступа: https://eudp.dk/en/node/15737 (дата обращения: 10.03.2026).

УДК 621.317.33

Фатахова Кристина Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Fatakhova Kristina Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kopytov Sergey Mihailovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

СРАВНЕНИЕ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ АНАЛОГОВОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРАХ
COMPARISON AND SELECTION OF ANALOG GALVANIC ISOLATION COMPONENTS FOR USE IN MEDICAL DEVICES

Аннотация. Статья посвящена анализу методов и компонентов для обеспечения гальванической изоляции в аналоговых входных трактах медицинской аппаратуры. В условиях жестких требований по технике безопасности к защите пациента, выбор адекватного метода передачи аналогового сигнала без потери точности является важной задачей.

Abstract. This article analyzes methods and components for achieving galvanic isolation in the analog input paths of medical equipment. Given the stringent safety requirements regarding patient pro-

tection, selecting an appropriate method for transmitting analog signals without compromising accuracy constitutes a critical task.

Ключевые слова: электробезопасность, аналоговая гальваническая развязка, изолирующий усилитель, медицинский прибор, линейность сигнала.
Key words: electrical safety, analog galvanic isolation, isolation amplifier, medical device, signal linearity.

Введение

Гальваническая развязка в медицинской технике является критически важным требованием безопасности [1]. Она необходима по нескольким причинам. Важнейшей из них является защита пациента от поражения электрическим током. Также необходимо защитить сам прибор от высоковольтного импульса при использовании дефибриллятора. Еще одной причиной является снижение токов утечки, возникающих из-за паразитных емкостей кабелей, до безопасного уровня. Наконец в случае, если к пациенту подключено сразу несколько приборов, потенциалы их земель могут отличаться. В результате возникают уравнивающие токи, создающие помехи на входах. При развязке каждый прибор будет иметь свою «плавающую» землю, что позволяет убрать помехи.

Целью работы является обзор схемных решений для гальванической развязки и оценка возможности их применения во входных каскадах медицинских диагностических приборов, использующих электрический контакт с пациентом.

Основная часть

На практике используют три основных метода гальванической развязки: оптическую развязку с помощью оптопар, емкостную развязку с передачей сигналов через высоковольтные конденсаторы и трансформаторную развязку с передачей сигналов через магнитное поле [2]. Оптопара не обладает линейной передаточной характеристикой. Поэтому передать аналоговые сигналы через оптопару без искажений в отличие от цифровых сигналов нельзя. Существует способ линеаризации передаточной характеристики с помощью дифференциальной диодной или транзисторной оптопары. В таких оптопарах светодиод одновременно освещает оба фотоприемника, параметры которых совершенно одинаковы. Принципиальная схема классического униполярного изолирующего усилителя с дифференциальной диодной оптопарой приведена на рис. 1.

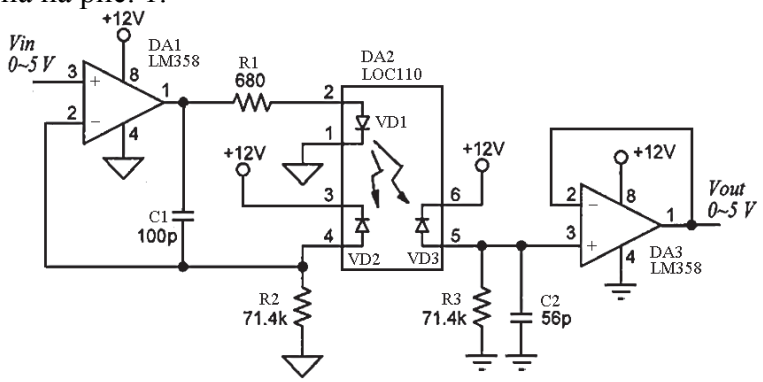


Рис. 1. Принципиальная схема униполярного изолирующего усилителя с дифференциальной диодной оптопарой

Резистор R1 ограничивает ток через светодиод. Фотодиод VD2 находится в цепи отрицательной обратной связи (ООС) входного операционного усилителя (ОУ) DA1. Источник +12 В смещает его обратно. Поэтому фототок пропорционален световому потоку светодиода VD1. Протекая через резистор R2, фототок выделяет на нем напряжение. Поскольку фототок мал, требуется использовать высокоомный резистор. Напряжение с R2 поступает на инвертирующий вход DA1 и в силу принципа работы ОУ с ООС должно сравняться с входным напряжением Vin на неинвертирующем входе. Фотодиод VD3 также смещен обратно уже другим источником +12 В, изолированным от первого источника, поэтому «земли» на схеме обозначены по-разному. Через VD3 протекает такой же фототок, как и через VD2, следова-

тельно, на резисторе R3 выделяется такое же напряжение, как и на R2. Повторитель напряжения на ОУ DA3 обеспечивает необходимое для последующих каскадов значение тока.

Особенностью ОУ LM358является возможность работать в схемах с однополярным питанием от 3 до 32 вольт. Размах выходного напряжения от 0 В до V_{CC}-1,5 В. Коэффициент передачи изолирующего усилителя равен отношению сопротивлений резисторов R3 и R2. В данном случае он единичный. Схему на рисунке 1 можно модернизировать с целью передачи двухполярного сигнала. Для этого необходимо использовать две дифференциальные диодные оптопары – каждую для одной полярности. Также придется применить двухполярные источники питающих напряжений.

В настоящее время изолирующие усилители производят в одном корпусе. Например, усилитель HCPL-7851 компании Broadcom с оптической развязкой предназначен для измерения напряжения в минимально гарантированной полосе частот 40 кГц с максимальной нелинейностью, равной 0,8 % [3]. Динамический диапазон по входу составляет ±200 мВ. Этот усилитель основан на сигма-дельта АЦП, оптически связанном с интегральным выходным ЦАП. Типовая схема применения HCPL-7851 для измерения напряжения приведена на рисунке 2.

Входная секция АЦП запитывается от источника +5 В, выполненном на интегральном стабилизаторе 78L05. Напряжение питания подают на выводы 1 и 4. Входной сигнал с амплитудой до ±200 мВ через фильтр нижних частоты на элементах R1C3 заводят на выводы 2 и 3. Выходная секция питается также напряжением +5 В, которое подают на выводы 8 и 5. Выходной дифференциальный сигнал снимают с выводов 6 и 7. Для преобразования этого сигнала в напряжение относительно земли используют дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления 5 на ОУ DA3. Интегрирующие конденсаторы C4 и C5 отфильтровывают высокочастотный шум модуляции-демодуляции.

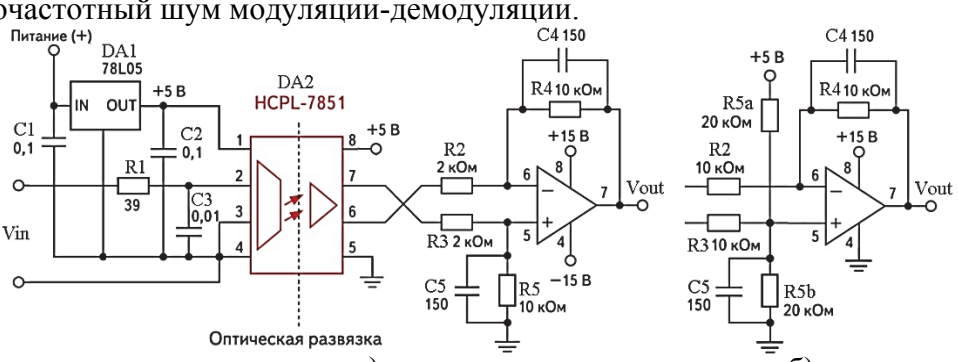


Рис. 2. Типовая схема применения HCPL-7851 для измерения напряжения выходного каскада на ОУ: а) – от двух источников питания; б) – от одного источника питания

Цепь за усилителем может работать от одного источника питания, если добавить резистор R5a (рисунок 2, б). Тогда выходной сигнал будет однополярный. Коэффициент усиления необходимо уменьшить, чтобы схема могла работать во всем диапазоне входных напряжений.

Представителем изолирующих усилителей с емкостной развязкой является прецизионная микросхема ISO122 компании Texas Instruments [4]. Одним из типов корпусов является тип DIP16, в котором выполнены только восемь выводов: четыре с одного конца и четыре с другого. Это сделано, чтобы пространственно разнести входную и выходную часть, тем самым обеспечив напряжение изоляции 1500 В. Полоса пропускания сигнала составляет 50 кГц, а коэффициент нелинейных искажений всего 0,02 %. Диапазон напряжений питания от ±4,5 до ±18 вольт. Входное напряжение может достигать ±12,5 В, а входное сопротивление равно 200 кОм. Коэффициент передачи составляет единицу. На рисунке 3 приведена схема включения данной микросхемы, дополненная фильтром низких частот для подавления пульсаций на выходе.

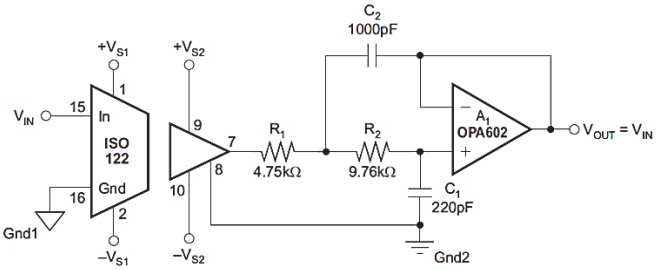
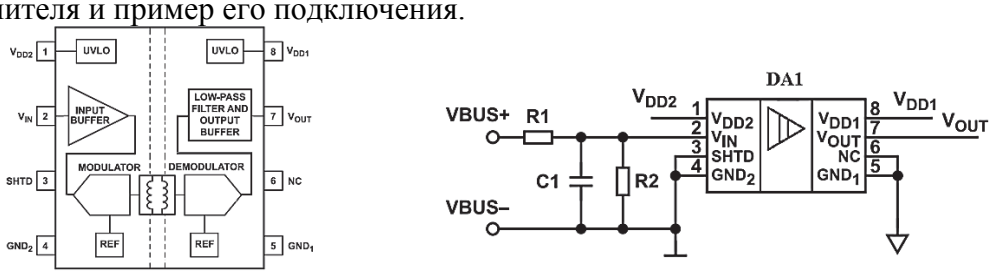


Рис. 3. Схема развязки на ISO122 с фильтром для подавления пульсаций

Примером изолирующего усилителя с трансформаторной развязкой служит микросхема компании Analog Devices ADUM4195-1, производимая в корпусе SOIC8 [5]. Она имеет широкий диапазон входного/выходного напряжения от 0,25 В до 4,3 В, вход с высоким импедансом, фиксированный коэффициент передачи, равный единице. Диапазон напряжения питания входного и выходного каскада составляет от 4,5 В до 5,5 В, напряжение изоляции 5000 В, а полоса пропускания сигнала 210 кГц. На рис. 4 приведены внутренняя структурная схема усилителя и пример его подключения.



а) б)

Рис. 4. Схемы усилителя: а) внутренняя структурная схема; б) пример подключения ADUM4195-1

Из структурной схемы следует, что входной сигнал модулирует высокочастотную несущую, которая проходит через трансформаторную развязку. Вторичное напряжение затем демодулируется, создавая исходный сигнал. Резистор и конденсатор на входе усилителя образуют фильтр низких частот.

Во всех рассмотренных схемах требуются изолированные друг от друга источники питающих напряжений для входного и выходного каскадов. Во входной цепи, как правило, потребление тока незначительное, поскольку в ней мало элементов, а основная обработка сигналов выполняется в схеме после выходного каскада. Поэтому целесообразно сетевые или аккумуляторные источники питания использовать в выходной цепи, а во входную цепь передавать питание с помощью преобразователей с гальванической развязкой. Примером такого устройства может служить гибридная микросхема A1212S, которая представляет собой 2-х ватный преобразователь напряжения +12 В в два других напряжения ±12 В, изолированных от входного. Такие преобразователи выпускают на различные сочетания напряжений.

Заключение

Сравнение рассмотренных решений гальванической развязки показывает, что их можно использовать во входных каскадах медицинских приборов. Однако схемы на рисунках 1 и 2 требуют достаточно много дополнительных элементов и громоздки. Схема на рисунке 3 использует двухполярное питание и работает с соответствующим сигналом, а схема на рисунке 4 требует одного напряжения +5 В и пропускает однополярный сигнал с более высокой частотой, чем предыдущая. Кроме того эти усилители обладают наибольшей точностью преобразования и стабильностью параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уэбстер, Дж. Медицинские приборы. Разработка и применение. – М.: Техносфера, 2004. – 620 с.
2. Лоскутов, Е. Д. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебное пособие / Лоскутов Е. Д. – Саратов : Вузовское образование, 2016. – 264 с.
3. HCPL-7851. Hermetically Sealed Analog Isolation Amplifier. – URL: https://www.broadcom.com/products/optocouplers/hermetic/isolation-amplifiers/hcpl-7851 (дата обращения: 10.03.2026).

4. Наступила развязка. – URL: https://leoniv.livejournal.com/272326.html (дата обращения: 10.03.2026).
5. ADUM4195-1 Изолированный усилитель с фиксированным коэффициентом усиления и несимметричным выходом. – URL: https://www.analog.com/en/products/adum4195-1.html (дата обращения: 10.03.2026).

УДК 621.3
Цербицова Валентина Викторовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Tserbitsova Valentina Viktorovna, student, Komsomolsk-on-Amure State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Aleksey Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics and Innovative Technologies, Komsomolsk-on-Amur State University

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНИЕЙ РОЗЛИВА ВОДЫ
DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR A WATER BOTTLING LINE

Аннотация. В статье представлены результаты разработки электрической схемы системы управления автоматизированной линией розлива воды. Система позволяет полностью автоматизировать процесс розлива воды, включая процесс выдува преформы, дозированное наполнение тары водой, укупорка бутылки пробкой, этикировка бутылок, нанесение маркировки, групповая упаковка и учёт готовой продукции. Разработанная система позволяет минимизировать ошибки, связанные с «человеческим» фактором, повысить производительность и точность. Предложенное решения является конкурентоспособным решением для автоматизации процесса розлива.
Annotation. This article presents the results of developing an electrical control system for an automated water bottling line. The system enables fully automated bottling, including preform blowing, metered water filling, bottle capping, bottle labeling, marking, group packaging, and finished product inventory. The developed system minimizes human error and improves productivity and accuracy. The proposed solution is a competitive option for automated bottling.
Ключевые слова: автоматизация, линия розлива, система управления, функциональная схема, электрическая схема.
Key words: automation, filling line, control system, functional diagram, electrical diagram.

Введение

Степень автоматизации существующей линии розлива питьевой воды находится на низком уровне. Это приводит к ряду проблем. В том числе к браку на этапах выдува преформ, розлива воды и на других операциях. В основном это является следствием «человеческого» фактора.

Существующие линии розлива, как правило, выполнены блочно, то есть каждый модуль выполняет только одну операцию и не интегрированы в общий конвейер; используют зарубежные комплектующие; работают с ограниченным и жёстко заданным перечнем бутылок (0,5, 0,6 и 1 литр) и отличаются высокой ценой.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка системы управления автоматизированной линией розлива минеральной воды в пластиковую тару различного объёма с учетом методик, изложенных в [1,2,4].

Основные этапы технологического процесса

1. Подготовка воды. Вода из скважины через фильтры грубой и тонкой очистки поступает в накопительную емкость. Далее подготовленная вода попадает на процесс розлива.

2. Изготовление и ополаскивание бутылок. Заготовки пластиковых бутылок поступают в выдувную машину где формируются бутылки разной ёмкости (от 0.25 до 3 литров), ко-

торые поступают в бутыломоечную машину для мытья и дезинфекции тары. Для мытья бутылок в машину подаётся вода под давлением 2 МПа. На выходе предусмотрен световой экран для визуальной проверки качества помытой тары, то есть на выходе из бутыломоечной машины. Качеством в данном случае является целостность бутылки и её чистота.

3. Розлив. На данном этапе отмеренную дозу воды фасуют в предварительно подготовленную тару.

4. Укупорка. Производится укупорки бутылки пробкой.

5. Этикировка. Включает в себя этикировочный автомат, который служит для автоматической наклейки этикетки, соответствующей содержимому бутылки.

6. Групповая упаковка.

Функциональная схема системы управления

Система управления (рис. 1) работает следующим образом.

Дискретные сигналы поступают от 5 оптических датчиков BA1 о нахождении тары под форсунками в микроконтроллер (МК) DD [3]. Так же в МК приходит аналоговый сигнал с 5 расходомеров BV1, который оцифровывается непосредственно аналого-цифровым преобразователем (АЦП) МК. Данные сигналы анализируются МК, и формируются сигналы управления исполнительными устройствами.

Через усилитель сигнала A1 и реле K1 производится запуск и работа двух асинхронных двигателей ЭД1, которые приводят в движение конвейерную ленту и помпу насоса для подачи и создания давления минеральной воды для розлива. Через драйвер шагового двигателя U2 происходит управление 7 шаговыми двигателями ЭД2, 5 из которых выставляют определённые расстояния между форсунками, 1 ШД требуется для выставления высоты системы и ещё один управляет ограничителем для создания партии заполняемой тары.

Для управления системой предусмотрена клавиатура SB1 и дисплей HG1 для визуализации вводимых настроек и отображения состояния системы. Вывод аварийных предупреждений производится на дисплей, так же предусмотрена звуковая сигнализация HA1.

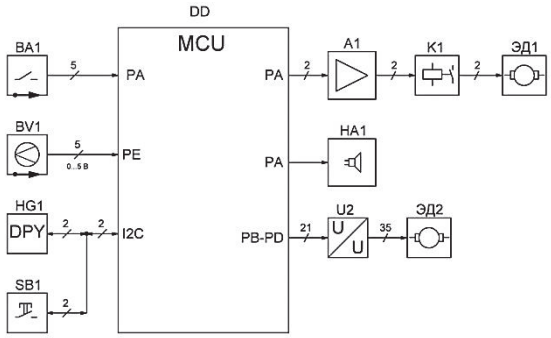


Рис. 1. Функциональная схема системы управления

Заключение

В результате работы спроектирована система автоматического управления линией розлива минеральной воды, обладающая следующими характеристиками:

- Производительность линии: до 2250 бутылок в час;
- Диапазон объема тары: от 0,25 до 10 литров;
- Точность дозирования: ±0,5%;
- Тип управления: микропроцессорный;
- Напряжение питания: 220В, 50Гц.

Преимущества разработанной системы:

- Универсальность настройки под различные форматы тары;
- Высокая точность дозирования;
- Автоматизация всех основных процессов;
- Простота обслуживания;
- Надежность работы;
- Возможность интеграции в существующие производственные линии;

Разработанная система соответствует современным требованиям к оборудованию для розлива и может быть рекомендована к внедрению на предприятиях пищевой промышленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Арсеньев, Г. Н. Электропреобразовательные устройства РЭС : учебник / Г. Н. Арсеньев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 544 с. 8. Белоус, А.И., Ефименко, С.А., Турцевич, А.С. Полупроводниковая силовая электроника. - Москва: Техносфера, 2013. – 216 с.

2. Бурков, А.Т. Электроника и преобразовательная техника: учебник в 2 т. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. Т.2: Электронная преобразовательная техника. – 307 с.

3. Водовозов, А. М. Микроконтроллеры для систем автоматики : учебное пособие / А. М. Водовозов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 168 с.

4. Головицына М.В. Проектирование радиоэлектронных средств на основе современных информационных технологий [Электронный ресурс] / М.В. Головицына. – Электрон. текстовые данные. – Москва, Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Вузовское образование, 2017. – 504 с.

УДК 004.3 : 639.31.06

Ян Цинпэн, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Yang Qingpeng, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kopytov Sergey Mihailovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ БАССЕЙНА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РЫБЫ
AUTOMATION OF A CLOSED-LOOP WATER SUPPLY SYSTEM FOR FISH FARMING

Аннотация. Рассмотрены вопросы проектирования автоматизированной системы управления установкой замкнутого водоснабжения для нужд рыбоводства. Описана структура аппаратного комплекса, позволяющего минимизировать влияние человеческого фактора, снизить удельные энергозатраты и предотвратить гибель рыбы при возникновении аварийных ситуаций. Выбраны необходимые датчики и исполнительные механизмы и указаны места их установки.

Abstract. This paper addresses the design of an automated control system for a closed-loop water supply facility used in aquaculture. The structure of the hardware complex is described; it is designed to minimize the impact of the human factor, reduce specific energy consumption, and prevent fish mortality in the event of emergency situations. The necessary sensors and actuators have been selected, and their installation locations are specified.

Ключевые слова: автоматизация, установка замкнутого водоснабжения, аквакультура, биофильтрация, мониторинг параметров воды.

Key words: automation, recirculating aquaculture system, aquaculture, biofiltration, water parameter monitoring.

Введение

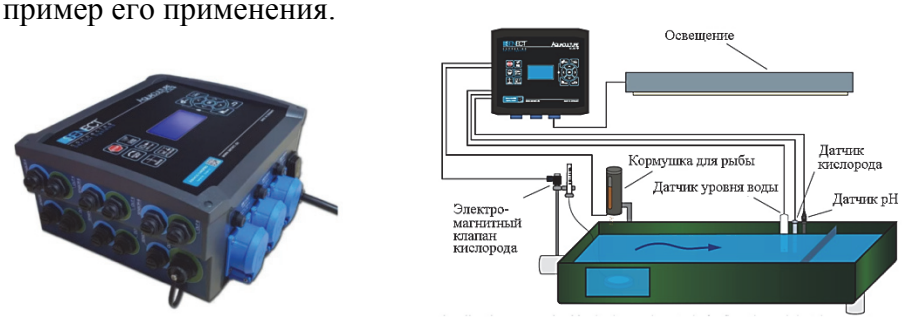
Мясо рыбы считается ценным диетическим продуктом. Оно обладает отменным вкусом и содержит легкоусвояемый белок, уникальные жиры Омега-3 и Омега-6, а также необходимые для здоровья витамины A, D, E, B12 и минералы, среди которых фосфор, йод, селен. Хотя морской и речной промысел рыбы широко распространен, он не покрывает всех потребностей. Рыба дорожает и часто является дефицитом. Выходом из такого положения является искусственное выращивание аквакультуры в прудах и специализированных бассейнах [1].

Для создания благоприятных условий для аквакультуры в условиях бассейна ограниченного объема необходимо его встраивание в систему замкнутого оборота воды, которую называют установкой замкнутого водоснабжения (УЗВ). В УЗВ осуществляется круговое движение воды между ее элементами, которые предназначены для поддержания параметров жизнеобеспечения в требуемых границах. Для снижения затрат и повышения производительности установки стараются автоматизировать [2-4].

Целью работы является подбор оборудования для автоматизации УЗВ и разработка структуры системы, осуществляющей автоматизацию работы такой установки.

Основная часть

Для автоматизации УЗВ необходимы датчики параметров среды, обеспечивающих жизнедеятельность рыбы. К таким параметрам относят температуру воды, концентрацию ионов водорода pH, концентрацию растворенного кислорода, окислительно-восстановительный потенциал воды, уровень воды, давление кислорода на входе оксигенератора. Датчики должны передавать данные измерений в управляющий контроллер. Датчики, а также контроллеры и исполнительные устройства выпускают различные производители. Однако целесообразно по использовать оборудование одной компании, которая специализируется в области искусственного рыбоводства, например, компании SENECT [5]. На рис. 1 показан внешний вид управляющего контроллера Senect Aquacultural Control Pro и демонстрационный пример его применения.



а) б)

Рис. 1. Контроллер Senect Aquacultural Control Pro: а) – внешний вид; б) пример его применения

Данный контроллер имеет 6 входов для датчиков, 6 выходов для приводов с напряжением 24 В постоянного тока, током 4…20 мА и напряжением 0…10 В, Wi-Fi приёмопередатчик для оповещения о тревоге и онлайн-мониторинга, 3 выхода переменного тока 230 В с розетками для управления силовыми устройствами.

Предлагаемая функциональная схема УЗВ приведена на рис. 2.

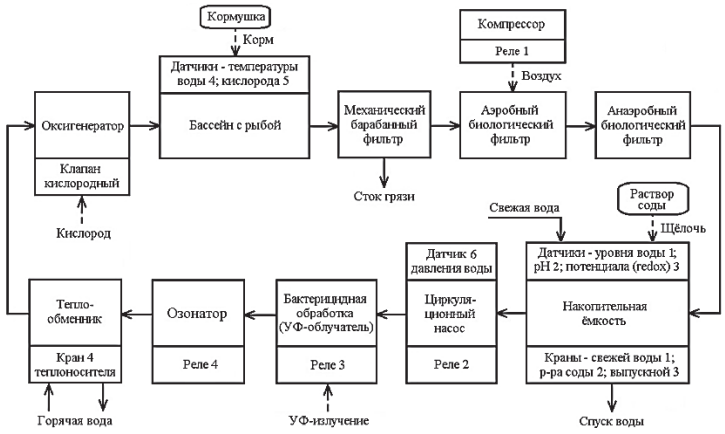


Рис. 2. Функциональная схема УЗВ для выращивания рыбы

Для подачи порций корма в бассейн в соответствии с суточным расписанием применена автоматическая кормушка. Она имеет встроенный микроконтроллер и может работать самостоятельно без управления от главного контроллера.

Поскольку свежая вода довольно дорога, то для сокращения расходов по оплате загрязненную в бассейне воду после регенерации используют повторно. Доля стока в канализацию и потребления свежей воды составляет примерно 5…15 % в сутки. Для удаления продуктов жизнедеятельности рыб предназначены фильтры – механический и биологический. На первом этапе очистки применяется механический барабанный фильтр. Обычно бассейн с рыбой расположен выше. Поэтому вода к барабанному фильтру поступает самотёком. Поскольку насос не используется, то фекалии рыб и несъеденный корм не размешиваются в воде, что улучшает фильтрацию. Современный барабанный фильтр имеет встроенный контроллер, датчики и собственную систему очистки. Поэтому он не нуждается в подключении к главному контроллеру УЗВ.

После механического барабанного фильтра расположен биологический фильтр. Он состоит из двух частей. Аэробный биологический фильтр предназначен для удаления из воды положительных ионов аммония NH_4^+. Эти ионы накапливаются в воде в результате разложения несъеденного корма и фекалий рыб. Аммонийный азот крайне токсичен для рыб. Безопасный уровень аммония обычно менее 0,4 мг/л.

Для нейтрализации ионов аммония применяют преобразование аммонийного азота в нитраты NO_3^-, которые сравнительно безопасны для рыб. Этот химический процесс происходит с участием нитрифицирующих бактерий. Биофильтр представляет собой ёмкость, заполненную нейтральными мелкими предметами с большой суммарной площадью поверхности. Эту поверхность заселяют нитрифицирующие микроорганизмы. Для ускорения процесса и снабжения бактерий необходимым кислородом через биофильтр с помощью компрессора продувается воздух. Аэрация также удаляет из воды углекислый газ, накапливающийся из-за дыхания рыб. Для включения компрессора предназначено реле 1 на 230 В.

При замкнутом водоснабжении концентрация нитратов в воде непрерывно возрастает и может превысить допустимое значение 30 мг/л. Эту проблему можно решить двумя способами. Во-первых, за счет слива части «старой» воды и подпитки «свежей» водой из водопровода. Во-вторых, за счет использования денитрификатора. Денитрификатор представляет собой анаэробную часть биофильтра (без доступа кислорода), заселённую денитрифицирующими бактериями. В результате их жизнедеятельности нитраты разлагаются на свободный газообразный азот.

После биологической фильтрации вода попадает в накопительную ёмкость, которая играет роль бассейна-сумматора нескольких компонентов для получения требуемого химического состава воды. В этой ёмкости установлены три датчика – уровня воды 1, концентрации ионов водорода pH 2 и окислительно-восстановительный потенциал воды (redox) 3. В ней же находятся три шаровых крана с электроприводом – свежей воды 1, подачи раствора соды 2 и выпускной 3 для частичного спуска воды. Датчик уровня воды 1 совместно с краном 1 не допускает перелива при подаче свежей воды.

В результате процесса денитрификации в воде повышается кислотность. Для компенсации кислоты в воду необходимо добавлять раствор пищевой соды. Поэтому в установке предусмотрен датчик pH 2 и кран 2 для подачи раствора соды. Раствор соды необходимо добавлять, когда значение pH опускается ниже 6.5…7.0.

Датчик окислительно-восстановительного потенциала (redox) 3 предназначен для измерения способности воды к самоочищению и окислению органических загрязнений. Он позволяет контролировать качество воды, автоматизировать дозирование озона для дезинфекции воды, предотвращая болезни рыб. Если редокс-потенциал меньше 200 мВ, необходимо с помощью реле 4 включить озонатор.

Циркуляционный насос, включаемый с помощью реле 2, обеспечивает прокачку воды. Датчик давления 6 помогает понять, что фильтры забились, и насосу тяжело качать. Важной стадией подготовки воды является ее дезинфекция. Наибольшую эффективность имеет двухэтапное обеззараживание. На первом этапе используют кварцевание с помощью прохождения воды через ультрафиолетовые облучатели. На втором этапе вода взаимодействует с озоном. Облучатель включает реле 3. Для получения озона применяют озонатор, который спо-

собен вырабатывать озон из кислорода воздуха и растворять его в воде. Для включения озонатора используется реле 4.

В процессе очистки воды ее температура понижается. Поэтому необходим датчик температуры воды 4 в рыбном бассейне и теплообменник для подогрева воды с помощью горячего теплоносителя температурой 80…90 ºС. Регулировку температуры выполняется с помощью управления краном 4 на трубопроводе теплоносителя.

Последний этап подготовки воды – насыщение ее кислородом для дыхания рыб. Оно необходимо при плотности посадки рыбы свыше 30 кг на кубометр. В качестве оксигенератора обычно используется кислородный конус. Источником кислорода для него является баллон с кислородом, который подает кислородный клапан. Концентрацию кислорода измеряет датчик 5. Если она меньше 5 мг/л, клапан должен открываться, а если больше 11 мг/л – закрываться.

Основные функциональные элементы УЗВ рассмотрены, датчики и исполнительные устройства выбраны, их назначение и местоположение определено. Поэтому для автоматизации УЗВ необходима система, структура которой показана на рис. 3.

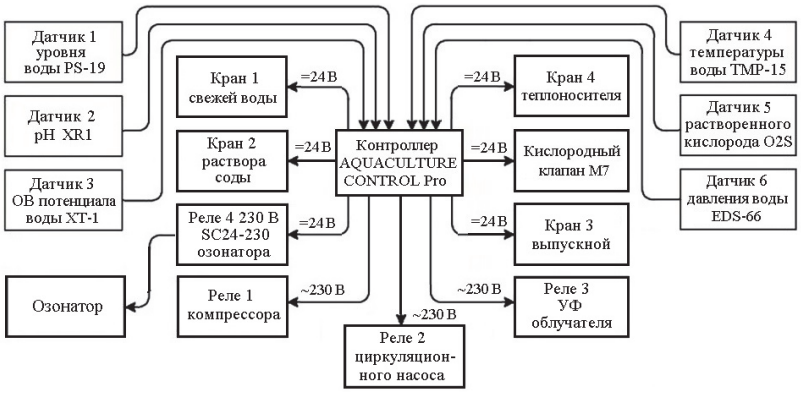


Рис. 3. Структурная схема системы автоматизации УЗВ для выращивания рыбы

Заключение

Предложенная структура аппаратного комплекса позволит существенно сократить потребление чистой воды и электроэнергии, улучшить условия содержания рыбы, повысить плотность ее посадки. Использование комплектующих одной компании, предназначенных для целевого использования на рыборазводных предприятиях, положительно повлияет на надежность системы и ее срок службы, ограничит затраты на согласование интерфейсов и разработку программного обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева, Н. В. Технические средства аквакультуры: учебно-методическое пособие / Н. В. Васильева. – Горки: БГСХА, 2012. – 192 с.

2. Ю. А. Головко, С. В. Головко. Автоматизированный комплекс мониторинга и управления уровнем воды и кислорода в рыборазводных прудовых хозяйствах /. – Тамбов: Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2024. Том 30 № 2 – С. 267-273.

3. Л. П. Скрипко, А. А. Скрипко. Автоматизация системы замкнутого водоснабжения для объектов аквакультуры /. – Астрахань: Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 3. – С. 49-53.

4. Умная система управления для УЗВ — готовая к работе из коробки. – URL: https://xn--b1ajeajq3b4b.xn--p1ai/oborudovanie/umnaya-sistema-upravleniya-uzv-iz-korobki/ (дата обращения: 22.02.2026).

5. SENECT – AQUACULTURE TECHNOLOGY. – URL: https://www.senect.de/en/ (дата обращения: 22.02.2026).

УДК 621.365.3
Цыкунова Анна Андреевна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Tsykunova Anna Andreevna, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serikov Alexander Vladimirovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amure State University

ОСОБЕННОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА
FEATURES OF ELECTRICAL EQUIPMENT AS PART OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF ELECTRICAL CONTACT HEATING

Аннотация. В работе приведен анализ вторичной цепи электротехнического комплекса электроконтактного нагрева металлических заготовок. Было определено, что переходное контактное сопротивление заготовки существенно влияет на величину тока, который может в несколько раз превышать номинальные значения тока в обмотках трансформатора. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения режима работы электрооборудования в условиях протекания сверхбольших токов, которые могут привести к локальному перегреву, механическим деформациям и выходу из строя элементов комплекса. Для оценки теплового состояния обмоток предложена тепловая схема замещения, позволяющая определить допустимую длительность перегрузок и избежать повреждения изоляции оборудования.
Abstract. The paper presents an analysis of the secondary circuit of an electrical equipment complex for electric contact heating of metal workpieces. It was determined that the transient contact resistance of the workpiece significantly affects the magnitude of the current, which can be several times higher than the nominal current values in the transformer windings. The relevance of the work is due to the need to ensure the operation of electrical equipment under conditions of extremely high currents, which can lead to local overheating, mechanical deformation, and failure of the equipment components. To assess the thermal condition of the windings, a thermal equivalent circuit is proposed, which allows determining the permissible duration of overloads and avoiding damage to the equipment insulation.
Ключевые слова: электрическое сопротивление, трансформатор, заготовка, тепловой режим нагрева, схема замещения.
Key words: electrical resistance, transformer, workpiece, thermal heating mode, and equivalent circuit.

Введение

В современной металлообработке широко распространен электроконтактный нагрев, который активно применяется для термической подготовки металлов к последующей обработке давлением [1]. Однако, при реализации такого вида нагрева, сталкиваются с проблемой протекания сверхбольших токов. Это создаёт угрозу аварийных ситуаций при работе электрооборудования: силового трансформатора, токопроводящих шин, гибких токоподводов и контактного аппарата. Интенсивное тепловыделение приводит к риску локального перегрева и механических деформаций оборудования и металлической заготовки. Эта проблема возникает и при работе понижающего трансформатора, который является наиболее дорогостоящим элементом комплекса. Протекание сверхбольших токов в обмотках вызывает интенсивный нагрев, что при неверном выборе теплового режима может привести к пробою изоляции и выходу трансформатора из строя. Таким образом, существует проблема определения величины тока, пропускаемого через установку, которая должна соответствовать режимам работы оборудования в составе электротехнического комплекса электроконтактного нагрева металлической заготовки.

Целью исследования является анализ особенностей работы электротехнического комплекса нагрева заготовок.

Задачи работы:

1.Анализ сопротивлений электрических проводников электротехнического комплекса.

2. Анализ тепловых потоков в трансформаторе.

Основная часть

Электроконтактный нагрев подразумевает наличие понижающего трансформатора, во вторичной цепи которого подключена нагреваемая заготовка [2]. Режим работы трансформатора зависит от сопротивлений, входящих во вторичную цепь (рисунок 1).

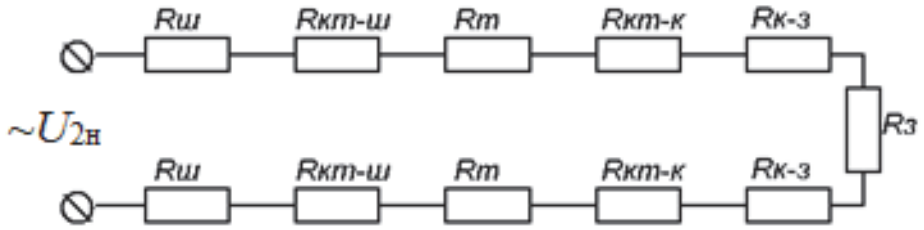


Рис. 1. Электрическая схема вторичной цепи:
$R_ш$ – сопротивление шины; $R_{кт-ш}$ – сопротивление контактного перехода гибкий токоподвод-шина; $R_т$ – сопротивление гибкого токоподвода, $R_{кт-к}$ – сопротивление контактного перехода гибкий токоподвод-контактный аппарат; $R_{к-з}$ – сопротивление контактного перехода контактный аппарат-заготовка; $R_з$ – сопротивление заготовки

Для расчета элементов вторичной цепи $R_з$, $R_ш$, $R_т$ используется общеизвестная формула:

$$R = \rho \frac{l}{ab},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление элемента; a – ширина элемента; b – толщина элемента; l – длина элемента.

В соединительных контактах, при протекании тока появляются переходные контактные сопротивления: $R_{кт-ш}$, $R_{кт-к}$, $R_{к-з}$ [3]:

$$R_{пк1} = \frac{K_{пх}}{(0{,}102F_k)^m},$$

где $K_{пх}$ – коэффициент, учитывающий материал контакта; F_k – сила нажатия; m – коэффициент контакта плоскостной формы поверхности.

Суммарное сопротивление вторичной цепи трансформатора, Ом:

$$R_{Σ2} = 2 \cdot R_ш + 2 \cdot R_{ктш} + 2 \cdot R_т + 2 \cdot R_{ктк} + 2 \cdot R_{кз} + R_з.$$

Исследования показали, что на величину тока во вторичной цепи (цепи нагрева) значительное влияние оказывает значение электрического сопротивления заготовки $R_з$, которое определяется размерами. Помимо значения $R_з$, существенное влияние на суммарное сопротивление вторичной цепи трансформатора оказывает переходное контактное сопротивления между токоподводом и заготовкой $R_{к-з}$. Например, для заготовки из титанового сплава ВТ20, длиной 2 м, шириной 0,8 м и толщиной 2 мм активное сопротивление заготовки $R_з$, составило 1375 мкОм, а величина переходного контактного сопротивления составила 75,98 мкОм. В этом случае, контактное сопротивление в зоне заготовки $R_{к-з}$ составило 9,6 % от полного сопротивления контура и 74,1 % от суммарного сопротивления всей системы токоподводов, что является значительной величиной. Переходное контактное сопротивление напрямую влияет на величину протекающего через установку тока, что в свою очередь оказывает влияние на время нагрева заготовки.

Величина электрического тока вторичной цепи трансформатора определяется по формуле:

$$I = \frac{U_{2н}}{R_{\Sigma 2}},$$

где $U_{2н}$ – напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Характерной особенностью процесса нагрева является маленькое время нагрева, при протекании сверхбольших токов. Ток вторичной цепи составил 25 кА. Следствием этого является повышение тока вторичной обмотки трансформатора в 4 раза больше номинального. В связи с этим важным является оценка теплового состояния трансформатора и выбор теплового режима работы.

В электротехническом комплексе применяется однофазный понижающий печной трансформатор типа ОЭСК 250/40 (рисунок 2, а). Напряжение первичной обмотки – 380 В, напряжение вторичной обмотки – 40 В, номинальный ток первичной обмотки– 657,9 А, номинальный ток вторичной обмотки – 6250 А. Первичная обмотка трансформатора ОЭСК 250/40 выполнена в виде двух одинаковых катушек, каждая из которых располагается на отдельном стержне П-образного магнитопровода. Первичная обмотка ограничивает режим работы трансформатора по нагреву, так как провод изолирован, а изоляция выдерживает определенный диапазон температур. Важным является оценка теплового состояния первичной обмотки.

В рассматриваемом трансформаторе первичная обмотка состоит из двух полуобмоток, выполненных из прямоугольного медного провода. Каждая полуобмотка расположена на соответствующем стержне магнитопровода. Вторичная обмотка так же состоит из двух частей по четыре витка, выполненных из медной шины. Для отвода тепла в конструкции предусмотрены охлаждающие каналы. Они организованы в двух зонах: между первичной обмоткой и магнитопроводом, а также между первичной и вторичной обмотками.

а) б)

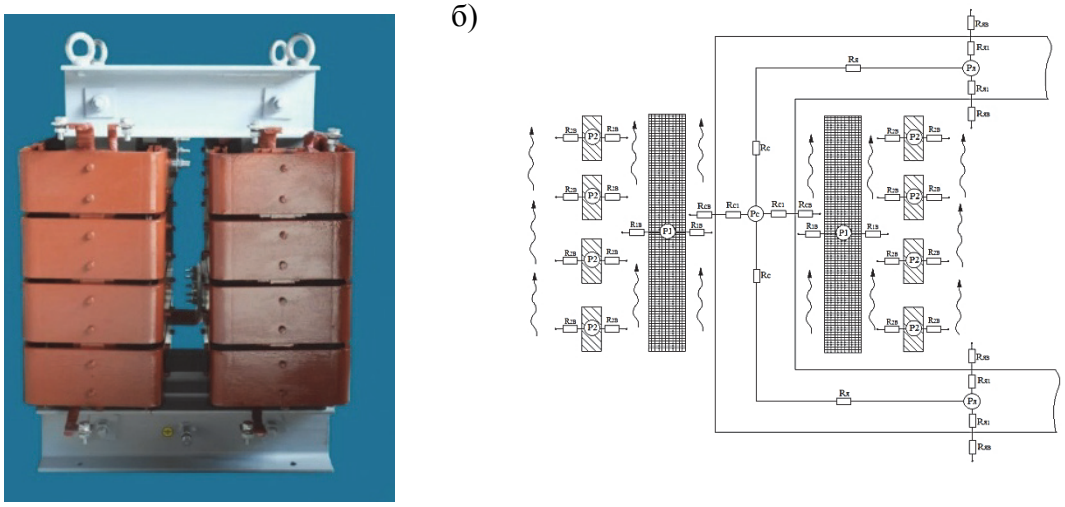


Рис. 2. Трансформатор ОЭСК 250/40 (а) и его тепловая схема замещения (б)

Для оценки теплового состояния трансформатора выполнен анализ источников тепла и тепловых потоков (рисунок 2, б). Тепло, выделяющееся в первичной обмотке, распространяется в двух направлениях. Часть теплового потока проходит в воздушный канал, образованный между первичной обмоткой и магнитопроводом. Вторая часть потока отводится в канал между первичной и вторичной обмотками трансформатора. В этих охлаждающих каналах движение воздуха осуществляется путем естественной конвекции. Вторичная обмотка нагревается за счет протекания тока. Поскольку она расположена поверх первичной обмотки, выделяемое в ней тепло отводится с внешней поверхности медной шины и межвитковых промежутков в окружающую среду за счет конвекции и излучения. Также часть тепла от вторичной обмотки отводится в охлаждающий канал естественной конвекцией.

Для оценки нестационарного температурного режима элементов конструкции трансформатора построена тепловая схема замещения (рис. 3), которая позволяет учесть пути от-

вода тепла от активных частей трансформатора (первичная и вторичная обмотки, магнитопровод) в окружающую среду [4]. Для учета нестационарных процессов добавляются ветви, учитывающие теплоёмкости элементов конструкции. Так как первичная обмотка выполнена из изолированного провода, то важным является определение температуры нагрева изоляционных материалов, которые в значительной мере обеспечивают срок службы электротехнического оборудования. С помощью тепловой схемы замещения возможно рассчитать среднемассовые температуры изоляции в определенный момент времени, и, следовательно, определить допустимую величину тока, протекающего по обмоткам трансформатора.

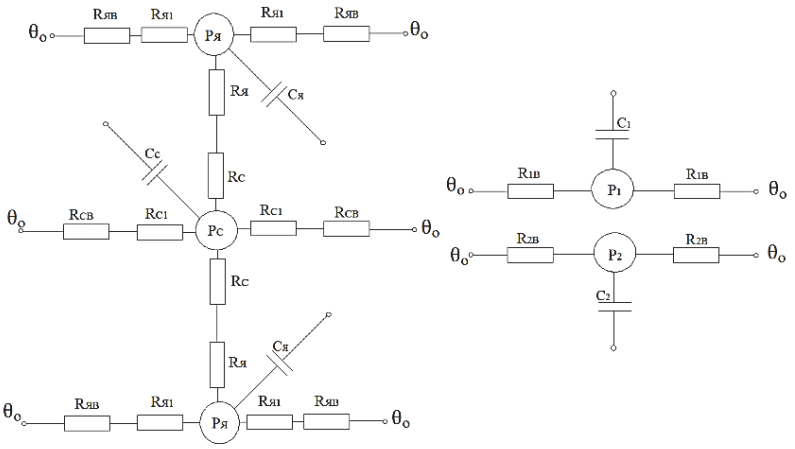


Рис. 3. Эквивалентная тепловая схема замещения трансформатора

Заключение

Таким образом, в работе был проведен анализ вторичной цепи трансформатора, который показал, что величина тока определяется размерами заготовки и влияет на режим работы трансформатора. При некоторых размерах заготовки величина тока в обмотках трансформатора превышает номинальные значения в 3 и более раз. Следовательно, важным является оценка реального теплового состояния трансформатора, позволяющая определить допустимую длительность перегрузок без повреждения изоляции. С помощью тепловой схемы замещения возможно рассчитать температуру изоляции, зная потери мощности в элементах прибора, и исходя из этого определить максимально допустимую величину тока для трансформатора в каждом конкретном режиме нагрева заготовки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов / Д.И. Романов. – М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.

2. Цыкунова, А. А. Электротехническая система нагрева металлических заготовок перед штамповкой / А. А. Цыкунова, А. В. Сериков // Электропривод на транспорте и в промышленности : материалы III Всероссийской научно-практической конференции : посвящается 60-летию кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», Хабаровск, 19–20 октября 2023 года. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 62-67. – EDN VFZKRQ.

3. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов. Общие вопросы проектирования: учебное пособие / П. В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

4. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: Учеб. Для вузов по спец. «Электромеханика»/ Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.: ил.

УДК 621.316
Шадрин Артём Владиславович, старший оператор, Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис ЭРА»
Shadrin Artem Vladislavovich, senior operator, Federal state autonomous institution «Military innovative technopolis ERA»
Толонов Кирилл Борисович, оператор, Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис ЭРА»
Tolonov Kirill Borisovich, operator, Federal state autonomous institution «Military innovative technopolis ERA»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110–220 КВ
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ELECTROMECHANICAL AND MICROPROCESSOR DEVICES OF EQUIPMENT OVERLOAD PROTECTION AUTOMATION FOR 110–220 KV OVERHEAD POWER LINES

Аннотация. В работе проводится сравнительный анализ эффективности электромеханических и микропроцессорных устройств автоматики ограничения перегрузки оборудования для воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ. Исследование выполнено на основе расчёта установившихся режимов в программном комплексе RastrWin3. Показано, что применение адаптивных уставок микропроцессорных терминалов позволяет увеличить допустимую токовую нагрузку линий на 24% в зимний период за счёт учёта фактической температуры окружающей среды. Обоснована целесообразность модернизации устройств автоматики ограничения перегрузки оборудования для условий энергорайонов Дальнего Востока.
Abstract. The paper presents a comparative analysis of the efficiency of electromechanical and microprocessor-based Equipment Overload Protection Automation (AOPO) devices for 110–220 kV overhead power lines. The study was conducted based on steady-state mode calculations using the RastrWin3 software package. It is shown that the application of adaptive settings in microprocessor terminals allows increasing the allowable current load of lines by 24% during the winter period by accounting for the actual ambient temperature. The feasibility of modernizing Equipment Overload Protection Automation devices for the conditions of power regions in the Far East is substantiated.
Ключевые слова: автоматика ограничения перегрузки оборудования, воздушная линия электропередачи, микропроцессорные терминалы, электромеханические реле, адаптивные уставки, RastrWin3.
Key words: Equipment Overload Protection Automation, overhead power line, microprocessor terminals, electromechanical relays, adaptive settings, RastrWin3.

Введение

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 110–220 кВ являются ключевыми элементами энергосистемы, обеспечивающими передачу электроэнергии между узлами нагрузки и генерации. Техническое состояние и нагрузочная способность ЛЭП непосредственно влияют на работу энергосистемы и бесперебойное электроснабжения потребителей.

На сегодняшний день существует тенденция увеличения электропотребления, в связи с этим наблюдается рост дефицита пропускной способности межсистемных сечений. При этом существующие электромеханические устройства противоаварийной автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО) используют фиксированные уставки, рассчитанные на усреднённые климатические условия. Это приводит к недоиспользованию резерва по токовой нагрузки в холодное время года.

Основная часть

Для Дальнего Востока 2025 год стал самым тёплым за всю историю метеонаблюдений [1]. При этом температурный размах остаётся экстремальным: зимой температура в Комсомольске-на-Амуре достигает −39 °С, а летом +33 °С. Таким образом, размах температур составляет 72 °С, что создаёт значительный резерв по охлаждению проводов в зимний период.

На существующих объектах энергосистемы АОПО реализована на электромеханических устройствах релейной защиты и автоматики (УРЗА) таких как РТ-40. Данные реле имеют одну группу уставок, либо же имеют сменную группу уставок, которую необходимо менять согласно графику перехода АОПО на другое время года. Проблема заключается в негибкости данного принципа реализации АОПО и необходимости ручного вмешательства оперативного персонала.

На отечественном рынке существуют микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МП РЗА) с функцией АОПО. Яркими представителями являются АО «Радиус Автоматика» [3] с терминалом «Сириус-ПА-01» и ООО НПП «ЭКРА» [4] с серией шкафов «ШЭЭ 22Х». В данных устройствах АОПО реализована с функцией корректировки уставки по температуре окружающей среды в автоматическом режиме, благодаря внешнему выносному датчику температуры окружающей среды. Согласно руководству по эксплуатации Сириус-ПА-01 [3], устройство поддерживает до 6 независимых ступеней АОПО с возможностью задания независимой, ступенчато-зависимой и линейно-зависимой характеристики срабатывания от температуры окружающей среды.

На рисунке 1 представлена схема исследуемой электроэнергетической системы (ЭЭС) с указанием номеров узлов. Для определения перетоков мощности и тока в ЛЭП будем использовать программный комплекс RastrWin3 [5].

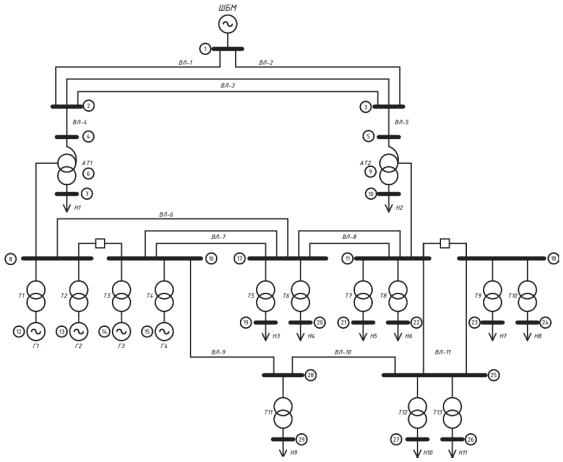


Рис.1. Схема ЭЭС с указанием номеров узлов

В качестве контрольного сечения рассмотрены две параллельные линии (ВЛ-8 I, II цепи) напряжением 110 кВ. В нормальном режиме обе линии находятся в работе и равномерно распределяют нагрузку. В аварийном или ремонтном режиме (отключение одной линии) вся мощность передаётся по оставшейся линии, что создаёт риск перегрузки.

Расчётная линия выполнена проводом марки АС-95/16. Допустимый ток провода зависит от температуры окружающей среды. Для исследования выбраны три температурных сценария, соответствующие климатическим условиям Дальнего Востока:

Зимний минимум: −39 °С.

Среднегодовая: 0 °С.

Летний максимум: +33 °С.

Допустимый ток для каждой температуры определяется по формуле:

$$I'_{\text{длит.доп}} = I_{\text{длит.доп}} \cdot k$$

$I_{\text{длит.доп}}$ – табличное значение допустимого тока при нормированной температуре окружающей среды (+25 °С);

k – поправочный коэффициент на температуру окружающей среды согласно ПУЭ-7.

Для каждого температурного сценария выполнен расчёт установившегося режима в RastrWin3 [5]. Результаты для контрольного сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Допустимый ток ЛЭП в зависимости от температуры

Температура	k	$I_{доп}$
-39	1,24	409
0	1,2	396
33	0,9	297

Из таблицы 1 видно, что в диапазоне температур от −39 °C до +33 °C доступен резерв токовой нагрузки ЛЭП относительно номинального тока при температуре +25°C.

Для условий Дальнего Востока проанализирован и представлен в таблице доступный резерв токовой нагрузки ЛЭП по месяцам года на основании климатических данных за 2025 год (табл. 2).

Таблица 2

Доступный резерв токовой нагрузки по месяцам за 2025 год

Месяц	Средняя температура за месяц	Допустимый ток ЛЭП	Относительная эффективность
Январь	-35	409	24%
Февраль	-30	409	24%
Март	-10	409	24%
Апрель	5	386	17%
Май	15	360	9%
Июнь	22	330	0%
Июль	33	297	-10%
Август	28	314	-5%
Сентябрь	18	343	4%
Октябрь	5	386	17%
Ноябрь	-15	409	24%
Декабрь	-25	409	24%

По результатам проделанной работы сделаны следующие выводы.

В течение 9 месяцев, порядка 270 дней в году (с сентября по май), доступен резерв токовой нагрузки ЛЭП.

Применение микропроцессорных устройств АОПО с адаптивными уставками обеспечит следующие технические преимущества по сравнению с электромеханическими аналогами:

Увеличение зимой токовой нагрузки ЛЭП на 24% за счёт учёта температуры окружающей среды МП РЗА. Электромеханические реле с фиксированной уставкой, рассчитанной на летнюю температуру, не позволяют использовать этот резерв.

Отсутствие необходимости ручного перевода уставок оперативным персоналом при смене сезонов, что исключает человеческий фактор.

Заключение

Климатические условия Дальнего Востока (размах температур до 72 °C) создают значительный сезонный резерв по токовой нагрузке воздушных ЛЭП.

Использование электромеханических устройств АОПО с фиксированными уставками приводит к недоиспользованию данного резерва в осенне-зимний период (порядка 270 дней в году).

Внедрение микропроцессорных терминалов с функцией адаптации уставок по температуре окружающей среды (Сириус-ПА-01, ШЭЭ 22Х 0108) позволяет увеличить пропускную способность ВЛ 110–220 кВ на 4–24% в период с сентября по май.

Рекомендуется рассмотреть возможность модернизации устройств АОПО на объектах Дальневосточного энергорайона для повышения эффективности использования сетевой инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Погода на 2025 год в Комсомольске-на-Амуре. Опубл.: 01.01.2025–31.12.2025 // Ginfo.ru. URL: https://komsomolsk.ginfo.ru/pogoda-2025/ (дата обращения: 25.02.2026).

2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7). Издание 7. – М.: Энергоатомиздат, 2020. – Раздел 1.3.

3. Микропроцессорное устройство противоаварийной автоматики «Сириус-ПА-01». Руководство по эксплуатации БПВА.656122.215 РЭ. – М.: АО «РАДИУС Автоматика», 2026. – 272 с.

4. Шкафы противоаварийной автоматики ШЭЭ 22Х. Каталог. – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2026. – 80 с.

5. Официальный сайт RastrWin // RastrWin. URL: https://www.rastrwin.ru/ (дата обращения: 03.03.2026).

УДК 681.511.42, 681.511.46

Шапараев Федор Андреевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Shaparaev Fyodor Andreevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Дерюжкова Нелли Егоровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Deryuzhkova Nelly Egorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ДУГОВОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ
IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE POWER CONTROL SYSTEM OF AN ARC VACUUM FURNACE

Аннотация. Рассматривается задача повышения эффективности системы регулирования мощности дуговой вакуумной печи. Для решения поставленной задачи предложена разработка электромеханического регулятора мощности на базе асинхронного электропривода с векторным управлением. Для повышения быстродействия системы позиционирования были применены контроллеры нечеткой логики. Представлен сравнительный анализ динамических характеристик системы позиционирования с классическим регулятором и нечетким управлением. Приведены результаты исследования регулятора мощности в режиме зажигания дуги.

Abstract. The problem of increasing the efficiency of the power control system of an arc vacuum furnace is considered. To solve this problem, the development of an electromechanical power regulator based on an asynchronous electric drive with vector control is proposed. Fuzzy logic controllers were used to increase the speed of the positioning system. A comparative analysis of the dynamic characteristics of a positioning system with a classical controller and fuzzy control is presented. The results of a study of the power regulator in the arc ignition mode are presented.

Ключевые слова: дуговая вакуумная печь, электромеханический регулятор мощности, нечеткая логика, длина дуги, стабилизация мощности, ток дуги, напряжение дуги.

Key words: vacuum arc furnace, electromechanical power regulator, fuzzy logic, arc length, power stabilization, arc current, arc voltage.

Введение

Современные дуговые вакуумные печи (ДВП) применяются для плавки высококачественных сталей и специальных сплавов, требующих точного управления энергетическими режимами. Ключевым фактором эффективности плавки является контроль мощности дуги, от которого зависят как энергозатраты предприятия, так и качество получаемого слитка. Основным физическим параметром, определяющим напряжение и, соответственно, мощность дугового разряда, является длина дугового промежутка. Главным управляющим воздействием на выделяемую тепловую мощность является изменение длины дуги. Регулируя ее, можно

воздействовать на напряжение на дуге и обеспечивать максимальное значение выделяемой мощности [1, 3].

Управляющим органом воздействия на длину дуги является привод перемещения электрода. Улучшение динамических показателей электропривода оказывает влияние на устойчивость и эффективность работы системы регулирования мощности в целом, а также определяет энергетические и ресурсные показатели системы. В работе рассматривается модернизация системы управления ДВП за счет применения асинхронного электропривода с векторным управлением и различных алгоритмов нечеткого вывода [4, 5].

Оптимизация динамических свойств электропривода перемещения электрода

На первом этапе была разработана имитационная модель системы подчиненного регулирования электропривода механизма перемещения электрода. В качестве базовой структуры выбрана система: «преобразователь частоты – асинхронный двигатель с векторным управлением». Для повышения быстродействия системы классический регулятор был заменен на контроллер на базе нечеткой логики (Fuzzy Logic Controller). Были исследованы два типа нечетких регуляторов: на основе вывода Мамдани и Сугено. Модифицированная структурная схема позиционного контура представлена на рисунке 1. Нечеткие регуляторы имеют структуру с двумя входами и одним выходом. В качестве первого входа используется интеграл ошибки рассогласования. В качестве второго входного сигнала регулятора используется текущая ошибка рассогласования – разность между заданным и фактическим положением электрода [5].

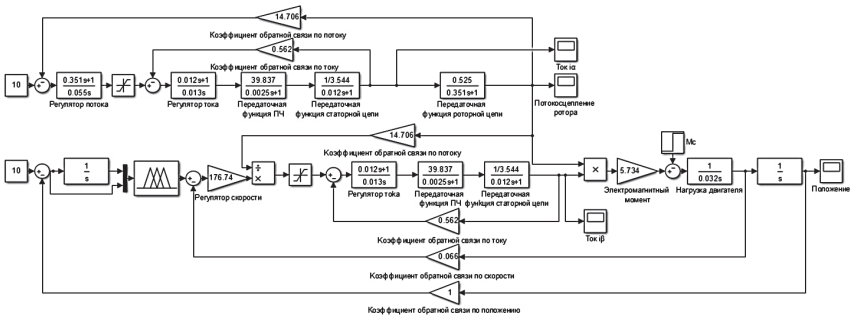


Рис. 1. Структурная схема модели с нечетким регулятором

Полученные результаты моделирования отработки ступенчатого задания на перемещение представлены на рисунке 2. Анализ полученных осциллограмм показывает, что внедрение нечеткого регулятора с алгоритмом вывода Мамдани сократило время регулирования с 0,225 с до 0,185 с. Наилучшие показатели продемонстрировал нечеткий регулятор с алгоритмом вывода Сугено, применение которого позволило сократить время регулирования до 0,135 с при полном сохранении устойчивости контура [4, 5].

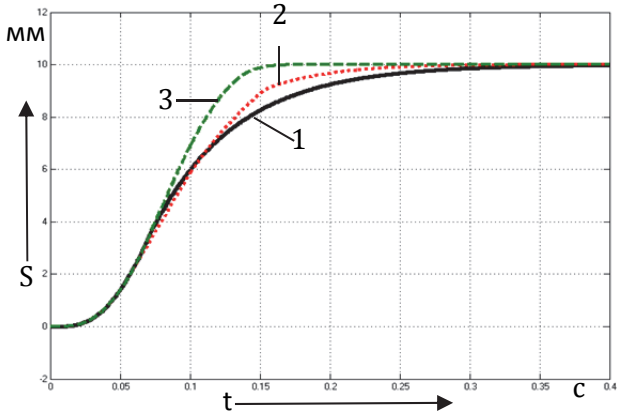


Рис. 2. Графики переходных процессов положения электрода:
1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор типа Мамдани;
3 – нечеткий регулятор типа Сугено

Интеграция контура в систему регулирования мощности ДВП

Так как полезная мощность печи имеет нелинейный характер и не может выступать однозначным параметром регулирования, управление осуществляется по косвенным параметрам. Задающее напряжение исполнительного привода формируется во внешнем контуре – блоке сравнения параметров дуги. Связь между разработанным внутренним позиционным контуром электропривода и внешней системой управления мощностью состоит в том, что блок сравнения непрерывно вычисляет отклонения напряжения и тока дуги от заданных уставок. Результирующий выходной сигнал этого блока используется как задание для позиционного контура привода перемещения электрода. В рабочей зоне после эксплуатационного короткого замыкания (после зажигания дуги) зависимость задающего напряжения от положения электрода определяется выражением [2, 3]:

$$U_{\text{з}} = k_{\text{т}} \cdot (1 - l^*) - k_{\text{н}} \cdot l^*, \qquad (1)$$

где $l^* = l/l_{max}$ – относительная длина дугового промежутка; $k_{\text{т}}$, $k_{\text{н}}$ – коэффициенты передачи узла сравнения.

Ввиду невозможности косвенного измерения ряда технологических параметров для регулирования мощности дуги целесообразно применять нечеткое управление. Блок сравнения реализован на переключателях (Switch) и программном RS-триггере, что обеспечивает системе автоматическое распознавание этапов плавки. Блок-схема комплексной модели электромеханического регулятора мощности представлена на рисунке 4 [2].

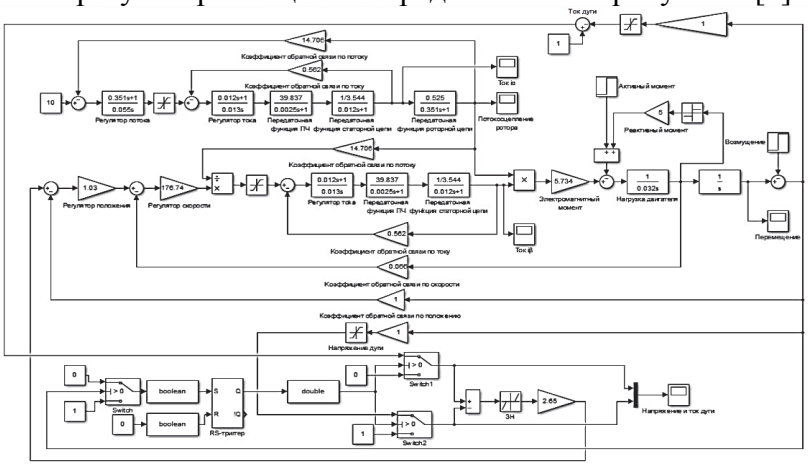


Рис. 3. Блок-схема модели электромеханического регулятора мощности ДВП

Анализ результатов моделирования комплексной системы

Для проверки работоспособности комплексной модели проведено имитационное моделирование в режиме зажигания дуги. В начальный момент дуга отсутствует; при t = 0,035 с происходит касание электродом шихты, соответствующее режиму эксплуатационного короткого замыкания. Напряжение дуги резко падает, а ток скачкообразно возрастает. Переключатель в модели срабатывает, как только координата впервые становится равной нулю, и это состояние надежно запоминается RS-триггером. Работоспособность системы подтверждается переходными процессами на рисунках 4 и 5, где пунктиром показана реакция системы с П-регулятором, а сплошными линиями – с нечеткими регуляторами. Результаты представлены в относительных единицах, что обеспечивает их универсальность для печей различной мощности [2, 3].

На рисунке 4 показаны процессы отработки эксплуатационного короткого замыкания и выхода системы на заданный энергетический режим как для базовой электромеханической системы, так и системы с внедренной нечеткой логикой. На рисунке 5 представлен график перемещения электрода, форма которого свидетельствует о плавном разгоне и торможении с учетом инерции механизма [4, 5].

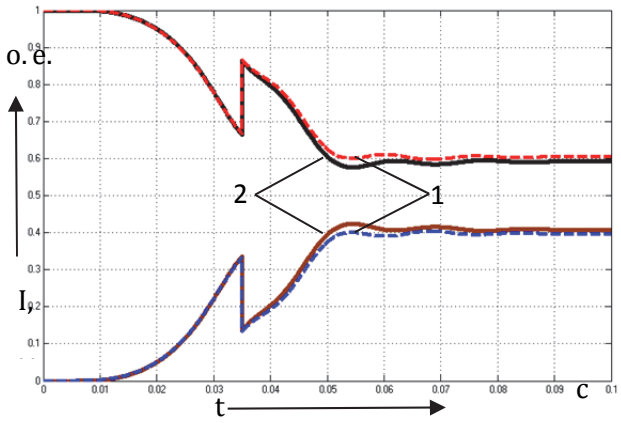


Рис. 4. Динамика напряжения и тока дуги в процессе зажигания: 1 – с классическим регулятором; 2 – с нечетким регулятором

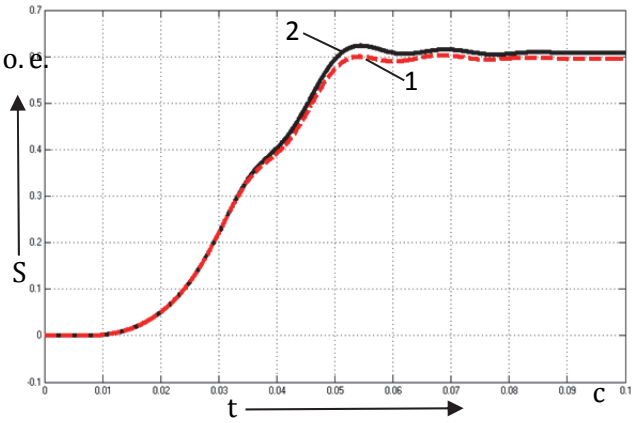


Рис. 5. График перемещения электрода: 1 – с классическим регулятором; 2 – с нечетким регулятором

Заключение

Электропривод перемещения электрода является основным исполнительным органом ДВП, поэтому оптимизация его параметров является ключом к повышению эффективности всей установки. Применение векторного управления асинхронным двигателем в сочетании с нечеткими алгоритмами позволило существенно улучшить динамические характеристики механизма. Использование регулятора Мамдани в позиционном контуре обеспечило снижение времени регулирования до 0,185 с, тогда как применение подхода Сугено позволило дополнительно сократить его до 0,135 с при сохранении апериодического характера движения. Разработанный контур интегрирован в общую математическую модель регулятора мощности печи. Результаты моделирования подтвердили способность системы эффективно компенсировать возмущения и обеспечивать устойчивый выход на рабочий режим горения дуги [4, 5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов Д.В., Рубцов В.П. Анализ причин и последствий поломок электродов в дуговой сталеплавильной печи // Вестник МЭИ. 2013. № 2. С. 69–72. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21588656

2. Маслов Д.В., Рубцов В.П. Усовершенствованный регулятор мощности ДСП // Электротехника. 2014. № 7. С. 54–60. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21588656

3. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева. Учебник для вузов / под ред. А.Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с., ил.

4. Терехов В.М. Системы управления электроприводов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – 2-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.

5. Соловьев В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами : учеб. пособие / В.А. Соловьев, С.П. Черный. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2006. – 74 с.

УДК 621.3
Шинкорук Милена Денисовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Shinkoruk Milena Denisovna, student, Komsomolsk-on-Amur State University
Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Frolov Aleksei Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО ОБЕЗБОЛИВАЮЩЕГО СРЕДСТВА
ELECTRONIC PAIN RELIEVER DEVELOPMENT

Аннотация. В статье разбирается прогрессивное решение для проблем, связанных с хронической болью, воспалениями, мышечными спазмами, а также реабилитацией после операций и травм. Актуальность исследования заключается в возможности повысить качество жизни людей и снизить нагрузку на системы здравоохранения. Статья посвящена разработке электронной схемы портативного обезболивающего устройства с возможностью гибкой настройки параметров под индивидуальные особенности пациента.
Abstract. The article discusses a progressive solution for problems related to chronic pain, inflammation, muscle spasms, as well as rehabilitation after surgery and injury. The relevance of the study lies in the possibility of improving people's quality of life and reducing the burden on healthcare systems. The article is devoted to the development of a portable pain relief device electronic circuit with the ability to adjust the parameters to the patient individual characteristics.
Ключевые слова: обезболивание, медицинская техника, электроанальгезия, нелекарственное обезболивание, электрическая схема.
Key words: anesthesia, medical equipment, electroanalgesia, non-medicinal anesthesia, electronic circuit.

Введение

В современных реалиях большую долю неудобств и негативного влияния на качество жизни оказывают не только распространенные болезни и травмы, но и сопровождающаяся этим боль. Ее первопричины могут быть различными: реабилитация после операций, хронический синдром или же обычное мышечное напряжение. Таким образом, именно распространенность проблемы делает исследования в данной сфере здравоохранения важными и актуальными для нашего времени, так как ныне существующие средства не являются универсальными или же абсолютно противопоказаны некоторым людям, также страдающим от подобного типа боли [1, с. 67].

Существующие электронные чрескожные нейростимуляторы

Наиболее простые нейростимуляторы типа ЧЭНС-01-СКЭНАР-М отличаются широким перечнем показаний к применению, поддерживают несколько режимов работы, в том числе: с сигналом постоянной частоты 90 Гц, с переменными частотами (14, 60, 90, 340 Гц); с качающейся частотой от 30 Гц до 120 Гц с периодом 7 с; с амплитудной модуляцией 3 с / 1 с. Этот аппарат производится в России, отличается низкой ценой. Но он не позволяет производить тонкую настройку генерируемых сигналов под конкретного человека, хотя это является необходимым в связи с индивидуальными особенностями каждого человека (сопротивление кожных покровов и т.д.).

Аппараты типа Mover предназначен для обезболивания путём снятия спазмов, отличается невысокой ценой, но имеет только две программы: сигналы с переменной случайной частотой в диапазоне 75 – 135 Гц; пачки импульсов 200 Гц, длительностью пачки 5 мс и частотой следования пачек 77 Гц. Амплитуда положительных импульсов: 11В, 13 В, 14 В, 16 В; амплитуда отрицательных импульсов: 1,5 – 200 В в зависимости от сопротивления нагрузки. То есть данные аппараты также не позволяют настраивать режим воздействия и сохранять настройки в памяти.

Профессиональные аппараты типа Ibramed Neurodyn производятся за рубежом, отличаются более высокой ценой, стационарным исполнением, предназначены для проведения короткоимпульсной электроанальгезии синусоидальными импульсными токами и имеет следующие характеристики: амплитуда – 0 – 250 мА; форма импульса – прямоугольная, длительность импульса – 50 – 500 мкс, частота – 0,5 – 250 Гц; синусоидальная модуляция 50 Гц с несущей частотой 2,5 кГц. Кроме того, поддерживаются и другие режимы. Но данный прибор также не предусматривает возможность сохранения настроек в памяти.

Отечественный аппарат «Амплипульс», генерирующий синусоидальные сигналы с частотой 5 кГц, модулированные синусоидальным сигналом с частотой 10 – 150 Гц и глубиной модуляции 0 – 150% [2].

Патентный поиск выявил наработки, включающие в себя многочастотную электростимуляцию с соотношением частот в каналах 1:2:3:4 и смещением частот по каналам через заданные интервалы времени.

Таким образом, существующие аналоги генерируют либо заданный ток, либо заданное напряжение, формы сигналов отличаются друг от друга, диапазоны генерируемых токов, напряжений, временных параметров также различны у разных производителей. Рассмотренные приборы, как правило, не позволяют производить гибкую настройку параметров под конкретного пациента и его конкретную локализацию боли, кроме того, наиболее функциональные приборы имеют стационарное исполнение и высокую стоимость.

Цель работы

Цель работы – разработать электрическую схему портативного универсального электронейростимулятора, позволяющего генерировать токовые сигналы различных форм и параметров с возможностью точной настройки импульсов под нужды пациента и возможностью хранения и оперативного изменения настроек.

Результаты работы

Функциональная схема разработанного устройства (рис. 1) содержит следующие модули. Пульт оператора содержит: трёхкнопочную клавиатуру SB1, дискретный двухцветный светодиодный индикатор HG1, знакосинтезирующий жидкокристаллический дисплей HG2. С помощью клавиатуры происходит выбор программы обезболивания и, при необходимости, корректировка её параметров. Длительное удержание кнопки «Ввод» включает генерацию сигналов. Нажатие кнопки «Ввод» во время работы нейростимулятора отключает подачу тока. Кнопки «+», «-» в режиме нейростимулятора изменяют амплитуду тока стимуляции; в режиме настройки – изменяют корректируемые параметры и их значение. Индикатор HG1 может работать в следующих режимах: непрерывное свечение зелёным цветом – прибор включен; «жёлтый цвет» - режим нейростимуляции; «красный» завершение работы прибора. На дисплее HG2 отображает минимально необходимая информация о режиме работы устройства.

Контроль степени заряда аккумулятора G1 осуществляется по напряжению на нём с помощью встроенного в микроконтроллер U1 аналого-цифрового преобразователя.

Блок связи U2 представляет собой WiFi приёмопередатчик для связи с мобильным устройством управления (смартфон, планшет и т.д.). Обмен данными между U1 и U3 выполняется по стандартной шине UART.

Блок формирования нейросигналов работает следующим образом. Микроконтроллер U1 генерирует отсчёты сигнала и через встроенный широтно-импульсный модулятор (ШИМ) передаёт значения этих отсчётов на блок формирования нейросигналов. Фильтр нижних частот Z1 преобразует ШИМ сигналы в аналоговое напряжение. Регулируемый усилитель A1 задаёт амплитуду генерируемых сигналов. Коэффициент усиления усилителя задаёт микроконтроллер посредством шины I^2C. Сигнал с выхода усилителя поступает на преобразователь U4, который преобразует напряжение в ток. Для контроля уровня тока используется преобразователь U5 и дифференциальный усилитель A2, а также АЦП микроконтроллера.

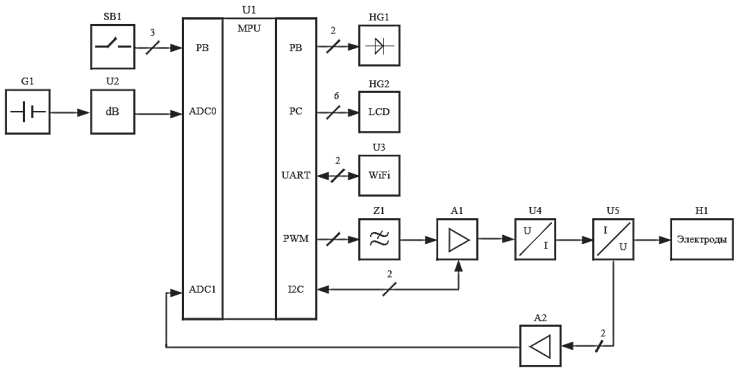


Рис. 1. Функциональная схема электронного обезболивающего средства

Заключение

В результате работы была спроектирована электрическая схема электронного обезболивающего средства со следующими отличительными особенностями: портативный и компактный корпус стимулятора, управление с помощью сторонних устройств (смартфон, планшет и т.д.) с последующей возможностью сохранения данных, тонкая регулировка параметров сигнала. Также, немало важным достоинством данного нейростимулирующего прибора является простота его использования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1 Супрунов, В. В. Лечебные воздействия импульсными и переменными электрическими токами / В. В. Супрунов, К. С. Мошковская // Международный студенческий научный вестник. – 2022. – № 2. – С. 2. – EDN CUXRMO.

2 Федотов, А. А. Системы электростимуляции органов и тканей : Электронное учебное пособие / А. А. Федотов, С. А. Акулов, Л. И. Калакутский. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), 2012. – 91 с. – EDN QZNFIR.

СЕКЦИЯ
ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС, АВИАЦИОННАЯ И МОРСКАЯ ТЕХНИКА

УДК656.02
Аверкиева Ксения Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Averkieva Ksenia Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Красильникова Ольга Алексеевна, кандидат технических наук, декан факультета авиационной и морской техники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Krasilnikova Olga Alekseevna, Candidate of Engineering Sciences, Dean of the Faculty of Aviation and Marine Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

ВЛИЯНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ
THE IMPACT OF LOGISTICAL TRANSPORT SYSTEMS ON THE EFFICIENCY OF AN ENTERPRISE'S FOREIGN ECONOMIC ACTIVITIES

Аннотация. В работе рассмотрены два транспортных маршрута перевозки строительной техники, с применением различных логистических схем транспортировки, Произведен расчет продолжительности доставки строительной техники, себестоимости перевозки одной единицы спецтехники морским транспортом, а также рассчитана сквозная тарифная ставка перевозки одного фронтального погрузчика и бульдозера. Проведен сравнительный анализ и выбран оптимальный вариант доставки.
Abstract. The paper considers two transport routes for the transportation of construction equipment, using various transportation schemes. The paper calculates the duration of delivery of construction equipment, the cost of transporting one unit of special equipment by sea, and the through tariff rate for transporting one front-end loader and a bulldozer. A comparative analysis is conducted, and the optimal delivery option is selected.
Ключевые слова: транспортный маршрут, логистическая система, морской транспорт, автомобильный транспорт, железнодорожный транспорт, продолжительность маршрута, сквозная тарифная ставка.
Key words: transport route, logistics system, sea transport, road transport, railway transport, route duration, through tariff rate.

Введение

Главным условием проведения внешнеэкономической деятельности (ВЭД) является ее эффективность. Логистические системы являются жизненно важными компонентами повышения эффективности внешнеэкономических операций. Транспортные аспекты логистики ВЭД оказывают значительное влияние на эффективность международных сделок; основными изучаемыми и определяющими параметрами являются выбор транспортного средства и минимизация затрат и времени на транспортировку груза.

На сегодняшний день Китаю принадлежит одна шестая часть мирового производства спецтехники, при этом отрасль развивается стремительными темпами. На российском рынке спецтехника из Китая получила высокую оценку, ее поставки отмечаются тенденцией к росту. Это происходит благодаря прямому сотрудничеству с производителями из Китая, тщательной проверке и сертификации продукции, адаптации ее для местных условий, сервисному обслуживанию высокого уровня.

Основная часть

Рассмотреть эффективность ВЭД и влияние на нее логистических систем на транспорте можно на примере компании ОАО «Полиметалл».

ОАО «Полиметалл» является компанией по добыче драгоценных металлов – золота и серебра. Компания самостоятельно осуществляет весь комплекс работ по освоению рудных месторождений – от проведения геологоразведочных работ до эксплуатации.

Компания в ближайшие годы планирует значительно увеличить объём своих золотых и серебряных запасов. Для реализации данного проекта по увеличению объема добычи по-

лезных ископаемых, предприятию ОАО «Полиметалл», потребуется значительное увеличение инвестиций на приобретение техники, используемой при добыче золота и серебра и доставку ее на место добычи.

Целью работы является: определить и дать экономическое обоснование оптимальной схемы доставки груза (спецтехники) из Сюйчжоу (Китай) в Магадан (Россия) и из Цзинин (Китай) в Магадан (Россия), рассмотреть эффективность ВЭД и влияние на нее логистических систем на транспорте на примере компании ОАО «Полиметалл».

Перевозка грузов осуществляется по двум транспортным маршрутам из города Сюйчжоу в порт Магадан и из города Цзинин в порт Магадан. Эти транспортные узлы соединены между собой железнодорожными, автомобильными и морскими путями.

На каждом из маршрутов рассмотрены две схемы доставки:

- Сюйчжоу – ж/д – Гродеково – авто – Владивосток – море – Магадан;
- Сюйчжоу – ж/д – Гродеково – ж/д – Владивосток – море – Магадан
- Цзинин – ж/д – Гродеково – авто – Владивосток – море – Магадан;
- Цзинин – ж/д – Гродеково – ж/д – Владивосток – море – Магадан

От Сюйчжоу до Гродеково и от Цзинин до Гродеково доставка осуществляется Китайской железной дорогой. Города Сюйчжоу и Цзинин расположены на одной железнодорожной ветке. Ее расстояние составляет:

- Сюйчжоу – Гродеково (2156 км);
- Цзинин – Гродеково (1980 км).

От Гродеково до Владивостока по первому варианту доставки (авто) расстояние составляет 205 км, по второму (ж/д) – 209 км.

Далее путь пролегает по морскому пути, его протяженность составляет:

Владивосток – Магадан (1319 миль).

В качестве транспортных средств используются: железнодорожная платформа модели 13-401; автопоезд**,** состоящий из седельного тягача марки МАЗ-6430А9-1320-020В и низкорамного полуприцепа – трала марки ТСП 94182-0000020 и грузовое судно «Пионер Корсаков».

Груз, импортируемый из Сюйчжоу в Магадан - фронтальный погрузчик XCMG-ZL30G, а из Цзинин в Магадан – бульдозер Shantui .

При перевозке, погрузке/выгрузке строительной техники необходимо соблюдать технические требования. Погрузка и выгрузка машин должна производиться грузоподъемными устройствами или самоходом.

На железнодорожную платформу машины устанавливают вдоль платформы симметрично ее продольной оси. После установки на платформу каждую из гусениц машин закрепляют поперечными упорными брусками. Кроме упорных брусков, каждую машину закрепляют четырьмя растяжками, располагаемыми таким образом, чтобы одновременно угол между растяжкой и полом и угол между проекцией растяжки и продольной осью платформы не превышал 45^{o}. Сверху над брусьями размещается отвал на расстоянии не менее 100 мм от концевой балки платформы. Отвал закрепляется четырьмя растяжками из проволоки диаметром 6 мм в нити за петли на отвале и боковые стоечные скобы платформы.

Для перевозки спецтехники с большими габаритами по высоте до 4,5 метров по автомобильной дороге используются низкорамные полуприцепы-тралы, которые позволяют осуществить самостоятельный заезд спецтехники (при помощи аппарели) ее устойчивое расположение и крепление с учетом габаритных и весовых параметров.

В процессе погрузки водитель должен обратить внимание на то, что центр масс груза должен совпадать с продольной осью полуприцепа, в противном случае возможно опрокидывание прицепа. Технология увязки спецтехники на трале предусматривает ее увязку проволокой горячекатаной толщиной 6 мм к технологическим отверстиям специально предусмотренных для этих целей, как на самом трале, так и на перевозимой на нем технике.

Погрузка-выгрузка на морские суда должна производиться в соответствии с требованиями нормативно-технологической документации, утвержденной в установленном порядке.

Погрузка-выгрузка осуществляется портальным краном. Места на судне, предназначенные для перевозки самоходной техники должны быть оборудованы точками крепления найтовов.

В работе были произведены расчеты продолжительности маршрутов, эксплуатационно-экономические показатели работы транспортных средств.

От города Сюйчжоу до порта Магадан по первому варианту доставки продолжительность маршрута составляет 24,94 суток., по второму варианту – 25,76 суток.

Сквозная тарифная ставка по первому варианту составляет 24623 руб., по второму варианту – 219623 руб.,

От города Цзинин до порта Магадан по первому варианту доставки продолжительность маршрута составляет 20,04 суток, по второму варианту - 20,86 суток.

Сквозная тарифная ставка перевозки одного бульдозера по первому варианту составляет 210373 руб., по второму варианту – 205373 руб.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что по транспортному маршруту Сюйчжоу – Магадан оптимальным будет являться второй вариант доставки фронтальных погрузчиков. Так как разница в 0,82 суток при доставке не как не отразится на показателях добычи предприятия и позволит сэкономить 370000 рублей при перевозке 74 фронтальных погрузчиков.

Также, можно сделать вывод, что по транспортному маршруту Цзинин – Магадан оптимальным будет являться второй вариант доставки бульдозеров. Так как разница в 0,82 суток при доставке не как не отразится на показателях добычи предприятия и позволит сэкономить 270000 рублей при перевозке 54 бульдозеров.

Важным условием успеха китайской спецтехники на российском рынке является относительно невысокая цена.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Назаренко В.М., Назаренко К.С. Транспортное обеспечение внешне экономической деятельности. Москва: Центр экономики и маркетинга, 2000. 512 с.
2. Черенков В.И. Внешнеэкономическая деятельность: основные операции. Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. 541 с.
3. Дыбская В.В. Проектирование системы распределения в логистике. Москва: ИНФРА-М, 2024. 235 с.
4. Расчет железнодорожного тарифа. // R-TARIFF.com. URL: http://r-tariff.com (дата обращения 17.02.2026).

УДК 629.5:621.982

Айрих Илья Иванович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Airikh Ilya Ivanovich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Потянихин Дмитрий Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Potyanikhin Dmitry Andreevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРАВКИ СУДОВЫХ СВАРНЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR STRAIGHTENING MARINE WELDED HULL STRUCTURES

Аннотация. В данной статье рассмотрены основные виды деформации сварных корпусных конструкции, причины их возникновения. Приведены методы правки сварных корпусных конструкций. Приведен обзор и анализ современных методов правки судовых сварных корпусных конструкций.

Abstract. This article examines the main types of deformation in welded hull structures and their causes. Methods for straightening welded hull structures are presented. A review and analysis of modern methods for straightening ship welded hull structures is provided.
Ключевые слова: судостроение, деформация конструкций, сварочные напряжения, остаточные напряжения, правка конструкций.
Key words: shipbuilding, structural deformation, welding stresses, residual stresses, structural straightening.

Введение

Основным методом сборки судовых корпусных конструкций является соединение элементов конструкций сваркой. В процессе создания сварных соединений неизбежно возникают сварочные напряжения, приводящие к деформациям судовых конструкций, которые подлежат исправлению. Отраслевым стандартом ОСТ5.9079 установлены нормы на местные деформации сварных корпусных конструкций в составе готового корпуса, а также методы контроля местных деформаций. Согласно данного стандарта местные деформации обшивки корпусных конструкций классифицируются на следующие виды:

- бухтоноватость;
- ребристость;
- угловые деформации;
- «провал ребра».

При этом определены основными причинами деформаций: остаточные укорочения сварных соединений, угловые деформации сварных соединений, в том числе от приварки набора [1].

Кроме того, необходимо отметить в качестве причины деформации конструкции вторичные сварочные деформаций от сварки смежных и/или вышестоящих конструкций, в результате которых возникают общие напряжения в конструкции корпуса, что со временем приводит к перераспределению, наложению с остаточными сварочными напряжениями в конструкциях, и как следствие, росту напряжений и потере устойчивости (деформированию). Аналогичные явления наблюдаются в процессе достройке судов у пирса, где наблюдаются неравномерный естественный нагрев корпуса, а также от волнового воздействия на этапе перегона заказа или проведения ходовых испытаний.

Основная часть

Объем работ по правке сварных корпусных конструкций на различных этапах строительства различается и составляет от 10 до 20 процентов трудозатрат на изготовление соответствующих судовых конструкции. В отдельных случаях трудозатраты сопоставимы с затратами на изготовление конструкции.

Основным руководящим документом в судостроительной отрасли регламентирующим методы правки и их допустимость, технологию правки, требования к материалам, оборудованию и инструменту, применяемым при правке является РД5.9621-83 «Корпуса металлических судов. Правка сварных корпусных конструкций. Основные положения». Согласно РД правка корпусных конструкций должна выполняться следующими методами:

- удлинение волокон сварных соединений, получивших пластические деформации укорочения холодным методом и методом низкотемпературного нагрева (тепловыми домкратами);

- укорочение волокон отдельных элементов конструкций тепловым безударным методом – концентрированным местным нагревом с естественным или искусственным охлаждением и комбинированным методом – концентрированным местным нагревом с естественным или искусственным охлаждением и механическим воздействием [2].

Таким образом можно определить два способа воздействия на деформации (напряжения) тепловое воздействие и механическое воздействие.

Учитывая сложность процесса деформирования корпусных конструкций: причиной деформаций является совокупность внешних и внутренних напряжений и их динамичность в

процессе строительства, формирования корпусных конструкций и корпуса в целом, в качестве традиционной технологии правки приняты тепловой и комбинированный методы.

Данные методы не требуют специального оборудования, позволяют осуществлять правку во всех пространственных положениях и на протяжении всего технологического цикла изготовления конструкций: узлы, подсекции, секции, блоки корпуса, конструкции корпуса.

Однако обладают существенными недостатками, связанными с:

- необходимостью наличия существенного опыта у исполнителя работ и инженерно-технического персонала;
- наличия в нормативной документации общих принципов технологической последовательности правки конструкций без учета конструктивных особенностей;
- отсутствием и невозможностью контроля остаточных напряжений после правки конструкций.

В отдельных случаях к дополнению к локальному нагреву применяют дополнительно принудительное охлаждение (струей воды), что позволяет увеличить величину укорочения волокон.

За длительный период времени освоения и развития технологии выполнения сварочных работ совершенствовались и развивались как методы снижения сварочных напряжений в процессе сварки, так и методы снижения остаточных сварочных деформаций после изготовления конструкций. В частности, к механическим воздействиям, можно отнести следующие виды:

- изгиб конструкций на прессе;
- растяжение на специализированных машинах;
- прокатка сварных полотнищ или зоны сварных соединений на специализированных машинах;
- проколачивание зоны сварных соединений;
- установка дополнительных ребер жесткости;
- вибрационная обработка;
- дробеструйная обработка;
- ультразвуковая ударная обработка;
- лазерное ударное упрочнение.

Из приведенных выше видов правки с механическим воздействием можно отнести к современным такие виды, как вибрационная обработка, ультразвуковая ударная обработка и лазерное ударное упрочнение.

Вибрационная обработка - это метод снятия остаточных напряжений путем воздействия вибрационных нагрузок, которые вызывают микро- и макропластические деформации в материале, суммируясь с остаточными сварочными напряжениями, перераспределяя их и снижая их уровень. Самым эффективным является воздействие на резонансных частотах конструкции, что обеспечивает высокие амплитуды динамических напряжений.

Метод обладает следующими преимуществами: снижение остаточных напряжений (до 70%) и уменьшение величины бухтиноватости, возможность обработки крупногабаритных конструкций.

При этом существуют недостатки: возможно снижение усталостной прочности сварных швов на 10-20% при неправильном режиме и требует точного определения частот резонанса.

Ультразвуковая ударная обработка сварных швов - это метод поверхностного пластического деформирования, при котором ультразвуковым ударным инструментом наносятся высокочастотные удары бойком. Эффективно снимает остаточные напряжения, создает сжимающие напряжения, устраняя растягивающие напряжения в поверхностном слое, уменьшает зернистость структуры металла, увеличивает усталостную долговечность и коррозионную стойкость.

Лазерное ударное упрочнение – это высокотехнологичный метод обработки поверхности, за счет создания мощным импульсом лазера плазмы на поверхности покрытой погло-

щающим слоем, которая генерирует ударную волну. Волна распространяется вглубь металла, вызывая пластическую деформацию и приводит к образованию сжимающих напряжений.

Преимущества перед традиционными методами: бесконтактность (нет износа инструмента) и отсутствие термического воздействия.

Метод обладает недостатком: требуется проведение дополнительных работ по нанесению поглощающего слоя и удерживающего слоя, в связи с чем, применение данного метода в судостроении ограничено.

Данные виды правки в совокупности с устройствами, позволяющими оперативно выявлять и визуализировать в металлических конструкциях локальные области с повышенным напряженно-деформированным состоянием металла, например, многоканальный сканер напряжения металла «АНТИСТРЕСС - МАГНИТ плюс», позволяют сократить объем правки, повысить безопасность и качество выполнения работ, минимизировать термическое воздействие на материал [3]. Оборудование для правки данными способами является компактным, позволяет выполнять работу на различных этапах формирования корпусных конструкций: узлы, подсекции, секции, блоки корпуса и в составе сформированного корпуса.

К методам правке с тепловыми воздействиями, можно отнести следующие виды:

- нагрев пламенем газовых горелок и керосинореза;
- нагрев плазменной горелкой с независимой дугой;
- нагрев электрической дугой;
- индукционный нагрев;
- объемная термическая обработка (отжиг конструкции в печи);
- внепечная объемная термообработка.

К современному виду правки перспективным для судостроения можно отнести индукционный нагрев. Это высокоэффективный метод, основанный на воздействии переменного электромагнитного поля, которое создает вихревые токи внутри металла. Он обеспечивает быстрый, равномерный и местный нагрев (600–900°C), повышая пластичность и снимая остаточные деформации. Режим обработки включает быстрый нагрев, выдержку (около 2,5 мин на 1 мм толщины) и медленное охлаждение.

Обладает следующими преимуществами: высокой скоростью нагрева и КПД до 90% относительно газопламенного нагрева, за счет автоматизации нагрева обеспечивается стабильность температуры и стабильное качество.

К наиболее прогрессивным технологиям относятся лазерные, электромагнитные и специализированные ультразвуковые методы снятия сварочных напряжений.

Заключение

Современные методы правки корпусных конструкций, снятия остаточных сварочных напряжений, развиваются в сторону автоматизации процесса, снижения энергозатрат и минимизации термического воздействия на материал. Это достигается за счет применения компактного оборудования, его универсальности и возможности применения на всех этапах формирования конструкций корпуса. Минимизации термического воздействия достигается за счет идентификации участков с максимальными сварочными напряжениями, автоматизации процесса и уменьшения субъективных факторов выполнения работ, исключения повторной правки конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ОСТ5.9079-80. Деформации местные сварных конструкций. Нормы и методы контроля. Л.: НПО «Ритм», 1980. 19 с.

2. РД5.9621-83. Корпуса металлических судов. Правка сварных корпусных конструкций. Основные положения. Л.: НПО «Ритм», 1983. 68 с.

3. Снятие остаточных сварочных напряжений. Опубл.: 29.01.2016 // МАГНИТ плюс. URL: https://magnitsp.ru/articles/snyatie_ostatochnykh_svarochnykh_napryazheniy/ (дата обращения: 18.03.2026).

УДК 658.5:629.5
Аксёнова Ольга Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Aksenova Olga Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бурменский Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Burmensky Andrey Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ЕДИНАЯ ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА МОНИТОРИНГА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КООПЕРАЦИЕЙ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ
A UNIFIED DIGITAL MORITORING PLATFORM AS AN ELEMENT OF COOPERATION MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION OF MARINE FACILITIES

Аннотация. В статье представлена концепция единой цифровой платформы мониторинга судостроения для управления кооперацией в процессе строительства объектов морской техники. Описаны ключевые принципы работы платформы, функциональные возможности. Показаны преимущества цифровизации процессов согласования, контрактации и контроля исполнения государственных контрактов в судостроительной отрасли.
Abstract. The article presents the concept of a unified digital monitoring shipbuilding platform for managing cooperation in the process of building marine engineering facilities. The key principles of the platform's operation and its functionality are described. The advantages of digitalizing the processes of coordination, contracting, and monitoring the execution of government contracts in the shipbuilding industry are highlighted.
Ключевые слова: цифровая платформа, кооперация, объект морской техники, государственный контракт, судостроение, цифровизация.
Key words: digital platform, cooperation, marine engineering facility, state contract, shipbuilding, digitalization.

Введение

В настоящее время ведется широкая дискуссия о широком внедрении цифровых технологий в практику отечественных судостроительных предприятий, в рамках разработки системы поддержки жизненного цикла объектов морской техники (ОМТ) [1]. Однако опускается один из важнейших аспектов по строительству ОМТ.

Сложность исполнения государственного заказа по строительству ОМТ заключается в том, что образуется многоуровневая кооперация включающая в себя верфь, заключившую государственный контракт с государственным заказчиком, основных поставщиков (производителей основных комплектующих изделий – часто разработчики вооружения и военной техники), второстепенных поставщиков (материалы и сырье), проектные бюро, научно-исследовательские институты.

На строительство одного ОМТ может быть задействовано более 500 соисполнителей, указанных в ведомостях проектанта. Такая структура требует единых цифровых механизмов управления, обеспечивающих контроль, прозрачность и оперативность на всех этапах жизненного цикла ОМТ.

Законодательством к исполнению государственных контрактов предъявляются повышенные требования, включая строгое соблюдение графиков строительства, точное соответствие техническим условиям и прозрачность механизмов ценообразования, раздельный учет затрат по каждому контракту [2, 3]. При этом, быстрое и качественное представление предложения по цене в рамках государственного контракта является первостепенной задачей.

С учетом санкционной политики и необходимости обеспечения технологического суверенитета предлагается концепция единой закрытой цифровой платформы мониторинга су-

достроения (ЕЦПМС), как сквозной цифровой среды, объединяющей процессы проектирования, строительства, сдачи и эксплуатации кораблей и судов в рамках единого информационного пространства. Платформа нацелена на обеспечение полной прозрачности, контроля и оперативного взаимодействия между заказчиком, проектантом, верфью, соисполнителями и контролирующими органами.

Ключевые принципы работы платформы

1. Закрытый доступ. ЕЦПМС функционирует как закрытая система, доступ к которой строго регламентирован. Полный доступ предоставляется государственному заказчику, верфи, контролирующим и надзорным органам,

2. Доступ соисполнителей в рамках кооперации сегментированный, в зависимости от роли и задач.

3. Распределенное хранение данных. Информация хранится на трех независимых серверах, а именно, верфи, государственного заказчика и контролирующего органа, а также возможно в федеральной службе безопасности с целью обеспечения информационной безопасности и защиты от несанкционированного доступа.

4. Единый формат документов – полная унификация всех форм: договоров, расчетно-калькуляционных материалов, технической документации, актов.

Функции ЕЦПМС на отдельных этапах жизненного цикла ОМТ

Функционал предлагаемой цифровой платформы мониторинга зависит от этапов ее вовлечения в процесс создания объекта морской техники, которые практически совпадают с этапами жизненного цикла ОМТ [4]. Рассмотрим их более подробно.

1. К процессу проектирования ЕЦПМС подключаются на этапе эскизного проектирования, в рамках которого разрабатывается первичная цифровая модель ОМТ, включающая основные геометрические параметры, состав и компоновку оборудования. На этом этапе взаимодействуют КБ и заказчик. А также проверяется возможная степень реализации импортозамещения в разрабатываем проекте.

2. На этапе технического проектирования в ЕЦПМС подключаются потенциальные участники кооперации: проектанты – конструкторские бюро и научно-исследовательские институты, разработчики судового оборудования. Все взаимодействие происходит в рамках единой САПР-среды, что исключает потерю данных и несогласованность проектных решений.

Проводится расчет основных нагрузок на корпус и конструкции с использованием цифровых симуляций (гидродинамика, прочность, вибрация). Формируется предварительная стоимость строительства на основе цифрового калькулятора, интегрированного в платформу.

Все изменения фиксируются в единой базе данных, с указанием автора, времени и причины.

Платформа поддерживает единый формат обмена данными между САПР, что позволяет интегрировать как отечественные, так и унаследованные проекты из зарубежных систем.

Разработчик составного комплектующего судового оборудования вносит в ЕЦПС все данные об импортных составляющих своего изделия, после чего проектант совместно с верфью и государственным заказчиком проводят анализ связанных с ними рисков (логистических, санкционных, технологических и иных). По результатам анализа принимается решение либо о формировании запаса импортных комплектующих, либо о доработке конструкторской документации с поиском и тестированием российских аналогов и последующей корректировкой спецификации изделия.

3. Этап контрактации. На данном этапе определяется верфь для заключения государственного контракта. В ЕЦПМС загружается контракт между государственным заказчиком и верфью, обоснование выбора верфи. Присваивается идентификатор контракту, загружается проект заказа в закрытую часть цифровой платформы, ведомости в несекретной части.

На основании ведомостей проектанта формируется цепочка кооперации, единственных исполнителей. Соисполнители подключаются к цифровой платформе в разрешенной части.

Верфь, проектант, производители судового комплектующего оборудования формируют ориентировочную цену.

На данном этапе в ЕЦПМС интегрируются база данных готовых проектных решений, включающая: типовые корпуса, стандартные модули, унифицированные энергетические установки, решения по импортозамещению, рабоче-конструкторская документация, расчеты трудоемкости и материалов как самого ОМТ, так и основных систем.

4. На этапе строительства ОМТ ЕЦПМС становится центральным инструментом управления производственным процессом.

4.1. Конструкторская документация (КД) дорабатывается в режиме реального времени. Внесение изменений в КД происходит в цифровом виде, с мгновенным уведомлением всех заинтересованных сторон. Согласование изменений заказчиком КД, сроков строительства и др. документов в рамках кооперации происходит автоматизировано с проставлением электронной визы\подписи на документе.

Зачастую в реальности происходит, что по объективным причинам разработчик судового комплектующего изделия вносит изменение в конструкторскую документацию своего изделия (например, в рамках импортозамещения), кооперация по строительству ОМТ может располагаться в разных регионах, естественно пока проект решения будет согласован проектантом, верфью и непосредственно заказчиком может пройти более одного года. Что существенно сказывается на сроках строительства ОМТ. При использовании ЕЦПС обеспечивается, что проект документа, подготовленный инициатором, не потеряется в дороге, сокращаются сроки согласование. Позволяет согласовывать документ одновременно несколькими заинтересованными лицами.

При внесении изменений все расчеты нагрузок и стоимости пересчитываются автоматически на основе цифровой двойник судна, в котором отражается текущее состояние объекта на верфи.

4.2. Договорная работа в рамках кооперации также проходит через ЕЦПС. Заключение договора обязательно для единственного поставщика, который указан в ведомостях проектанта, либо который указан нормативном акте как единственный.

ЕЦПС содержит типовые формы договоров на поставку товарно-материальных ценностей, выполнение услуг, работ. Договор формируется автоматически путем заполнения формы (предмет, сроки, документы качества, приемка, спецификация, ТУ прикрепляется производителем). Электронная процедура заключения договора не предусматривает рассмотрение протоколов разногласий и иных согласительных договорных документов на этапе заключения.

В ЕЦПС установлены регламентированные сроки для заключения договора. Единственный поставщик не имеет право не подписать договор. За нарушение сроков подписания договора, за отказ от заключения от договора предусматривается ответственность, информация о нарушении автоматически направляется в контролирующий, надзорный орган для принятия мер реагирования.

При несогласии заключить договор в целом, единственный поставщик подкрепляет обоснование невозможности заключения договора (заключение Минпромторга об отсутствии аналогов производства на территории России, либо иной документ, выданный компетентным органом. В случае несогласия заключить договор верфь инициирует задание проектанту и государственному заказчику о замене поставщика либо оборудования либо об исключении оборудования из проекта.

4.3. Формирование документов по исполнению контракта и договоров в рамках кооперации.

- оплата платежей. В ЕЦПМС автоматически формируются сроки и суммы платежей. Предприятия входящие в кооперацию делают выгрузку в ЕЦПМС с банков по исполнению денежных обязательств.

- документы по исполнению договора. В ЕЦПМС отражены сроки исполнения. Предприятие исполнитель подкрепляет документы по исполнению договора (товарные накладные, акты, документы о качестве и др.). Верфь подтверждает исполнение договорных обязательств предприятием исполнителем. Также при отклонении программа фиксирует факт

нарушения договорных сроков. Предприятие нарушитель подкрепляет обоснование, исключающие вину (решение госзаказчика, заключение торгово-промышленной палаты, заключение Минпромторга России об отсутствии аналогов и т.п.).

- обосновывающие цену документы. В программе автоматически формируются сроки предоставления обосновывающие цену документы. Предприятия, входящие в кооперацию подкрепляют обосновывающие цену документы в ЕЦПМС.

4.4. Контроль заказчика над ходом строительства. Автоматизация отчетности и корректировок.

ЕЦПМС обеспечивает сквозной контроль за ходом строительства: Государственный заказчик, а также контролирующие и надзорные органы имеют круглосуточный доступ к производственной линейке верфи, могут отслеживать ход сборки корпуса, установку главных энергетических установок и систем, поставку материалов и комплектующих, выполнение технологических операций, могут проконтролировать учет фактических затрат на материалы и трудозатраты, контролировать качество проведенных работ, например, сварных швов, покраски, герметичности и т.д.

В реальном режиме времени отображаются физические параметры (вес, центровка, геометрия), финансовые затраты (по статьям расходов, контрактам, поставщикам), график производства с отклонениями от плана.

Система автоматически пересчитывает сроки и стоимость при изменениях в проекте или логистике.

ЕЦПМС предусматривает право государственного заказчик влиять на процессы путем внесения изменений в рабоче-конструкторскую документацию, запрашивать дополнительные проверки, приостанавливать работы при выявлении отклонений.

Возможные модули ЕЦПМС

Модуль проектирования: интеграция с САПР, база типовых решений.

Модуль контрактации: автоматизация договорной работы, унифицированные формы договоров, реестр поставщиков основного судового оборудования.

Модуль строительства: цифровой двойник, контроль поставок, контроль за проведением работ на верфи, согласование решений об изменении конструкторской документации, решение проблемных вопросов возникающих у кооперации в рамках строительства ОМТ и др.

Модуль финансов и учета.

Модуль контроля и отчетности.

Заключение

Внедрение ЕЦПМС для управления кооперацией в процессе строительства объектов морской техники представляет собой стратегически важное решение, которое позволит комплексно оптимизировать процессы исполнения государственных контрактов и повысить их эффективность.

Во первых, платформа обеспечит повышение прозрачности и усиление контроля со стороны регулирующих органов. Поскольку вся документация будет аккумулироваться в единой базе данных, верфь и соисполнители освобождаются от необходимости повторно предоставлять материалы для проверок - контролирующие органы получат оперативный доступ к актуальным данным в режиме реального времени. Это исключит избыточную бумажную переписку и снизит административную нагрузку на участников кооперации.

Во вторых, внедрение ЕЦПМС приведёт к существенному сокращению сроков выполнения ключевых процессов:

- ускорится договорная работа за счёт автоматизации согласования и подписания документов;

- сократятся сроки предоставления отчётных материалов по контрактам и договорам;

- ускорится принятие управленческих решений благодаря мгновенному доступу к необходимой информации.

В третьих, система позволит чётко распределить ответственность между участниками кооперации. В случае срыва выполнения государственного контракта ответственность будет применяться не только к головному исполнителю, но и к соисполнителям, при наличии их

вины. Дополнительно будут внедрены механизмы оперативной замены недобросовестных поставщиков, что минимизирует риски нарушения сроков и условий контракта.

В четвёртых, ЕЦПМС гарантирует высокое качество и полноту предоставляемой документации на всех этапах исполнения государственного контракта. За счёт стандартизации требований к составу и формату документов исключаются ошибки, пропуски и несоответствия. Автоматизированный контроль обеспечит соблюдение нормативных требований и своевременное предоставление всех необходимых материалов.

В пятых, ЕЦПМС создаст условия для эффективного бюджетного контроля и оптимизации затрат:

- цифровые калькуляторы позволят точно рассчитывать затраты и предотвращать перерасход средств;
- повысится прозрачность ценообразования - все расчёты будут доступны для аудита;
- улучшится точность бюджетного планирования;
- будет обеспечен непрерывный аудит финансовых операций на всех стадиях исполнения контракта.

Таким образом, ЕЦПМС станет ключевым инструментом цифровой трансформации отрасли. Она позволит выстроить эффективное, надёжное и прозрачное управление процессами строительства морской техники, полностью соответствующее современным требованиям государственного регулирования и задачам национальной промышленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Липис А.В., Чаплыгин О.С. Цифровая трансформация в судостроении. Анонс цикла публикаций // Судостроение. 2025. № 1(878). С. 7-9.
2. О государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу, а также о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 2 декабря 2017 г. № 1465 (ред. от 14.02.2026). Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: по подписке.
3. О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд: Федеральный закон от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: по подписке.
4. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб.: Моринтех, 2001. 432 с.

УДК 656.025

Алферьева Ольга Вячеславовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Alfereva Olga Viacheslavovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОСОБЕННОСТИ ДОСТАВКИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ДО НИКОЛАЕВСКА-НА-АМУРЕ
FEATURES OF DELIVERY OF BUILDING MATERIALS TO NIKOLAEVSK-ON-AMUR

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию технологии доставки цемента в город Николаевск-на-Амуре. Подробно рассмотрен маршрут от завода-производителя в п. Мохсоголлох (Республика Саха (Якутия)) через ключевые транспортные узлы: Качикатцы, Томмот, Комсомольск-на-Амуре и с. Подгорное. Выявлены основные этапы перевозки и их сезонные ограничения. Оценены доли затрат на каждом этапе перевозки.

Abstract. This paper is devoted to the study of cement delivery technology to the city of Nikolayevsk-on-Amur. The route from the manufacturing plant in the village of Mokhsogollokh (Republic of Sakha (Yakutia)) through key transport hubs: Kachikatsy, Tommot, Komsomolsk-on-Amur, and the village of Podgornoye, is examined in detail. The main stages of transportation and their seasonal limitations are identified. The cost shares at each stage of transportation are estimated
Ключевые слова: железнодорожные перевозки, цемент, биг-бег, автомобильные перевозки, затраты на перевозку.
Key words: railway transportation, cement, big-bag transportation, road transportation, transportation costs.

Введение

Обеспечение удаленных районов Дальнего востока и Якутии строительными материалами является сложной логистической задачей [1]. Одним из ключевых грузов для строительной отрасли является цемент. В Хабаровском крае, в частности в г. Николаевске-на-Амуре, осуществляют деятельность компании, занятые в добыче руд, строительстве и лесозаготовке, для которых бесперебойные поставки цемента критически важны. Основным производителем цемента в данном регионе является АО ПО «Якутцемент» [2], расположенный в поселке Мохсоголлох (Хангаласский улус, Республика Саха (Якутия)). При организации поставки груза основными задачами для оператора перевозки (оператора мультимодальной перевозки) являются сохранение груза, снижение времени транспортировки и минимизация затрат. В данной работе выполнено исследование организации транспортной схемы для доставки цемента от производителя до потребителя, находящегося в г. Николаевске-на-Амуре, с целью выявления основных «узких мест» маршрута и особенностей процесса транспортировки, влияющих на стоимость доставки.

Основная часть

Рассмотрена организация доставки цемента, производимого АО ПО «Якутцемент». Завод расположен в поселке Мохсоголлох, в 100 км выше по реке Лена от города Якутска, что делает реку ключевой транспортной артерией для вывоза крупных партий продукции. Предприятие выпускает широкий спектр цемента, включая портландцемент М400 и М500, востребованный для различных объектов строительства. Ввиду сложности и длительности маршрута, транспортных характеристик цемента, партия цемента должна быть обязательно упакована в герметичные мешки или мягкие контейнеры биг-бэги.

Доставка цемента от завода в п. Мохсоголлох до г. Николаевска-на-Амуре представляет собой сложный мультимодальный маршрут, который можно разделить на несколько ключевых этапов.

1) Участок Мохсоголлох – Качикатцы (водный/автомобильный). Первоначальный этап перевозки проходит по реке Лена. От пристани завода в п. Мохсоголлох цемент грузится на баржи для транспортировки вниз по течению до пристани Качикатцы. Данный этап возможен исключительно в период открытой навигации на Лене (с июня по октябрь). Автомобильная перевозка на данном участке осуществляется в период открытия ледовой переправы до пристани Качикатцы.

2) Участок Качикатцы – Томмот (автомобильный). В Качикатцах происходит перевалка груза с речного на автомобильный транспорт (в летний период). Далее цемент следует по автомагистрали «Лена» (А-360) до города Томмот. Это круглогодичный участок, однако, в зимний период требуется учитывать возможное ограничение движения по трассе из-за погодных условий и необходимость обеспечивать сохранность груза в сложных климатических условиях.

3) Участок Томмот – Комсомольск-на-Амуре (железнодорожный). В Томмоте груз перегружается на железнодорожный транспорт (действует участок Амуро-Якутской магистрали). Далее следует железнодорожная перевозка до станции Комсомольск-на-Амуре. Для перевозки цемента могут использоваться открытые вагоны при перевозке в биг-бэгах или крытые вагоны при перевозке в герметичных мешках на паллетах.

4) Участок Комсомольск-на-Амуре – с. Подгорное (автомобильный). Из Комсомольска-на-Амуре от железнодорожной станции груз следует в автомашине до причала паромной переправы в селе Подгорное.

5) Участок с. Подгорное – г. Николаевск-на-Амуре (водный/автомобильный). Последний этап – преодоление реки Амур. Николаевск-на-Амуре расположен на противоположном от с. Подгорное берегу. В летний период для перевозки используется паромная переправа. В зимний период доставка выполняется по коммерческой ледовой переправе для тяжелой техники. В период ледохода и ледостава (весна и осень) транспортировка через Амур невозможна, что создает значительные сезонные ограничения для всего маршрута.

Выполнены расчеты стоимости доставки груза на автомобильном и железнодорожном плече маршрута, водные перевозки определены по представленным пароходствами актуальным данным в навигацию 2025г. и стоимости ледовой переправы в период 2025-2026 г. Грузовые операции оценены по типовым технологиям. Полученные значения по укрупненным группам расходов представлены на рис. 1.

Абсолютный лидер затрат – железная дорога. Перевозка по железной дороге на плече Томмот – Комсомольск-на-Амуре составляет более половины всех расходов (51,5% летом и 55,2% зимой). Это самое дорогое звено в логистической цепи. Высокая стоимость автомобильных перевозок. Особенно выделяется участок Комсомольск-на-Амуре – Подгорное, который занимает пятую часть всех затрат (около 21-22%). Стоимость перевалки. Три операции по перегрузке (авто-ж/д, ж/д-авто и выгрузка в порту) суммарно около 7-8% в стоимости доставки. Водная преграда имеет значение. Переправа через Лену летом стоит заметно дороже (4,48%), чем через Амур (3,43%). Зимой ледовые переправы, наоборот, становятся самыми дешевыми этапами (менее 1%). Общая стоимость доставки зимой на 7% дешевле за счет замены дорогих паромов на более дешевый проезд по льду (даже с учетом стоимости самих ледовых переправ), что также было отмечено в работе [3].

В рассматриваемом маршруте можно выделить дополнительные сложности для грузоотправителя, такие как: высокие транзакционные издержки из-за мультимодальности, риски утраты груза при многочисленных перевалках, зависимость от работы портов и очередей на грузовые работы. А для грузополучателя: финансовая нагрузка - необходимость оплаты годового объема заранее, потребность в больших складских мощностях, потеря качества цемента при долгой транспортировке, проблема вывоза груза с причала, риски хищения.

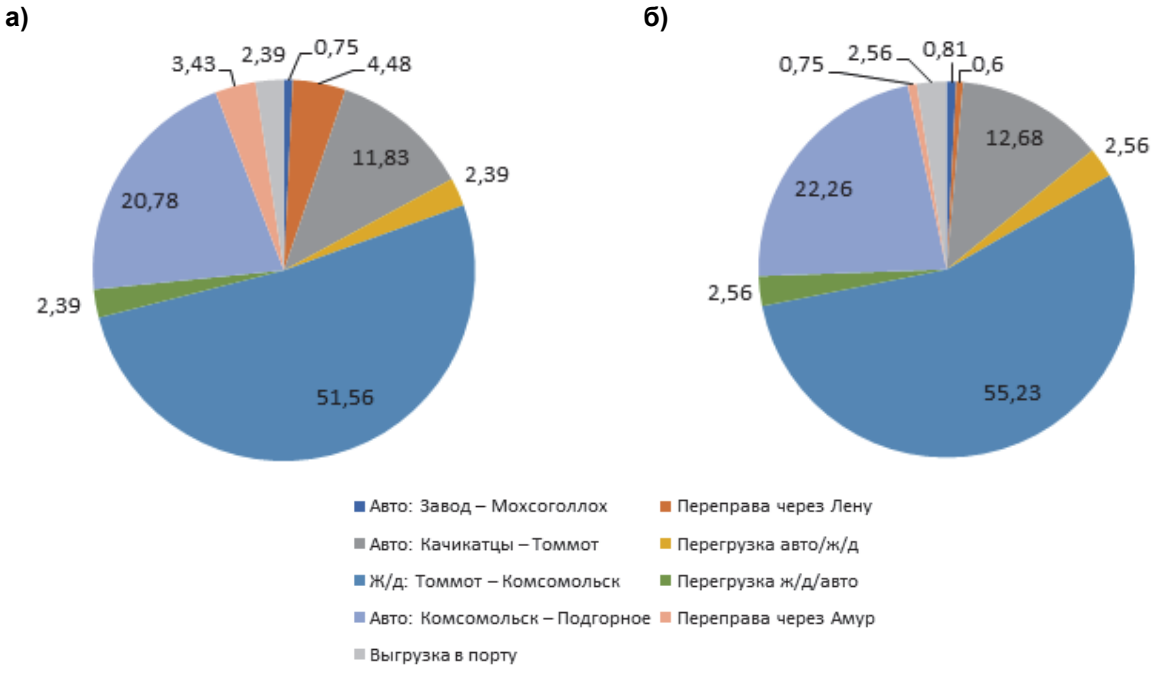


Рис. 1. Структура затрат на доставку цемента: а) летний период, б) зимний период

Заключение

Проведенные исследования позволили сформулировать несколько замечаний. Особенностью рассмотренного маршрута является его ярко выраженная сезонность, обусловленная зависимостью от речной навигации на реках Лена и Амур, а также от работы ледовых и паромных переправ. Маршрут включает несколько перевалок груза с одного вида транспорта на другой (речной → автомобильный → железнодорожный → автомобильный), что требует четкой координации работы всех участников транспортного процесса, согласованности основных параметров перевозки. Многоэтапный процесс доставки груза существенно увеличивает стоимость конечной продукции. Преодолеть сезонность и упростить логистику позволило бы строительство мостов через реки Лена (в районе Якутска) и Амур (в районе Николаевска-на-Амуре), что обеспечило бы круглогодичное сообщение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корунова В.С., Каменских И.В. Организация перевозки цемента // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 г. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2024. Ч. 1. С. 506-509.
2. Якутцемент. Опубл.: 01.09.2025 // ЦЕМЕНТ.РУ: отраслевой портал. URL: http://www.www.rucem.ru/factorys/file34.php (дата обращения: 11.03.2026).
3. Петренко П.В., Каменских И.В. Технология доставки нефтепродуктов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2021. Ч.1. С.301-302.

УДК 539.3

Андрианов Иван Константинович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Andrianov Ivan Konstantinovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Computer Design, Komsomolsk-na-Amure State University
Пухов Алексей Александрович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Pukhov Alexey Alexandrovich, postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ УПРОЧНЕНИИ
EFFECT OF ALLOYING COMPONENTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH STEELS DURING STRAIN HARDENING

Аннотация. В статье рассмотрено влияние массовых концентраций различных легирующих компонентов в составах высокопрочных сталей на их механические свойства при условии обработки методами поверхностного упрочнения. В результате анализа механических свойств типовых сплавов 40ХН2СМА, 30ХГСН2А, 30Х2ГСН2ВМ, 30Х2Н2СВМФА, 25Х2ГНТА, 42Х2ГСНМА путём оценки их модуля упрочнения было показано, что более высокие концентрации никеля в качестве легирующего агента по сравнению с хромом коррелируют с большими прочностными свойствами сталей при их деформационном упрочнении, что может быть использовано в качестве одного из критериев при выборе необходимого конструкционного материала.

Abstract. This article examines the influence of mass concentrations of various alloying components in high-strength steels on their mechanical properties after strain hardening. An analysis of the mechanical properties of typical alloys 40ХН2СМА, 30ХГСН2А, 30Х2ГСН2ВМ, 30Х2Н2СВМФА, 25Х2ГНТА, 42Х2ГСНМА and their hardening modulus revealed that higher

nickel concentrations as an alloying agent, compared to chromium, correlate with greater strength properties during strain hardening. This finding can be used as a criterion for selecting the appropriate structural material.
Ключевые слова: деформационное упрочнение, модуль упрочнения, высокопрочная сталь, легирующие элементы, механические характеристики.
Key words: strain hardening, hardening modulus, high-strength steel, alloying elements, mechanical characteristics.

Введение

Высокопрочные конструкционные стали широко применяются для ответственных изделий авиационной промышленности. Одной из ключевых особенностей таких сталей является их способность к поверхностному упрочнению. Сегодня применяются различные методы поверхностного упрочнения деталей из высокопрочных сталей, включая автофретирование [1,2], дробеструйную обработку [3], шлифование [3] и др. Один из важных вопросов заключается в оценке способности к упрочнению того или иного сплава в зависимости от легирующих компонентов в химическом составе. Решение данного вопроса позволит на практике подбирать материалы с наилучшими механическими характеристиками для изготовления деталей, подвергающихся деформационному упрочнению, а также создавать материалы с оптимальным химическим составом, адаптированным под технологии упрочнения.

В рамках данного исследования требовалось оценить влияние легирующих компонентов на способность к упрочнению высокопрочных сталей. В качестве основного параметра, характеризующего способность к упрочнению, был рассмотрен модуль упрочнения. В качестве исследуемой группы высокопрочных сталей рассматривались следующие марки сталей, различающихся по химическому составу: 40ХН2СМА, 30ХГСН2А, 30Х2ГСН2ВМ, 30Х2Н2СВМФА, 25Х2ГНТА, 42Х2ГСНМА. Следует отметить, что данные марки высокопрочных сталей широко применяются в авиационной промышленности. В частности, стали 30Х2ГСН2ВМ, 42Х2ГСНМА, 25Х2ГНТА используются при изготовлении корпусов емкостей и сосудов, работающих под внутренним давлением; сталь 40ХН2СМА используется при изготовлении ответственных деталей машин и механизмов, деталей шасси, лонжеронов крыла; сталь 30ХГСН2А применяется для деталей шасси с применением поверхностного упрочнения [3].

Основная часть

Для исследуемых высокопрочных сталей 40ХН2СМА, 30ХГСН2А, 30Х2ГСН2ВМ, 30Х2Н2СВМФА, 25Х2ГНТА, 42Х2ГСНМА основным компонентом является железо. Отличие же сплавов выражается в примесях, представляющих собой дополнительные компоненты состава, в частности: никель, хром, марганец, кремний, вольфрам и др. В связи с этим целесообразно рассматривать эти дополнительные компоненты состава на способность сплава к упрочнению. В качестве характеристики сплава, характеризующего его потенциальную способность к деформационному упрочнению, будем использовать модуль упрочнения, как характеризующий предельно достижимую стойкость материала деформации до момента начала пластической за счёт его предварительного упрочнения. С целью приближенной оценки будем считать, что модуль упрочнения является постоянным на всём протяжении пластической деформации. В этом случае его значение может быть определено на основании данных о механических характеристиках сплава: пределе текучести, пределе прочности, модуле Юнга, относительном остаточном удлинении – согласно зависимости:

$$E_T = (\sigma_в - \sigma_т)/(\delta - \sigma_т/E), \quad (1)$$

где E_T – модуль упрочнения, $\sigma_в$ – предел прочности, $\sigma_т$ – предел текучести, δ – относительное остаточное удлинение, E – модуль Юнга.

На основании данных справочника [3] в табл.1 представлено массовое процентное содержание основных легирующих элементов химического состава высокопрочных сталей, а в табл. 2 – их механические характеристики.

Таблица 1

Легирующие компоненты химического состава высокопрочных сталей [3]

Сплав	Ni,%	Cr,%	Mn, %	Si, %	W,%
40ХН2СМА	2,5 – 3,0	0,8 – 1,1	0,5 – 0,8	0,7 – 1,0	
30ХГСН2А	1,4 – 1,8	0,9 – 1,2	1,0 – 1,3	0,9 – 1,2	
30Х2ГСН2ВМ	2,0 – 2,5	1,5 – 2,0	1,0 – 1,3	0,9 – 1,2	0,9 – 1,3
30Х2Н2СВМФА	1,4 – 1,8	1,6 – 2,2	0 – 0,4	0,8 – 1,2	1,2 – 1,5
25Х2ГНТА	0,9 – 1,3	1,3 – 1,7	0,8 – 1,1	0,2 – 0,5	
42Х2ГСНМА	0,5 – 0,8	1,5 – 2,0	0,75 – 1,0	0,9 – 1,2	

Таблица 2

Механические характеристики высокопрочных сталей [3]

Сплав	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	E, ГПа	δ, %
40ХН2СМА	1400	1900	195	8,5
30ХГСН2А	1400	1750	195	9
30Х2ГСН2ВМ	1300	1750	195	9
30Х2Н2СВМФА	1350	1600	200	9
25Х2ГНТА	1250	1550	195	8,5
42Х2ГСНМА	1650	1900	205	7

На основании данных табл. 1 и соотношения (1) были рассчитаны значения модуля упрочнения для исследуемых высокопрочных сталей. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчетные значения моделей упрочнения высокопрочных сталей

Сплав	40ХН2СМА	30ХГСН2А	30Х2ГСН2ВМ	30Х2Н2СВМФА	25Х2ГНТА	42Х2ГСНМА
E_T, МПа	6425	4226	5400	3003	3817	4035

В общем случае исследуемые сплавы можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести сплавы: 40ХН2СМА, 30ХГСН2А, 30Х2ГСН2ВМ, где наибольшую долю среди легирующих компонентов в химическом составе имеет никель, а ко второй группе – сплавы: 30Х2Н2СВМФА, 25Х2ГНТА, 42Х2ГСНМА, где наибольшую долю среди легирующих компонентов в химическом составе имеет хром. Первая группа сплавов имеет более высокое значение модуля упрочнения, причем отмечается корреляция модуля упрочнения от процентного содержания никеля: чем больше доля никеля в химическом составе, тем больше модуль упрочнения. В частности, наибольший модуль упрочнения отмечается у сплава 40ХН2СМА, где достигается максимальная доля никеля в составе. Для сталей 40ХН2СМА, 30Х2ГСН2ВМ вторым легирующим компонентом является хром, а для стали 30ХГСН2А – марганец. При этом стали 40ХН2СМА, 30Х2ГСН2ВМ имеют более высокий модуль упрочнения, чем 30ХГСН2А. Во второй группе сплавов, где первым легирующим компонентом состава является хром, наименьший модуль упрочнения имеет сплав 30Х2Н2СВМФА, отличием которого является наличие вольфрама среди легирующих компонентов.

Заключение. Согласно проведенному анализу механических свойств высокопрочных сталей можно сделать предварительный вывод о том, что большие концентрации никеля в качестве легирующего компонента коррелируют с более высокими значениями модуля упрочнения, в то время как преимущественные добавки хрома коррелируют с уменьшением этого показателя. Полученные данные могут быть в дальнейшем использованы при выборе марок стали при учёте их обработки методами деформационного упрочнения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-79-10135, https://rscf.ru/project/25-79-10135/.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Чепурнова Е. К., Андрианов И. К. Сравнительный анализ гидравлического автофретирования и автофретирования дорнированием // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. С. 418-421.
2. Андрианов И. К., Чепурнова Е. К. О квазистатической постановке задачи деформирования цилиндрических оболочек при автофретировании дорнированием // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : Материалы XXXI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова, Кремёнки, 19–23 мая 2025 года. Москва: ООО "ТРП", 2025. С. 12-13.
3. Авиационные материалы. Справочник в девяти томах. Том 1. Конструкционные стали. Под ред. Н.М. Скляров, Я.М. Потак. Москва : ОНТИ, 1975.429 с.

УДК 539,3
Андрианов Иван Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет.
Andrianov Ivan Konstantinovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Computer Design, Komsomolsk-na-Amure State University.
Феоктистов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Feoktistov Sergey Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University.
Буренин Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет.
Burenin Anatoly Aleksandrovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Leading Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University.

О ПРИМЕНЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АВТОФРЕТИРОВАНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК
ON THE APPLICATION OF THE DEFORMATION THEORY OF PLASTICITY IN SOLVING THE PROBLEMS OF HYDRAULIC AUTOFRETTAGE OF THICK-WALLED CYLINDRICAL SHELLS

Аннотация. Исследование посвящено вопросу применимости положений деформационной теории пластичности к исследованию напряженно-деформированного состояния толстостенных оболочек при гидравлическом автофретировании. Согласно проведенному исследованию процесс нагружения равномерным внутренним давлением толстостенной сферы является простым в условиях центрально-симметричной постановки. Нагружение толстостенного цилиндра внутренним давлением может рассматриваться как простое при условии несжимаемости материала и степенной аппроксимации кривой упрочнения, до перехода всей стенки цилиндра в область пластического деформирования. Применение постулата изотропии при простом нагружении позволяет использовать гипотезу единой кривой для описания функциональной зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций, учитывая реальные свойства материала.
Abstract. The study is devoted to the applicability of the provisions of the deformation theory of plasticity to the study of the stress-strain state of thick-walled shells during hydraulic autofrettage. According to the study, the process of loading a thick-walled sphere with uniform internal pressure is simple under the conditions of a centrally symmetric formulation. The loading of a thick-walled cylinder with internal pressure can be considered simple under the condition of incompressibility of the material and a power approximation of the hardening curve, until the entire cylinder wall enters

the plastic deformation region. The application of the isotropy postulate under simple loading allows us to use the single curve hypothesis to describe the functional dependence of stress intensity on strain intensity, taking into account the actual properties of the material.
Ключевые слова: деформационная теория пластичности, постулат изотропии, гидравлическое автофретирование, толстостенная оболочка, напряженно-деформированное состояние.
Key words: deformation theory of plasticity, postulate of isotropy, hydraulic autofrettage, thick-walled shell, stress-strain state.

Введение

Наряду с теорией пластического течения в решении прикладных задач механики деформируемого твердого тела широкое распространение получила деформационная теория пластичности, согласно которой имеет место зависимость между напряжениями и полными деформациями, в отличие от теории пластического течения, где предполагается зависимость напряжений от приращений деформаций. На сегодняшний день актуальными задачами прикладной теории пластичности и ползучести являются задачи автофретирования толстостенных оболочек, дисков, а также задачи знакопеременного нагружения. Наиболее широкое распространение сегодня получили научные исследования в области ротационного и гидравлического автофретирования [1-3].

Гидравлическое автофретирование представляет собой технологию поверхностного упрочнения толстостенных оболочек, в частности, нагружение толстостенных цилиндров, сфер внутренним давлением с последующей разгрузкой, в результате которой создается после остаточных напряжений, компенсирующих действие рабочего давления при эксплуатации [2]. Особенность таких задач обусловлена необходимостью оценки полей остаточных напряжений с учетом эффекта Баушингера. Важный вопрос при решении таких задач связан с выбором теории пластичности, наиболее подходящей для их решения. Таким образом, цель исследования заключалась в оценке применимости положений деформационной теории пластичности к исследованию напряженно-деформированного состояния толстостенных оболочек при гидравлическом автофретировании.

Основная часть

А.А. Ильюшиным был сформулирован постулат изотропии: «образ процесса нагружения в пятимерном пространстве деформаций полностью определяется только внутренней геометрией траектории деформаций и скалярными функциями – давлением, температурой, скоростью – т.е. образ процесса инвариантен относительно преобразований вращения и отражения всего образа в пятимерном пространстве деформаций» [4]. Следствием этого постулата является то, что при простом нагружении между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций существует функциональная зависимость. Данное следствие позволяет значительно упростить решение задач автофретирования за счет использования реальной диаграммы деформирования материала, полученной по результатам обработки данных натурных экспериментов на простое растяжения.

Если рассматриваться нагружение толстостенной сферы равномерным внутренним давлением в условиях центральной симметрии, то можно отметить, что процесс нагружения является простым в независимости от вида диаграммы деформирования. Важный вопрос связан с оценкой процесса нагружения толстостенных цилиндров. Согласно анализу нагружения внутренним давлением толстостенных цилиндров с закрытыми торцами из несжимаемого материала в пространстве напряжений А.А. Ильюшина процесс нагружения является простым при использовании линейно-степенной аппроксимации диаграммы деформирования; в случае толстостенных цилиндров со свободными концами процесс нагружения можно считать близким к простому до момента перехода всей стенки оболочки в область пластического деформирования [3]. Таким образом, положения деформационной теории пластичности могут быть использованы при исследовании напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров, нагруженных внутренним давлением, при условии несжимаемости материала и описании кривой упрочнения степенным законом.

В таком случае математическая постановка задачи исследования согласно положениям деформационной теории пластичности [5] будет включать в себя дифференциальные уравнения равновесия, физические соотношения в упругой и пластической областях, геометрические соотношения, условие пластичности, уравнение связи между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций, условие непрерывности напряжений и перемещений на границе между упругой и пластической областями. В результате основные соотношения будут описываться системой уравнений[4]:

$$\sigma_{ij,j}=0,\ \ \varepsilon_{ij}^{e}=\frac{1+\mu}{E}\sigma_{ij}-\frac{\mu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij},\ \ \varepsilon_{ij}^{p}=\psi s_{ij},\ \ \psi=3\varepsilon_{u}^{p}\big/\left(2\sigma_{u}\right),$$

$$\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ij}^{e}+\varepsilon_{ij}^{p};\ \ \varepsilon_{ij}=\left(u_{i,j}+u_{j,i}\right)\big/2;\ \ \delta_{ij}=\begin{cases}1, & \text{при } i=j;\\ 0, & \text{при } i\neq j\end{cases};$$

$$s_{ij}=\sigma_{ij}-\sigma_{kk}\delta_{ij}/3,\ \ \varepsilon_{u}^{p}=\sqrt{2\varepsilon_{ij}^{p}\varepsilon_{ij}^{p}/3},\ \ \sigma_{u}=\sqrt{3s_{ij}s_{ij}/2},$$

$$\sigma_{u}=\Phi\left(\varepsilon_{u}\right),\ \ 3s_{ij}s_{ij}=2\sigma_{Y}^{2},\ \sigma_{ij}n_{j}=t_{j}^{*},\ \ x_{i}\in\Gamma_{\sigma},\ u_{i}=u_{i}^{*},\ \ x_{i}\in\Gamma_{u},\ i=\overline{1,3},\ \ j=\overline{1,3}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ε_{ij}^{e} – компоненты тензора упругих деформаций, ε_{ij}^{e} – компоненты тензора пластических деформаций, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, δ – символ Кронекера, s_{ij} – компоненты девиатора напряжений, ε_{u}^{p} – интенсивность пластических деформаций, σ_{u} – интенсивность напряжений, σ_{Y} – предел текучести материала.

Заключение

Согласно проведенному исследованию вопроса применимости деформационной теории пластичности к решению задач механики гидравлического автофретирования толстостенных оболочек, следует, что при равномерном нагружении внутренним давлением толстостенной сферы процесс нагружения является простым независимо от вида диаграммы деформирования, а при нагружении равномерным внутренним давлением толстостенных цилиндров с закрытыми и свободными торцами процесс нагружения является простым при использовании условия несжимаемости материала и степенной аппроксимации кривой упрочнения до перехода всей стенки в область пластического деформирования. Применение к решению задач положений деформационной теории пластичности позволит на практике учесть реальные свойства материала при использовании экспериментальной диаграммы деформирования.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-79-10135, https://rscf.ru/project/25-79-10135/.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прокудин А.Н., Буренин А.А. Аналитическое исследование ротационного автофретирования полых цилиндров на основе общего кусочно-линейного условия пластичности // Прикладная математика и механика. 2025. Т. 89, № 6. С. 1028-1045. DOI 10.7868/S3034575825060118.
2. Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Тхет Л. Моделирование гидравлического автофретирования толстостенных цилиндрических оболочек с учетом упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2025. № 2. С. 149-178. DOI 10.31857/S1026351925020094.
3. Андрианов И.К., Феоктистов С.И. Анализ нагружения толстостенных оболочек в пространстве Ильюшина при автофретировании // Прикладная математика и механика. 2025. Т. 89, № 2. С. 295-309. DOI 10.31857/S0032823525020087.
4. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. Москва : АН СССР, 1963. 272 с.
5. Мейз Д. Теория и задачи механики сплошных сред. Москва : Мир, 1974. 319 с.

УДК 656.025
Андросов Андрей Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Androsov Andrey Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ ОВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ В ГОРОД КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
ANALYSIS OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM FOR THE DELIVERY OF VEGETABLE PRODUCTS TO THE CITY OF KOMSOMOLSK-NA-AMURE

Аннотация. В статье проведен анализ транспортной инфраструктуры, обслуживающей грузопотоки скоропортящейся продукции в направлении г. Комсомольска-на-Амуре. Рассмотрены железнодорожный, автомобильный, водный и воздушный виды транспорта, выявлены их ключевые ограничения. На основе анализа рынка логистических услуг установлен структурный дефицит современного рефрижераторного парка. Определены требования к подвижному составу исходя из транспортных характеристик груза. Результаты анализа обосновывают необходимость создания двухмаршрутной системы доставки, сочетающей автомобильный транспорт для местных сезонных поставок и железнодорожный для дальних межсезонных перевозок.
Abstract. The article analyzes the transport infrastructure that serves the cargo flows of perishable products in the direction of Komsomolsk-na-Amure. The article examines the railway, road, water, and air modes of transport and identifies their key limitations. Based on the analysis of the logistics services market, a structural deficit of modern refrigerated fleet has been identified. The requirements for rolling stock have been determined based on the transport characteristics of the cargo. The results of the analysis justify the need to create a two-route delivery system that combines road transport for local seasonal deliveries and rail transport for long-distance inter-seasonal transportation.
Ключевые слова: транспортная инфраструктура, скоропортящиеся грузы, логистика, рефрижераторный транспорт, сезонность поставок.
Key words: transport infrastructure, perishable goods, logistics, refrigerated transport, seasonality of supplies.

Введение

Обеспечение населения свежей овощной продукцией является одной из ключевых задач продовольственной безопасности региона. Для города Комсомольска-на-Амуре, крупного промышленного центра Хабаровского края с населением около 240 тыс. человек, эта проблема приобретает особую актуальность в силу его удаленности от основных сельскохозяйственных регионов и сложных климатических условий [1]. Анализ современного состояния транспортной системы и рынка логистических услуг, обслуживающих грузопотоки в направлении города, необходим для выявления "узких мест" и разработки эффективных решений по организации доставки скоропортящихся грузов. Целью данной работы является анализ транспортной инфраструктуры региона и определение ключевых проблем, влияющих на надежность поставок и сохранность овощной продукции, определение основных поставщиков и доли их продукции в общем объеме в разные периоды года.

Транспортная инфраструктура региона и рынок логистических услуг

Важной особенностью рынка овощной продукции в городе является резко выраженная сезонность. В летний период овощная продукция поступает на прилавки от местных производителей и производителей из южных районов Хабаровского края. В остальное время

(ноябрь - июнь) обеспечение овощами происходит за счет дальних поставок из Китая и других регионов России. Транспортная система, обеспечивающая доставку грузов в город Комсомольск-на-Амуре, включает четыре вида транспорта: железнодорожный, автомобильный, водный и воздушный. Анализ их состояния и роли в логистике поставок овощей представлен в табл. 1.

Таблица 1

Анализ транспортной инфраструктуры

Вид транспорта	Ключевые артерии / Узлы	Роль в логистике овощей	Основные ограничения
Железнодорожный	Участок Транссиба: Волочаевка II – Комсомольск-на-Амуре. Ст. Комсомольск-Сортировочный.	Основной транспорт для массовых межрегиональных поставок (от 20 т). Перевозка рефконтейнеров.	Жесткая привязка к графику движения. Дефицит специализированного рефрижераторного парка в пик сезона (30-40%).
Автомобильный	Федеральные трассы: А-376 «Хабаровск – Комсомольск-на-Амуре – Лидога», А-370 «Уссури».	Ключевой для местных поставок (до 400 км) и доставки «последней мили»	Высокая зависимость от погоды (до 45 дней с туманом, 60 дней с гололедом в году). Повышенный износ техники.
Водный (речной)	Река Амур. Комсомольский речной порт.	Потенциальный вид транспорта для массовых поставок в навигационный период.	Временно не действует, требуется восстановление портовой инфраструктуры.
Воздушный	Аэропорт «Хурба».	Эксклюзивный транспорт для срочных грузов малого объема.	Полностью не работает с 2023 года, требуется реконструкция аэропорта.

По информации из табл. 1 видно, что в настоящий момент доставка грузов в город Комсомольск-на-Амуре может осуществляться только железнодорожным или автомобильным транспортом. Критически важным элементом снабжения города является участок автомобильной трассы А-376 «Хабаровск–Комсомольск-на-Амуре». По оценкам Гидрометцентра на данном участке за год может фиксироваться до 45 туманных дней и до 60 дней с обледенением дорожного покрытия, в связи с этим движение на трассе перекрывается до нескольких раз за год и приводит к увеличению сроков доставки любых грузов.

В настоящее время на рынке логистических услуг железнодорожные перевозки контролируются такими крупными компаниями как ПАО «ТрансКонтейнер» и ОАО «РЖД-Логистика», а автомобильные перевозки осуществляются как региональными, так и федеральными компаниями. Основной проблемой в данных категориях перевозок является нехватка современного рефрижераторного парка. Доля современных полуприцепов-рефрижераторов с цифровым управлением и возможностью удаленного контроля параметров перевозки составляет не более 20 % [2]. Проблемой железнодорожной перевозки является ограниченное наличие рефрижераторных контейнеров и связанное с этим сезонное (декабрь-март) повышение тарифов, в данный период рост тарифов за аренду рефрижераторного контейнера может достигать до 50%.

Основным моментом в организации эффективной логистики поставок любых грузов является понимание структуры затрат. С учетом всех транспортных характеристик овощных грузов, условий хранения [3] и перевозки в работе рассмотрены транспортные схемы, обеспечивающие необходимую сохранность груза и бесперебойное снабжение города Комсомольска-на-Амуре. На рис. 1 представлены диаграммы со структурой себестоимости перевозки одной паллеты в процентном соотношении по схемам доставки: маршрут №1 – груз перевозится автомобильным транспортом по технологии «от двери до двери»; маршрут №2 – перевозка осуществляется магистральным железнодорожным транспортом до железнодо-

рожной станции и дополняется конечной доставкой автотранспортом до грузополучателя. Анализ структуры показывает, что основную долю затрат составляет непосредственно сама перевозка груза: маршрут №1 – 90,5 % автомобильная перевозка; маршрут №2 – 92,4 % железнодорожно-автомобильная перевозка. Можно сделать вывод, что основным направлением снижения затрат на перевозку груза остается оптимизация самой перевозки, так как себестоимость грузовых операций и страхования являются относительно незначительными долями в общей стоимости и определяются типовыми технологическими процессами и тарифами страхования. Если для автомобильной перевозки еще возможно отыскать пути снижения затрат, то для железнодорожной – их нет.

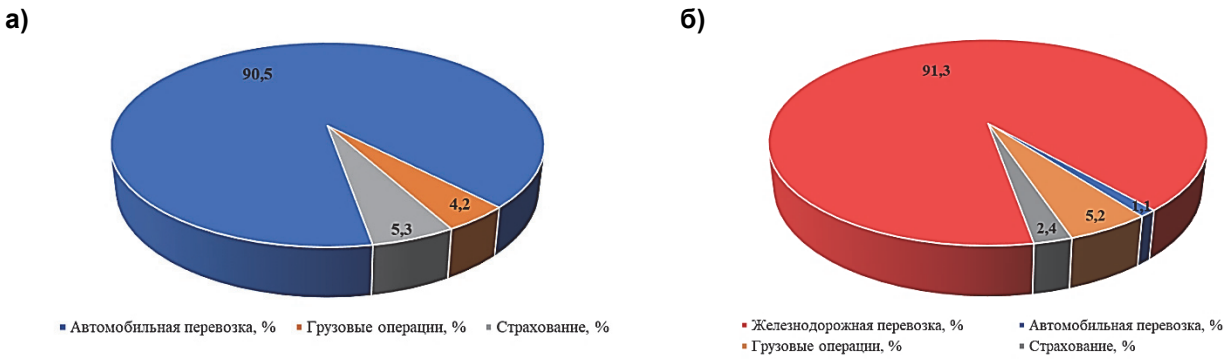


Рис. 1. Структура себестоимости доставки одной паллеты
а) автомобильная перевозка; б) железнодорожно-автомобильная перевозка

Заключение

По результатам исследования можно сделать вывод, что в процессе создания транспортно-логистической системы по доставке овощей в город Комсомольск-на-Амуре необходимо учитывать несколько важных моментов: у работающих в данном регионе перевозчиков доля современной рефрижераторной техники не превышает 20 %; один из основных маршрутов – автодорога Хабаровск–Комсомольск-на-Амуре в зимний период сильно зависит от погодных условий; в длительный период года (ноябрь - июнь) значительно уменьшается доля местной продукции (объем доходит до 5-10 % от общего количества) и возрастает объем грузов от удаленных поставщиков. Указанные особенности доставки увеличивают вероятность порчи груза при транспортировке и совместно с сезонным увеличением тарифов влияют на стоимость перевозки овощной продукции и в конечном итоге на цену овощей в розничной торговле.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Предварительная оценка численности населения Хабаровского края на начало 2025 года. Опубл.: 03.02.2025. // Хабаровскстат. URL: https://27.rosstat.gov.ru/news/ document/253685 (дата обращения: 10.03.2026).

2. Российский рынок рефрижераторов в 2025 году. Лёд тронулся? Опубл.: 22.10.2019. // Грузовой.ру. URL: https://gruzovoy.ru/news/industry/3076_rossiiskii_rinok_refrijeratorov_v_2025_ gody_lyod_ tronylsya.html (дата обращения: 10.03.2026).

3. ГОСТ Р 50419-92 (ИСО 2169-81). Фрукты и овощи. Физические условия хранения в охлаждаемых складских помещениях. Определения понятий и измерения. Введ. 1994-01-01. Москва: Издательство стандартов, 1993. 9 с.

УДК 621.18
Богатырёв Александр Валерьевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bogatyrev Alexander Valerievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Хвостиков Александр Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Alexander Stanislavovich Khvostikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department "Thermal power plants", Komsomolsk-na-Amure State University

ВНЕДРЕНИЕ ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТЕ БКЗ-210-140Ф
INTRODUCTION OF VORTEX COAL FURNACE IN THE BKZ-210-140F BOILER UNIT

Аннотация. Цель работы – анализ конструктивных и режимных особенностей форсированного высокотемпературного и низкотемпературного вихревого сжигания угольного топлива, а также обоснование выбора метода реконструкции котлоагрегата БКЗ-210-140Ф с установкой тангенциальных горелок. Предмет изучения – вихревые технологии сжигания угля и их применение для повышения эффективности и экологической безопасности котельных установок. Результаты работы: в статье рассмотрены основные вихревые технологии сжигания угольного топлива. Низкотемпературная вихревая технология обеспечивает снижение максимальной температуры на 100–300 °С, сокращение выбросов оксидов азота и серы до 65 %, рост КПД котла с 79,6 % до 91 % (на примере Кировской ТЭЦ-4). Выделены преимущества метода: снижение температуры на выходе из топки, улучшение экологических показателей, возможность работы на дроблёном топливе, снижение затрат на собственные нужды и эрозионный износ. На основе анализа для реконструкции котла БКЗ-210-140Ф выбран метод установки тангенциальных горелок по углам топочной камеры как наиболее быстро реализуемый.
Abstract. The objective of the work is to analyze the design and operational features of forced high-temperature and low-temperature vortex combustion of coal fuel, as well as to justify the choice of reconstruction method for the BKZ-210-140F boiler unit with the installation of tangential burners. The subject of the study is vortex coal combustion technologies and their application to improve the efficiency and environmental safety of boiler plants. Results of the work: the article considers the main vortex coal combustion technologies. Low-temperature vortex technology ensures a decrease in the maximum temperature by 100–300 °C, a reduction in nitrogen and sulfur oxide emissions by up to 65%, an increase in boiler efficiency from 79.6% to 91% (using the Kirov CHPP-4 as an example). The following advantages of the method are highlighted: a decrease in the temperature at the furnace outlet, improved environmental performance, the possibility of operating on crushed fuel, a decrease in auxiliary costs and erosive wear. Based on the analysis for the reconstruction of the BKZ-210-140F boiler, the method of installing tangential burners at the corners of the combustion chamber was chosen as the most quickly implemented.
Ключевые слова: котел, уголь, горелки, вихревое низкоэмиссионное сжигание, выбросы.
Key words: boiler, coal, burners, vortex low-emission combustion, emissions.

Введение

Эффективность работы тепловых электрических станций зависит, в том числе, от эффективности работы паровых котельных агрегатов. Одна из проблем в эксплуатации парогенераторов заключается в работе на непроектных видах топлива. Однако, особенностью работы электрических станций Дальнего Востока является широкая номенклатура поставляемого угольного топлива. Под каждый вид угля требуется модернизация котла для более полного использования теплоты сгорания. Традиционная схема прямоточно-пылеугольного факела характеризуется: высокими температурными пиками в зоне горения, повышенной эмиссией оксидов азота (NO_x), склонностью к шлакованию поверхностей нагрева, образованием оплавленных сферических частиц золы.

Одним из наиболее эффективных методов интенсификации процесса горения с использованием нестандартных видов топлива является использование технологии вихревого сжигания топлива. Вихревая технология изменяет аэродинамику – за счет закрутки потока (горизонтальный вихрь) и ступенчатого подвода воздуха создается низкотемпературный вихревой факел с увеличенным временем пребывания топлива в активной зоне. Сжигание распыленного угля в вихревой камере позволяет, сохраняя размеры камеры сгорания, сжигать угольное топливо с более высокой теплотворной способностью. При этом решаются задачи повышения теплонапряженности топочного устройства, улучшая при этом экономические и экологические показатели. Тангенциальный подвод аэросмеси осуществляют в футерованную вихревую камеру, содержащую диффузорную часть и камеру охлаждения с двухсветными экранами и ширмами.

Цель настоящей работы – анализ и обобщение конструктивных и режимных особенностей форсированного высокотемпературного и низкотемпературного вихревого сжигания угольного топлива, а также оценка их эффективности на основе известных технических решений и результатов внедрения.

Основная часть

Наиболее перспективной является конструкцией, разработанная Н.В. Головановым и модифицированная затем в ИТ СО РАН, отличающаяся дополнительным тангенциальным дутьем вторичным воздухом через горелку в нижней точке периметра камеры горения, что расширяет способы управления аэродинамической структурой потока и позволяет реализовать ступенчатое сжигание с недостатком окислителя в вихревом факеле и последующим дожиганием.

Наряду с форсированными режимами значительное распространение получила низкотемпературная вихревая технология, разработанная В.В. Померанцевым. Она основана на аэродинамической организации потоков с перемещением грубоизмельченного угля в нижнюю часть топки, а воздуха для дожигания — в верхнюю. Создание двух зон горения (вихревой и прямоточной) позволяет выровнять тепловые потоки, снизить максимальную температуру на 100-300 °С и, как следствие, уменьшить образование оксидов азота и серы. Успешное внедрение НТВ-технологии на Кировской ТЭЦ-4 в 2009 году продемонстрировало рост КПД котла с 79,6 % до 91 %, сокращение выбросов NO_x и SO_x на 65 % и увеличение мощности на 20 %.

Практическим способом создания вихревого сжигания является также тангенциальная установка горелок несколькими ярусами по касательной к условной окружности. Такая схема повышает КПД топочной камеры, обеспечивает длительную работу на номинале, снижает механический недожог и шлакование экранов. Дальнейшее развитие этих принципов нашло отражение в низкоэмиссионном вихревом сжигании с вихревыми горелками, где за счет снижения избытка воздуха на основных горелках, организации третичного дутья и модернизации самих горелок (изменение крутки и скоростного режима, установка турбулизаторов) достигается как вертикальная, так и горизонтальная стадийность горения. Это позволяет обеспечить стабильную работу горелок с развитой зоной обратных токов и восстановлением оксидов азота в бескислородной приосевой зоне при сохранении требуемого КПД котла.

Низкоэмиссионное вихревое сжигание с тангенциальным расположением горелок синтезирует проверенную временем тангенциальную компоновку с современными принципами вихревой аэродинамики и ступенчатого сжигания. В классической тангенциальной топке горелки расположены по касательной к условной окружности, создавая единый вертикальный вихрь. В низкоэмиссионном вихревом сжигании организуется двухуровневое взаимодействие потоков. Нижняя часть котла (холодная воронка) является зоной минимальных температур и часто служит местом провала крупных частиц. Для исключения наблюдаемого явления за счет нижнего дутья эта зона становится активным реакционным объемом, что увеличивает теплонапряжение нижних экранов и снижает потери с механическим недожогом. Аэродинамика вихревой зоны с тангенциальным расположением горелок и нижним дутьем представлена на рисунке 1.

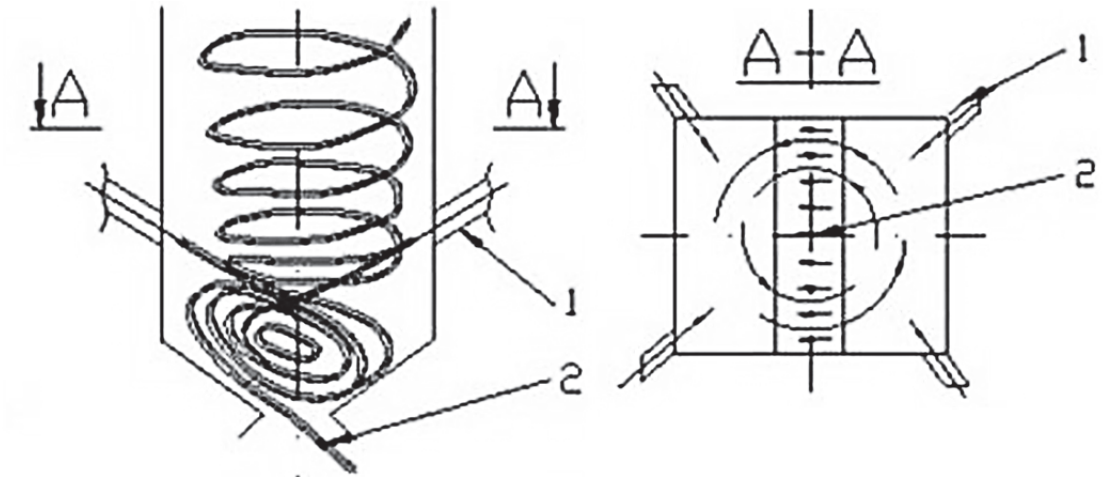


Рис. 1. Схема аэродинамики вихревой зоны низкоэмиссионного вихревое сжигания
1 – тангенциальные горелки, 2 – нижнее дутьё

Низкоэмиссионное сжигание разделяет топку на две зоны. Взаимодействие струй нижнего дутья, подаваемого через зону холодной воронки с основными горелочными струями создает пару сил. Это приводит к формированию вихрей с горизонтальной осью вращения. Взаимодействие горелочных струй между собой создает классический вихрь с вертикальной осью вращения. В нижней зоне топки происходит подготовка частиц к горению: сушка, выход летучих, терморазмол. После уменьшения размера и веса частично выгоревшее топливо попадает в среднюю зону, где происходит их сгорание в вихревой зоне с вертикальной осью вращения, созданной взаимодействием горелочных струй между собой.

Метод низкоэмиссионного вихревого сжигания с тангенциальным расположением горелок представляет собой прагматичное решение для глубокой модернизации существующих энергоблоков. Вместо кардинальной замены топочной камеры использует существующую компоновку, но меняют аэродинамическую структуру за счет организации нижнего дутья и модернизации горелок.

Снижение себестоимости производства тепла и электроэнергии достигается за счет отказа от дорогостоящего помола топлива и снижения расходов на собственные нужды. Повышение экологичности обеспечивается подавлением NO_x на ранних стадиях благодаря стадийности и бескислородным рециркуляционным зонам. Повышение надежности связано с уменьшением шлакования, провала топлива и снижением эрозионного износа конвективных поверхностей за счет угрубления золы. Эта технология является ярким примером перехода от "пылеугольного" сжигания к "вихревому" сжиганию угля укрупненной фракции, что соответствует мировым трендам повышения гибкости угольной генерации и требований к экологической безопасности.

Заключение

На основании проведенного литературного анализа технологических и конструктивных методов перевода котлоагрегата БКЗ-210-140Ф на вихревое сжигание с учётом достоинств всех перечисленных методов был выбран метод реконструкции топочной камеры с установкой в углах тангенциальных горелок. Данный метод позволит в относительно короткий срок, в отличие от остальных методов, реконструировать котёл и ввести его в эксплуатацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Штым К.А. Соловьева Т.А. Модернизация котлов КВГМ-100-150 на циклонно-вихревое сжигание газа // Теплоэнергетика. 2015. №3. С. 48-50.

2. Карпенко Ю.Е., Мессерле В.Е., Карпенко Е.И., Басаргин А.П. Плазменно-циклонная технология сжигания твердых топлив // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 68-73.

УДК 629.123
Бондаренко Юлия Валерьевна, старший преподаватель, Дальневосточный федеральный университет
Bondarenko Yulia Valerievna, Senior Lecturer, Far Eastern Federal University
Бондаренко София Валерьевна, магистр, Дальневосточный федеральный университет
Bondarenko Sofia Valerievna, Master's degree, Far Eastern Federal University
Бугаев Виктор Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
Bugayev Viktor Grigorievich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Far Eastern Federal University

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СУДОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРАБОЛОВНОГО СУДНА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ФОРМЫ БУЛЬБОВОЙ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ
A METHOD FOR CONSTRUCTING THE SHIP'S SURFACE OF A CRAB CATCHING VESSEL WITH SUBSEQUENT OPTIMIZATION OF THE SHAPE OF THE BULB BOW END

Аннотация. В последние годы повышенный научный интерес направлен на изучение промысловых судов различного назначения, особенно к судам краболовам, осуществляющим промысел в Дальневосточном морском бассейне. Отличительные особенности ведения промысла в Дальневосточном бассейне – это сложные метеорологические условия, необходимость эксплуатации судов как на чистой воде, так и во льдах. В этой связи перед проектировщиками стоит достаточна сложная задача, смоделировать такую форму корпуса судна, при которой достигаются наилучшие условия эксплуатации судна при плавании на чистой воде и во льдах.

Достаточно простым и эффективным способом снижения волнового сопротивления и повышение мореходных качеств на тихой воде является использование носовых бульбов. Однако во льдах это может привести к обратным результатам и повышенной повреждаемости носовой оконечности при ударах о лёд. Правила РМРС разрешено применять бульбообразные обводы в носовой оконечности на судах с категорией ледовых усилений корпуса до Arc7 включительно.

Abstract. In recent years, increased scientific interest has been focused on the study of various types of fishing vessels, particularly crab vessels operating in the Far East basin. Fishing in the Far East basin is characterized by challenging meteorological conditions and the need to operate vessels in both open water and ice. Therefore, designers face the challenging task of designing a vessel hull shape that achieves optimal operating conditions in both open water and ice.

The use of bow bulbs is a relatively simple and effective way to reduce wave drag and improve seakeeping in calm water. However, in ice, this can be counterproductive and increase damage to the bow when striking ice. RMRS rules permit the use of bulbous bow contours on vessels with hull ice strengthening categories up to and including Arc7.

Ключевые слова: оптимизация, форма корпуса, краболовное судно, бульбообразный нос, лед.
Key words: optimization, hull shape, crab boat, bulbous bow, ice.

Введение

Несмотря на недостаточную изученность применения на судах ледового плавания носовых бульбов их использование становится достаточно частым явлением. Во-первых, это приводит к благоприятной интерференции волн и снижению волнового сопротивления на чистой воде, во-вторых, к взламываю льда снизу ледовым бульбом (режущей кромкой) и притапливанию бортом, что приводит некоторому скручиванию (сложному изгибу) крупнобитых льдов и быстрому их разрушению. Пример удара бульбовой носовой оконечности о лед представлен на рис. 1.

Авторы в данной работе предусматривают поиск компромиссного решения, которое заключается в следующем: необходимо смоделировать такую форму бульбовой носовой оконечности корпуса краболовного судна, при которой достигаются наилучшие условия при движении судна во льдах и в чистой воде



Рис. 1. Удар бульбовой носовой оконечности о лед

Постановка задачи исследования

Цель исследования – с помощью численных методов выполнить оптимизацию формы корпуса краболовного судна, при которой выполняются требования, предъявляемые к элементам поверхности, с целью обеспечения его эффективности и безопасности плавания.

В данной работе общая задача по оптимизации формы корпуса промыслового судна разделяется на две подзадачи, в силу большого количества параметров и противоречивого характера их влияния на сопротивление, а также сложности анализа результатов исследований.

Задача 1: необходимо определить размеры X_k (L, B, T, $x_{шнс}$) корпуса судна, при которых водоизмещение (D) имеет заданное (расчетное) значение и выполняются требования, предъявляемые к элементам поверхности судна (без учета сопротивления воды). Цель (критерий): искомое значение водоизмещения по ГВЛ.

Задача 2: посвящена выбору из совокупности допустимых вариантов наилучших с точки зрения ходкости, с одновременной оптимизацией формы носовой (формы бульба) и кормовой оконечностей.

Решение задач осуществляется с помощью программного обеспечения Simulation и Flow Simulation SolidWorks.

Описание формы корпуса краболовного судна

Судно с удлиненным баком, бульбовой носовой оконечностью и со скругленной ложкообразной кормовой оконечностью. В средней части судна расположена цилиндрическая вставка с достаточно протяженным плоским бортом и днищем. При проектировании формы корпуса судна выбор был сделан в пользу вертикального борта и днища с нулевой килеватостью, с целью исключить «затирание» льдин о корпус судна и кромку канала, что обычно приводит к снижению скорости судна.

В процессе моделирования, изменяя угол режущей кромки бульба (β), угол наклона КВЛ к ДП (α), длину режущей кромки бульба (l), ширину бульба на НП (b), носовая оконечность и бульб могут принимать различную форму, характерную как для плавания на чистой воде (при числах Фруда 0,15÷0,30), так и во льдах. 3D-модель поверхности корпуса судна и основные элементы 3D-модели представлены на рис. 2 и в табл. 1.

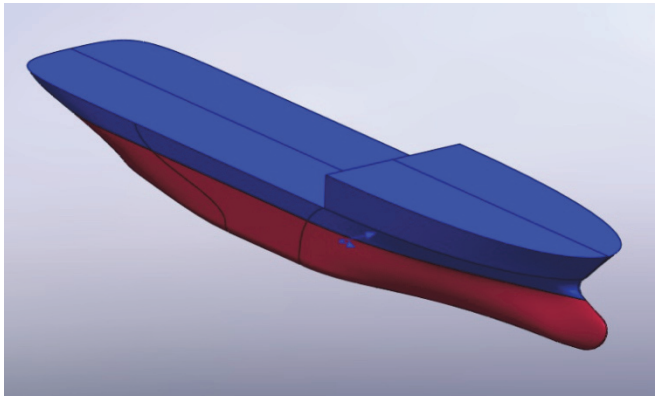


Рис. 2. 3D-модель поверхности корпуса судна

Таблица 1

Основные элементы 3D-модели судна

Элементы судна	Значение
Длина между ПП L, м	72,5
Ширина по КВЛ B, м	15,5
Осадка по КВЛ T, м	4,9
Высота борта H, м	6,8
Вместимость, м3	7000
Водоизмещение, т	3800
Скорость, уз	15,0
Длина режущей кромки бульба l, м	2,0
Угол наклона режущей кромки бульба β, град	30
Ширина бульба на НП b, м	2,5
Угол наклона КВЛ к ДП α, град	25

Результаты

В результате расчетов были выявлены следующие общие зависимости волнового сопротивления от размеров и расположения бульба: наибольшее положительное влияние бульб имеет при числах Фруда 0,3 или 0,5 (и при соответствующих оптимальных положениях по длине), однако и при числах Фруда более 0,5 заметно некоторое положительное влияние; с ростом относительной скорости желательно увеличение объема бульба и его смещение тем дальше в нос, чем больше скорость.

Уменьшение угла наклона режущей кромки (до 25 град.) и удлинение режущей кромки (до 2,5 м) приводит к приближению бульба к поверхности воды, и тем самым к снижению остаточного сопротивления, но при этом использование такого бульба во льдах весьма затруднительно, поскольку он будет не раздвигать (разрушать) лед, а упираться в него, использования такого варианта явно ограничена условиями влияния на волнении.

Заключение

Данные исследования являются неокончательными, в настоящее время авторы активно продолжают вести данную работу. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной методики параметрического построения судовой поверхности краболовного судна в среде САПР и последующей численной оценки влияния геометрических параметров бульбовой носовой оконечности на волновое сопротивление и условия эксплуатации во льдах и на чистой воде. В дальнейшем планируется расширить диапазон варьируемых параметров бульба и носовых обводов корпуса судна, выполнить комплексную многокритериальную оптимизацию с учетом энергетической эффективности и ледовой прочности корпуса, а также сопоставить численные расчеты с модельными и, по возможности, натурными экспериментами для уточнения выбранных проектных решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бугаев В.Г., Дам В.Т., Бондаренко Ю.В. Оптимизация формы корпуса рыболовных судов // Вестник ИШ ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 35-45.

2. Бугаев, В.Г., Славгородская Д.В. Анализ прочности корпуса судна при ударе об лед // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1(41). С. 62-68.

3. Ковров А. С., Новиков В. В. Расчетный анализ давлений на корпус танкера при ударах о льдину // Вестник ИШ ДВФУ. 2020. № 4(45). С. 3-15.

4. Лобанов В.А. Оценка безопасных условий ледового плавания судов с применением CAE-систем: автореф. дис. ... доктор. техн. наук. Нижний Новгород, 2014. 42 с.

5. Правила классификации и постройки морских судов: Ч. II. Корпус. (Версия: 01.01.2026) // Российский морской регистр судоходства.. URL: https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru (дата обращения: 29.03.2026).

УДК 629.5.023:004.92
Бурский Степан Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bursky Stepan Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бурменский Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Burmensky Andrey Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НОСОВОГО БЛОКА СУДНА В CAD-СИСТЕМЕ КОМПАС-3D
MODELING OF SHIP BOW HULL STRUCTURES IN THE KOMPAS-3D CAD SYSTEM

Аннотация. В настоящее время в отечественной судостроительной промышленности происходит постепенный переход на отечественные PLM-решения. Одной из отечественной IT-компании, которая развивает судостроительные инструменты для разработки цифровых моделей судов, является компания АСКОН. В статье рассматривается процесс моделирования сложной объемной корпусной секции судна, а именно носового блока в CAD-системе Компас-3D.
Abstract. The domestic shipbuilding industry is currently undergoing a gradual transition to domestic PLM solutions. One Russian IT company developing shipbuilding tools for digital ship modeling is ASCON. This article examines the process of modeling a complex three-dimensional vessel hull section, specifically the bow block, using the Kompas-3D CAD system.
Ключевые слова: CAD-система, компьютерное моделирование, конструкция корпуса, 3D-модель.
Key words: CAD system, computer modeling, hull design, 3D model.

Введение

В настоящее время в России из-за введенных санкций, многие отечественные предприятия испытывают трудности в экономическом, ресурсном аспекте, а также можно отдельно выделить программное обеспечение.

Многие предприятия судостроительной промышленности используют импортное программное обеспечение, такие как AutoCAD, CADMATIC, AVEVA, Tribon, Foran. Президент России поручил правительству перевести предприятия отечественной промышленности, в том числе предприятия «ОСК» на отечественное программное обеспечение.

В рамках перехода на отечественное программное обеспечение, ведущая IT-компания АСКОН с 2019, совместно с другими компаниями консорциума «РазвИТие» начала разработку тяжелой PLM-системы в области судостроения. для CAD-системы Компас-3D были разработаны дополнительный инструментарий моделирования металлоконструкций, который позволяет автоматизировать многие процессы по компьютерному моделированию корпусных конструкций [1,2].

В данной работе рассмотрен пример применения CAD-системы Компас-3D для моделирования сложной объемной корпусной секции.

Исходные данные для моделирования

В качестве примера объекта моделирования был выбран носовой блок корпуса танкера-химовоза дедвейтом 13000 т [3]. Носовой корпусной блок отличается своей сложностью, как в части сложности формы корпуса (наличие бульба), так и в части насыщения достаточно небольшого объема корпусными конструктивными элементами. Исходными данными проекта послужили теоретический чертеж, конструктивные чертежи носовой части и растяжка обшивки (рис. 1-2).

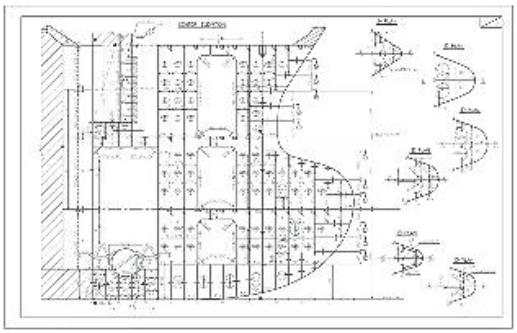


Рис. 1. Пример конструктивного чертежа

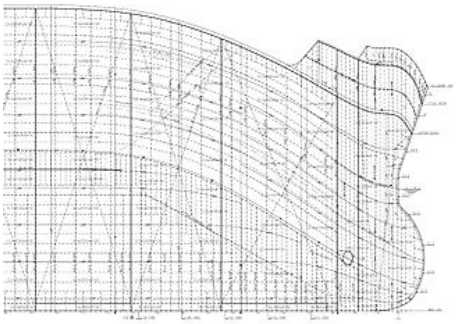


Рис. 2. Чертеж растяжки обшивки

Моделирование судовой поверхности

Для моделирования судовой поверхности носового блока предварительно по теоретическому чертежу была построена 3D модель корпуса в системе FreeShip (рис. 3). После чего поверхность была импортирована в формат IGES в CAD-систему Компас-3D (рис. 4). Данная судовая поверхность является базой для моделирования листов обшивки корпуса и определяет форму конструктивных элементов, примыкающих к ней.

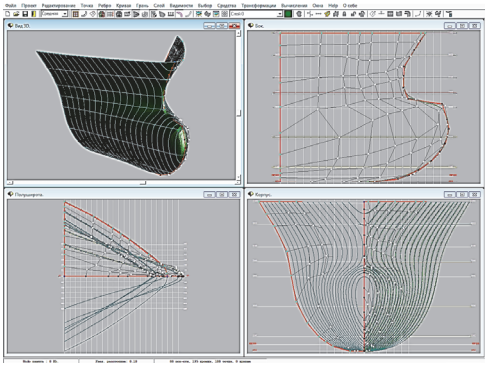


Рис. 3. Моделирование поверхности в системе FreeShip

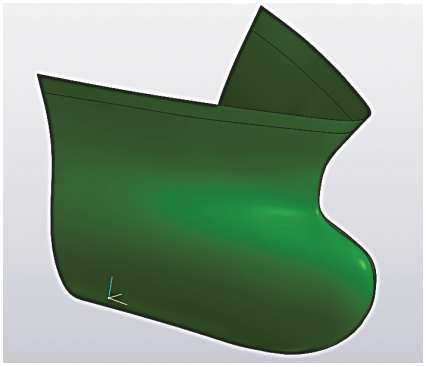


Рис. 4. Поверхность, импортированная в Компас-3D в формате IGES

Моделирование шпангоутов, бортовых стрингеров и бракет

Для моделирования конструктивных элементов предварительно необходимо получить сечение формы конструктивного элемента. Данный этап включает в себя создание вспомогательных плоскостей, которые являются теоретическими плоскостями продольного и поперечного набора. С помощью команды «смещенная плоскость», создается вспомогательные плоскости шпангоутов и ватерлиний. Для получения линии шпангоута или ватерлиний применяется команда «кривая пересечения». В результате получаются линии сечений (рис.5). Данные линии являются опорными контурами, на основе которых проводится моделирование конструктивных элементов, расположенных в плоскости рассматриваемого сечения (рис. 6).

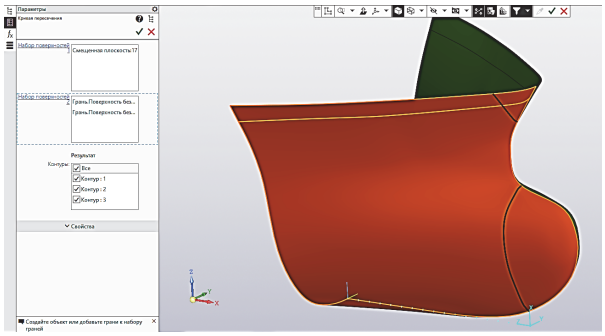


Рис. 5. Формирование сечения шпангоута

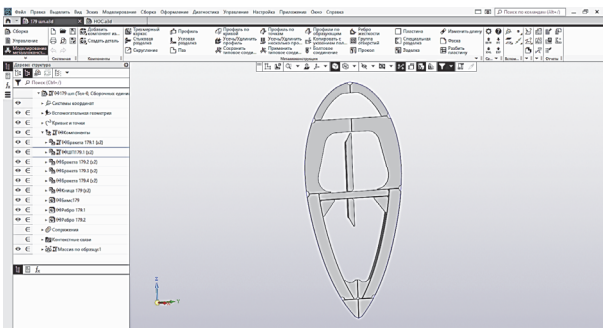


Рис. 6. Пример конструкции шпангоута

Для построения отдельных деталей используются команды «пластина», «профиль по траектории», «поясок» и другие. Моделирование конструктивных узлов может производиться как в виде отдельных деталей, так и в виде отдельных подсборок, например шпангоутные рамы, которые состоят из множества деталей расположенных в плоскости шпангоута (бракет, ребер жесткости и подкрепляющих книц). Все необходимые вырезы в пластинах бракет или стенках балок выполняются стандартными способами твердотельного моделирования.

Моделирование переборок, палуб и платформ

Переборки (рис. 7), палубы и платформы (рис. 8) представляют собой плоскостные полотнища большой площади, состоящие из отдельных листов с конструктивными и технологическими вырезами и подкрепленные ребрами жесткости. Отличием их между собой заключается в их ориентации: переборки располагаются в поперечных плоскостях, а палубы в горизонтальных плоскостях ватерлиний. Последовательность их моделирования аналогична моделированию шпангоутных рам, но обязательно оформляют в виде отдельных сборок.

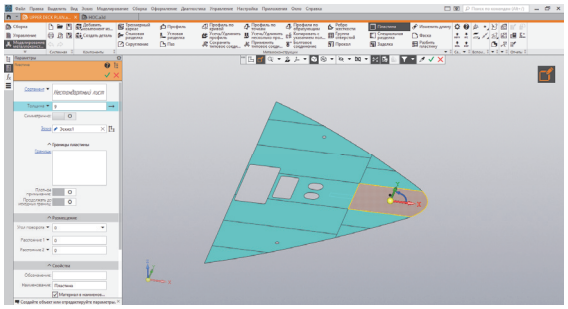


Рис. 7. Верхняя палуба

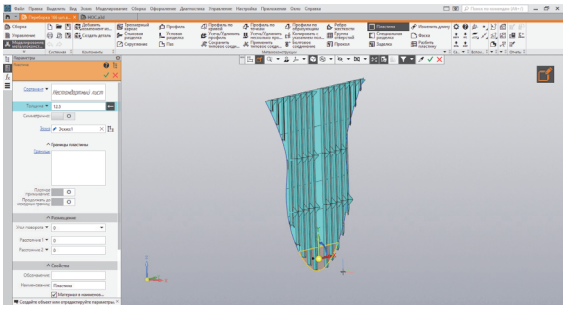


Рис. 8. Пример конструкции шпангоута

Моделирование обшивки корпуса

Обшивка судна формируется из листов разной толщины, в зависимости от района ее расположения. На разбивку обшивки на листы также оказывает влияние сложности формы корпуса и технологические возможности завода строителя по гибке листов. Для моделирования отдельных листов обшивки используется команда «пластина по грани». Для этого, на основе чертежа растяжки обшивки (см. рис. 2), производится разметка поверхности корпуса и ее разбиение на отдельные грани командой «разбиение поверхности» (рис. 9). В этом случае рекомендуется использовать «фантом» поверхности корпуса. На последнем этапе задаем толщину листам наружной обшивки с помощью команды «пластина по грани» (рис. 10).

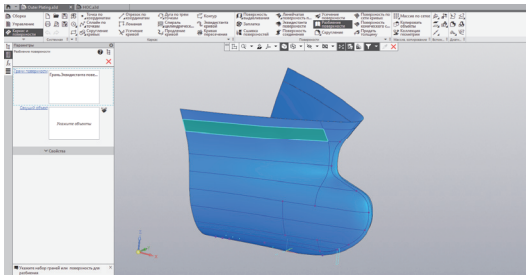


Рис. 9. Разбиение поверхности на грани

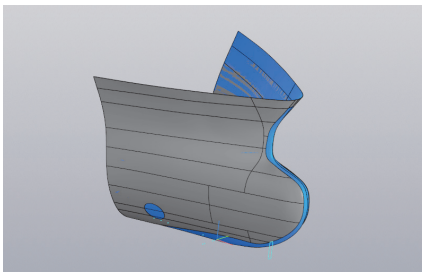


Рис. 10. Результат моделирования обшивки

Формирование корпусного блока

На последнем этапе выполняется сборка всего корпусного блока из отдельных подсекций и деталей. А также выполняется моделирование «по месту» отдельных подкрепляющих конструктивных элементов (рис. 11-12).

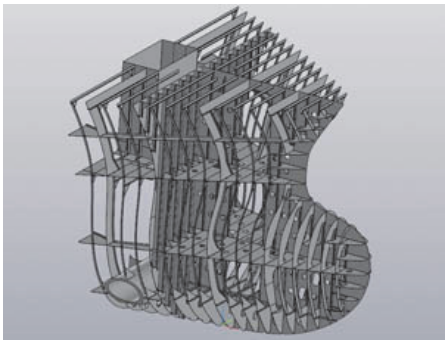


Рис. 11. Корпусной блок без обшивки

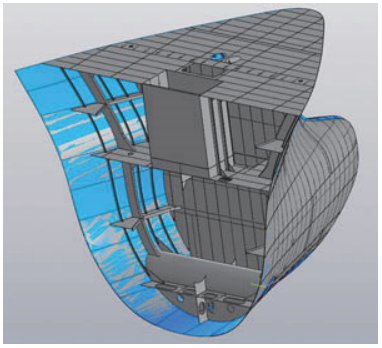


Рис. 12. Корпусной блок «в сборе»

Разработанная 3D модель корпусного блока, позволяет определить ее массу и центр тяжести. Для этого следует воспользоваться командой «МЦХ модели». После вызова команды значения массы, площади поверхности, объема модели и координаты центра масс отображаются в отдельном информационном окне (рис. 13).

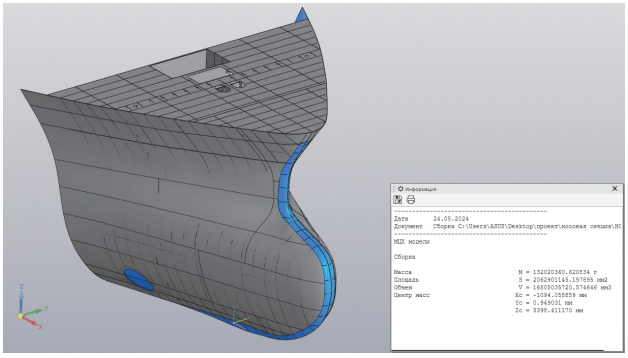


Рис. 13. Расчет МЦХ корпусного блока

Заключение

Разработка 3D модели сложного корпусного блока показала, что с помощью инструментов моделирования CAD-системы Компас-3D можно эффективно разрабатывать цифровую модель корпуса судна.

Кроме того, было показано, что Компас достаточно эффективно справляется с работой с импортированными поверхностями, что открывает широкие возможности по разработке параметрических моделей корпусных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров, А.С. Новые инструменты консорциума "РазвИТие" для задач судостроения // Судостроение. 2020. № 6(853). С. 41-43.

2. Даманский Д.В., Бурменский А.Д. Практический опыт использования новых инструментов моделирования судовых конструкций в КОМПАС-3D // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. Ч 1. С. 232-235.

3. Мерзликина В.С., Гуменюк Н.С. Архитектурно-конструктивные особенности танкера-химовоза «Autumn» // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 г. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. Ч 2. С. 231-232.

УДК 629.5:656.6
Бурский Степан Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bursky Stepan Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОБЗОР ПРОЕКТОВ СУДОВ ДЛЯ РЕКИ АМУР
OVERVIEW OF SHIP PROJECTS FOR THE AMUR RIVER

Аннотация. В статье выполнен обзор бывших в эксплуатации судов на реке Амур, оценено текущее состояние речного пассажирского флота. Сформулированы предложения по развитию флота речных пассажирских судов с целью повышения транспортной доступности в региональной транспортной системе. Результаты исследования показывают возможность развития речных пассажирских перевозок за счет внедрения предложенных новых проектов пассажирских судов.
Abstract. The article provides an overview of the former vessels on the Amur River and assesses the current state of the river passenger fleet. The authors formulate proposals for the development of the river passenger fleet in order to improve transport accessibility in the regional transport system. The results of the study demonstrate the potential for the development of river passenger transportation through the implementation of proposed new passenger vessel projects.
Ключевые слова: речные перевозки, пассажирские суда, транспортная доступность.
Key words: river transportation, passenger ships, and transport accessibility.

Введение

На данный момент в Амурском бассейне эксплуатируется около 800 судов. Главная проблема в том, что их состояние вызывает серьёзную озабоченность, так как средний возраст судов составляет более 46 лет, что говорит о высокой степени их износа. Амур имеет период как с высоким уровнем воды в реке, так и период с самым низким уровнем воды - межень. Поэтому при выборе новых проектов пассажирских судов необходимо ориентироваться на межень, чтобы обеспечить движение судов в больший период навигации на реке. Также требуется обновление не только пассажирского флота, но и обеспечивающей его работу инфраструктуры.

Старые пассажирские речные суда

Рассмотрим пассажирские суда, бывшие в эксплуатации ранее, или работающие в настоящее время. Метеор «Капитан Князев» - пассажирский теплоход на подводных крыльях типа «Метеор» проект 342Э. Судну около 35 лет и для скоростных судов это очень почтенный возраст. Предназначен для скоростных перевозок пассажиров в светлое время суток. Пассажиры размещаются в трех салонах. Переход между салонами осуществляется по палубе. Метеор «Сергей Торбин» также является пассажирским скоростным теплоходом на подводных крыльях проекта 342Э. Был построен и введен в эксплуатацию в 1990 году. Оба судна находятся в эксплуатации.

«Полесье» проект 17091 - пассажирский теплоход на подводных крыльях, но не является метеором. Разница в том, что данное судно предназначалось для скоростных перевозок в светлое время суток по неглубоким водоёмам. Был построен и введен в эксплуатацию в 1993 году, но, к сожалению, был списан и утилизирован в Хабаровске в 2025 году. Пассажирский салон расположен в средней части корпуса, в нем установлены 9 рядов кресел на 55 мест.

Теплоход «Василий Поярков» - судно для пассажирских перевозок. Был построен и введен в эксплуатацию в 1960 году. Данный теплоход совершал круизы по таким маршрутам, как Хабаровск – Николаевск-на-Амуре, Хабаровск – Комсомольск-на-Амуре и другие. После модернизации принимал на борт 118 человек и размещал в комфортабельных каютах разного класса. К сожалению, с 2015 года судно больше не эксплуатируется.

«Озёрный Москвич» (ОМ-8) проект 780 - настоящий ветеран речного флота, имеющий репутацию надежного и выносливого судна. Является пассажирским речным теплоходом, относящимся к серии «Омиков» (двухпалубный пассажирский речной теплоход). Был построен в 1963 году. Предназначен для пригородных маршрутов малой и средней протяженности, в основном эксплуатировался по маршрутам из Комсомольска-на-Амуре в сёла Пивань и Нижние Халбы. На судне можно разместить 85 человек. На данный момент, из-за большого срока службы, он эксплуатируется, но в очень ограниченном режиме. Основные технические характеристики судов приведены в табл.1.

Таблица 1

Характеристики пассажирских судов [1, 2]

Параметр	Метеоры		«Полесье»	Теплоход «Василий Поярков»	Теплоход «Озёрный Москвич» (ОМ)
	«Капитан Князев»	«Сергей Торбин»			
Длина габаритная, м	34,6	34,6	21,32	79	42,57
Ширина габаритная, м	9,5	9,5	5	15,7	7,12
Высота борта, м	1,6	1,6	4,1	3,4	2,5
Осадка судна, м	1,05	1,05	3,32	1,525	1,5
Запасы топлива, т	3,2	3,2	1	57	4,29
Число пассажиров	131	125	55	118	85
Численность команды	11	8	2	39	6

Новые проекты пассажирских судов

Поскольку срок эксплуатации речных судов на реке Амур превышает 35-50 лет, ремонт становится слишком затратным и нецелесообразным. Предлагаем несколько проектов судов, которые могут их сменить. Модернизированный «Метеор 120Р» проект 03580 - современное пассажирское судно на подводных крыльях, созданное для скоростных перевозок по судоходным рекам. Первый такой «Метеор» был спущен на воду в 2021 году. Салон состоит из двух частей. Первая носовая часть рассчитана на 36 мест с компоновкой кресел 2-3-2, вторая основная часть рассчитана на 84 места с компоновкой кресел 2-4-2. Конструктивные особенности «Метеора»: оснащено двумя современными дизельными двигателями, которые обеспечивают высокую надежность, скорость и экономичность эксплуатации; салон выполнен с панорамным остеклением и оборудован креслами авиационного типа, что повышает уровень комфорта во время поездки; обладает уменьшенным волнообразованием и сниженным уровнем шума и вибрации по сравнению с предшественниками.

Речной трамвай «Соталия» проект 03850 – прямой наследник «Омиков». Был разработан Северодвинским научно-исследовательским проектно-технологическим бюро «Онега» и впервые построен ООО «Ушаковские верфи» в 2022 году. Главное преимущество «Соталии» - это продуманная современная конструкция:

- модульная платформа: это основа проекта, одна и та же база позволяет создавать суда разного назначения: пассажирские, прогулочные/круизные, грузопассажирские (от 2,5 до 5 тонн груза) и даже плавучий фельдшерско-акушерский пункт для отдаленных деревень на берегах реки;

- малая осадка: всего 0,5 метра дает судну возможность работать на большинстве российских рек и озер, в том числе на очень мелководных участках;

- посадка на необорудованный берег: специальная форма корпуса позволяет судну причаливать и производить посадку/высадку пассажиров там, где нет оборудованных причалов;

- водометный движитель: вместо обычного гребного винта используется водомет, он повышает маневренность, безопасность (меньше риск повредить движитель на мелководье) и позволяет работать на засоренных реках;

- высокий комфорт для пассажиров: салон имеет большую площадь остекления, обеспечивая панорамный обзор, внутри - климат-контроль, эргономичные кресла с USB-розетками для зарядки устройств, имеется санузел;

- открытая палуба: наличие прогулочной палубы - важная черта для туристических и прогулочных маршрутов;

- вариативность двигателей: судно может оснащаться как традиционным дизельным двигателем, так и работать на газомоторном топливе.

Судно на подводных крыльях «Метеор 2020» проект 03830 имеет технические характеристики в лучших традициях метеоров. Салон на 122 пассажира оборудован всем необходимым для длительного путешествия, на судне есть душевая, буфет, а для экипажа – каюты отдыха. Судно оборудовано смотровой площадкой. Основные характеристики судов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные характеристики новых судов [1, 3, 4]

Параметр	«Метеор 120Р» проект 03580	«Метеор 2020» проект 03830	«Соталия» проект 03850
Длина габаритная, м	35,8	36	19,3
Ширина габаритная, м	9,3	11	3,7
Осадка судна, м	2,5	2,05	0,5
Число пассажиров	116 - 120	122	30/42/54
Численность команды	4-6	6	2

Выводы

В ходе проведенного анализа состояния речного флота на реке Амур выявлено, что большинство судов находится в эксплуатации больше 35 лет, что значительно превышает нормы и обусловливает необходимость их замены. Обзор бывших ранее в эксплуатации судов показал, что необходимо включать работу скоростные суда, способные преодолевать большие расстояния между населенными пунктами, и небольшие экономичные суда разной модификации для малых по протяженности маршрутов. Основным техническим параметром, ограничивающим выбор новых проектов судов, являлась осадка судна по причине мелководности Амура. Но существуют дополнительные ограничения, связанные с высокой стоимостью новых судов, недостаточной готовностью речной инфраструктуры и необходимостью проведения исследований по эксплуатационным и экономическим затратам в конкретных условиях Амурского бассейна и Дальневосточного региона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Флот: Список судов // KORABEL.RU: справочно-информационный портал. URL: https://www.korabel.ru/fleet/info/ (дата обращения: 03.04.2026).

2. Регистровая книга: «ОМ-8» // ФАУ «Российское Классификационное Общество». URL: https://rfclass.ru/activities/class/regbook/?Regbook%5Bregnum%5D=105482 (дата обраще-ния: 03.04.2026).

3. Пассажирское скоростное судно на подводных крыльях «Метеор 120Р» // Cruiseinform.ru. URL: https://cruiseinform.ru/catalog/04/projects/meteor120r/ (дата обращения: 03.04.2026).

4. Возрождение речных «Метеоров». Опубл.: 26.01.2026 // Татарстан – республика достижений. URL: https://tatarstan.top/achievement/vozrozhdenie-rechnykh-meteorov-/ (дата обращения: 03.04.2026).

УДК 629.5.015:532.5:004.9
Воронков Игорь Олегович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Voronkov Igor Olegovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В KOMPASFLOW
RESEARCH OF THE HYDRODYNAMIC EFFECT IN KOMPASFLOW

Аннотация. В работе представлены результаты вычислительного эксперимента по моделированию гидродинамического эффекта – присасывание судов, движущихся параллельным курсом. Для построения модели и выполнения расчетов использовалась программа KOMPAS-3D и ее приложение KOMPASFLOW. Рассмотрено несколько вариантов расчетных схем. Полученные поля давлений и скоростей согласуются с результатами, полученными в программе Flow-3D.
Abstract. The paper presents the results of a computational experiment on modeling the hydrodynamic effect – suction of vessels moving in parallel course. For building the model and performing calculations, the program KOMPAS-3D and its application KOMPASFLOW were used. Several variants of calculation schemes are considered. The obtained fields of pressures and velocities are consistent with the results obtained in the Flow-3D program.
Ключевые слова: гидродинамический эффект, KOMPASFLOW, движение судов параллельным курсом, вычислительный эксперимент.
Key words: hydrodynamic effect, KOMPASFLOW, parallel course movement of vessels, computational experiment.

Введение

В процессе изучения профильных дисциплин студенты-кораблестроители решают задачи, связанные не только с проектированием, расчетами прочности конструкций, технологией постройки судов, но и с эксплуатацией объектов океанотехники. Например, задача по определению загрузки судна – для оценки грузовместимости, расчет характеристик бортовой и килевой качки – для оценки параметров обитаемости судна. В дисциплине «Гидродинамика» изучаются физические эффекты, влияющие на безопасность эксплуатации судна. Эффект присасывания – гидродинамический эффект, который возникает при движении объекта в жидкости. На поверхности движущегося объекта возникают области пониженного давления, вызывающие притягивание других объектов к своей поверхности. Для исследования данного эффекта применим приложение KOMPASFLOW программы KOMPAS-3D.

Исследование гидродинамического эффекта

Риск присасывания двух судов увеличивается в следующих случаях: суда идут параллельными курсами при обгоне; расстояние между судами мало; размеры судов сильно различаются; суда следуют по мелководью или в узкости; скорости судов значительны. Данный эффект проявляется при расхождении судов на встречных курсах. Эффект присасывания может привести к разрыву швартовов судна, стоящего у причала, при прохождении рядом другого судна [1].

Первоначально была поставлена задача с помощью вычислительного эксперимента обнаружить падение давления в сужающемся потоке жидкости. Для этого был выполнен численный эксперимент в приложении KOMPASFLOW программы KOMPAS-3D. Рассмот-

рен поток жидкости между двумя стенками (5 м расстояние меду стенками, скорость 1 м/с), на одной стенке находится выступ – неподвижный полуцилиндр. Пресная вода движется между стенками (свободной поверхности нет). В экспериментах варьировался размер полуцилиндра – радиус R. Необходимо было определить поле давлений и скорости потока между стенками. В программе КОМПАС-3D были построены соответствующие 3D-модели и созданы проекты в KOMPASFLOW. В результате расчетов получены поля давлений и скоростей, показанные на рис. 1. Отмечены крайние значения давлений и скорости потока в рассматриваемом сечении – в районе сужения потока.

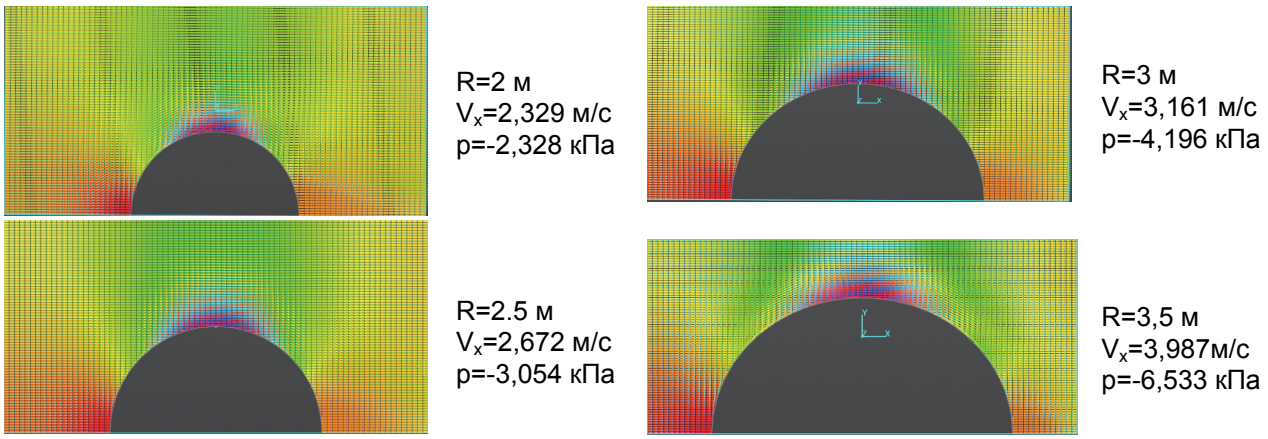


Рис. 1. Моделирование обтекания выступа

Результаты численного эксперимента показывают, что в районе сужения потока происходит рост скорости и снижение давления движущейся жидкости. На рис. 1 синий цвет – область низкого давления (p), в этой области вектора скорости красного цвета иллюстрируют максимальное ее значение (Vx). Результаты согласуются с данными из [1] расчетов в FLOW-3D. В проектах KOMPASFLOW дополнительно проводилось исследование влияния размера конечно-элементной сетки и параметра CFL на получаемые результаты.

Результаты и методики расчета из [2] стали основой при построении проекта в KOMPASFLOW для исследования гидродинамического эффекта при прохождении судов параллельными курсами. Для выявления эффекта присасывания проведен численный эксперимент в двух вариантах. Первый вариант – движутся параллельными курсами судно и катер, второй – два судна. Для упрощения построения 3D-моделей условно принята симметричной форма подводной части судов. Скорость задана 1 м/с, рассматривается движение в морской воде. Соотношение размеров катера и судна принято 1/10, для двух судов – 1/2. В численном эксперименте изменялось расстояние между судами. Расчетная сетка была принятой постоянной во всех расчетах.

В результате уменьшения расстояния между судами изменялось расчетное поле давлений (см. рис.2). Показаны крайние значения скоростей и давлений. Если ранее поле давлений описывало обтекание каждого судна в отдельности, высокие давления были в оконечностях судов и области пониженного давления по бортам, то с уменьшением расстояния между судами возникает область более низкого давлений именно между корпусами судов. Падение давления между судами приведет к сближению судов, так как со стороны других бортов давление выше. Даже при такой маленькой скорости движения картина падения давления довольно яркая. Если скорость движения судов будет выше, то давление в области между судами станет еще меньше. Выявлена зависимость сил присасывания от размеров судов, скорости движения и расстояния между ними. Приложение KOMPASFLOW наглядно показывает взаимное влияние друг на друга движущихся параллельными курсами судов при минимальных вычислительных затратах. Численное моделирование позволяет провести серии расчетов при различных исходных данных за довольно короткое время. Расчеты могут быть

проведены для конкретных судов по фактическим техническим характеристикам, полученные данные станут основой при создании рекомендации для судоводителей.

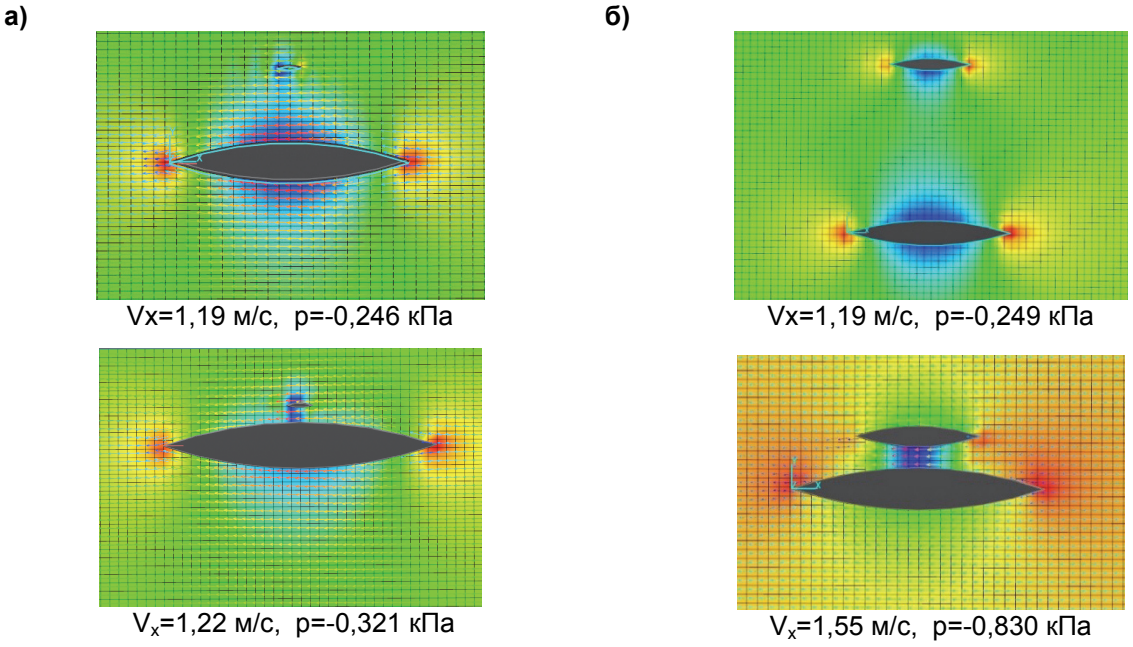


Рис. 2. Моделирование движения параллельными курсами: а) судно и катер; б) два судна

Исследования эффекта присасывания можно продолжить, рассмотрев движение судов на встречном курсе. На рис. 2 показаны области высокого давления в носовой части судна (красный цвет заливки). При встрече малого судна с большим, данные области могут «оттолкнуться» друг от друга и развернуть малое судно. Если отклонения от прямолинейного курса не произойдет, то в дальнейшем при входе в область низкого давления (голубой цвет) и судов меньшее судно может быть притянуто к большему судну (при малом расстоянии между корпусами).

Заключение

Проведенные исследования гидродинамического эффекта с применением численного моделирования в приложении KOMPASFLOW программы КОМПАС-3D демонстрируют хорошие результаты и наглядную форму их представления. Разработанные методики расчета могут быть использованы для моделирования и исследования других задач эксплуатации судов при изучении дисциплин бакалаврами и магистрами кораблестроительных направлений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чижиумов, С.Д. Проблемы гидродинамики корабля (численное моделирование): учеб. Пособие. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. 122 с.

2. Каменских И.В., Мерзликина В.С. Опыт применения программы KompasFlow в учебном процессе // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы II Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 г. Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2022. Ч. 2. С. 274-277.

УДК 629.735.33
Гаврин Иван Алексеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Gavrin Ivan Alekseevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Потянихин Дмитрий Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Potianikhin Dmitrii Andreevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Computer Design, Komsomolsk-na-Amure State University

ПРОЕКТИРОВАНИЕ САМОЛЁТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
DESIGN OF AN AGRICULTURAL AIRCRAFT

Аннотация. Цель работы заключается в проектировании лёгкого самолёта для нужд сельского хозяйства на территории Дальнего Востока России. Основными требованиями к самолету являются простота конструкции, способность взлёта и посадки с неподготовленных площадок, устойчивость к поперечному ветру, а также герметичность кабины пилота с приточной вентиляцией, оборудованной системой фильтрации воздуха. На основе анализа самолетов-аналогов были выбраны основные летно-технические характеристики проектируемого самолета. В ходе выполнения работы по общепринятым методикам был разработан проект фюзеляжа, произведен расчет весовых, геометрических и аэродинамических параметров.
Abstract. The objective of this study is to design a light aircraft for agricultural use in the Russian Far East. The key requirements for the aircraft include a simple design, the ability to take off and land from unprepared sites, crosswind resistance, and a pressurized cockpit with fresh air ventilation and an air filtration system. Based on an analysis of comparable aircrafts, the key performance characteristics of the designed aircraft were determined. Using standard methods, the fuselage design was developed and weight, geometric, and aerodynamic parameters were calculated.
Ключевые слова: проектирование самолёта, малая авиация, лётно-технические характеристики.
Key words: aircraft design, light aircraft, flight performance characteristics.

Введение

На Дальнем Востоке Российской Федерации происходит активное развитие сельскохозяйственной деятельности, которое сопровождается расширением посевных площадей кукурузы, риса, сои и других культур. В связи с неустойчивым климатом на территории Дальнего Востока все сельскохозяйственные работы надо проводить в короткие агросроки. Большинство таких работ производится с использованием наземной техники, которая неблагоприятно воздействует на почву и имеет низкую скорость обработки. Кроме того, при возделывании риса такая техника не может передвигаться по залитой водой почве. Таким образом, у аграрных предприятий на территории Дальнего Востока имеется потребность во внедрении сельскохозяйственной авиации.

Целью настоящей работы является разработка проекта легкого самолёта для нужд сельского хозяйства (распыления удобрений, пестицидов, гербицидов, инсектицидов; подкормки сельскохозяйственных культур, дефолиации, десикации, авиасева), способного выполнять требуемые задачи эффективнее, быстрее и без потерь урожая в ходе обработки полей, в сравнении с наземными видами техники и мотодельтапланами.

Требования, предоставляемые к самолёту: масса пустого 250 кг, максимальная взлётная масса 500 кг; грузоподъёмность 150 кг, крейсерская скорость 90 км/ч. Проектируемый самолет должен иметь как можно более простую конструкцию, способность взлёта и посадки с неподготовленных площадок вблизи района работ, устойчивость к поперечному ветру и герметичную кабину пилота с приточной вентиляцией, оборудованной системой фильтрации поступающего в кабину воздуха.

Статистика и подбор прототипов

Был произведён анализ лётно-технических характеристик (ЛТХ) российских самолётов-аналогов МАИ-890СХ, А-35 Сканер, Фермер-2 и МАИ-223СХ, на основе которого были

определены будущие ЛТХ для разрабатываемого самолёта. Проектировочный расчёт был выполнен на основе общепринятых методик [1]. Было принято решение разрабатывать самолёт с бипланной схемой конструкции крыла, что значительно уменьшит размах крыла, повысит подъёмную силу и улучшит манёвренность самолёта.

Весовой расчёт самолёта

Был произведён весовой расчёт агрегатов летательного аппарата (ЛА) и всего самолёта, указанный в таблице 1.

Таблица 1

Весовая сводка агрегатов летательного аппарата

Наименование агрегата / части ЛА	**Вес, кг**	**Наименование агрегата / части ЛА**	**Вес, кг**
Полезная нагрузка	95,2	Силовая установка	
Экипаж	80	Винт	5
Топливо	15,2	Моторама	1,5
Планер		Топливная система	1,4
Крыло	35	Топливные баки	0,8
Расчалки	2,5	Двигатель	110
Подкосы крыла	2	Система охлаждения	1,5
Элероны	5	РУД	1
Фюзеляж	70	Оборудование СКВ	1,5
Остекление кабины	1	Приборная доска	5
Руль направления	2	(Радиооборудование)	0,7
Руль высоты	4	Электрооборудование	3,5
Киль	1,5	Сидение	1,5
Стабилизатор	4	Ремни крепления	1
Основные стойки шасси	2×12=24	Аккумулятор	6
Передняя стойка шасси	6	Тормозная система	1,2
Управление	4	Прочее (мед.аптечка 0.3)	0,2
Ручки управления	1,5	Полезная нагрузка	150
Качалка управления, троса	1,5	СКВ	2
Педальный узел	1		
		Итого:	**490**

Исходя из практики и из условий сборки, было принято решение добавить к расчётному весу 60 кг запаса по весу.

Определение основных геометрических параметров и центра тяжести самолёта

Для крыла был выбран профиль ЦАГИ Р–II–14. Его главным преимуществом является плавное падение подъёмной силы при высоких углах атаки крыла [2]. При выполнении геометрических расчётов площадь крыла составила 16 м^2, площадь элерона – 0,8 м^2, хорда элерона – 0,3 м, другие геометрические параметры крыла и ЛТХ представлены на чертеже (рисунок 1). Длина фюзеляжа 6200 мм, высота – 1350 мм, ширина – 1050 мм. Для самолета весом 550 кг целесообразно применить ферменную конструкцию фюзеляжа с композиционной обшивкой кабины. Координата центра тяжести самолёта составляет 28,5% от средней аэродинамической хорды крыла.

Определение основных летных и взлетно-посадочных характеристик самолета

Основные летные и взлетно-посадочные характеристики самолета представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные летные и взлетно-посадочные характеристики

предельная скорость полета ($V_{max\ max}$)	180 км/ч = 50 м/с	длина разбега по бетону	42 м
крейсерская скорость полета ($V_{кр}$)	90 км/ч	длина разбега по грунту	44 м
скороподъемность	90 км/ч	длина разбега по траве	49 м
скорость сваливания (V_C)	65 км/ч	взлётная дистанция с бетонного аэродрома	98 м
скорость отрыва ($V_{отр}$)	69 км/ч = 19,3 м/с	взлётная дистанция с грунтового аэродрома	100 м
посадочная скорость ($V_{пос}$)	70 км/ч	взлётная дистанция с травяного аэродрома	105 м

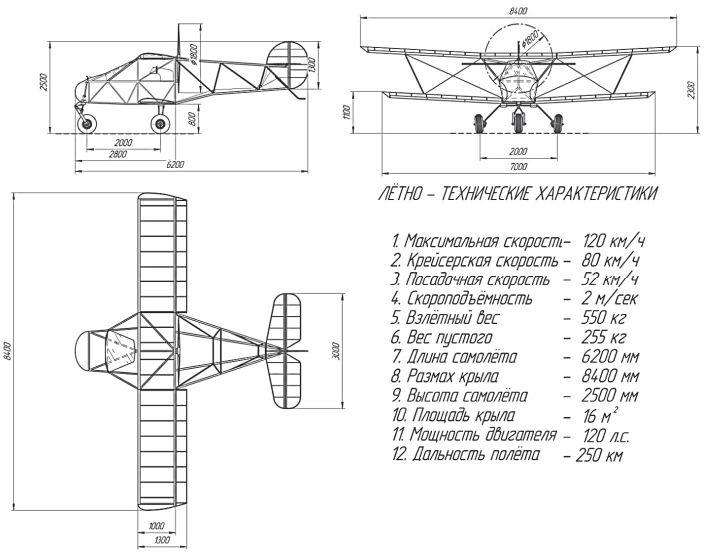


Рис. 1. Общий вид и лётно-технические характеристики

Расчет виража на различных углах крена

Основным управляющим воздействием на развороте является задаваемый летчиком угол крена. Радиус виража $r_в$ и время разворота проектируемого самолета на 360º зависит от угла γ и крейсерской скорости $V_{кр}$ = 92 км/ч на высоте 500 м и определяются по формуле:

$$r_в = 0{,}008 \cdot \frac{V_{кр}^2}{\operatorname{tg}\gamma}. \quad (1)$$

Таким образом, при угле крена 30º $r_в$ = 117 м; при угле крена 45º $r_в$ = 80 м, при угле крена 60º $r_в$ = 39 м.

Время выполнения виража определяется по формуле

$$t_в = 22{,}6 \cdot \frac{r_в}{V_{кр}}. \quad (2)$$

Тогда при угле крена 30º $t_в$ = 28 с; при угле крена 45º $t_в$ = 19 с; при угле крена 60º $t_в$ = 9 с.

Техническое описание конструкции крыла

Основное назначение крыла – создание подъемной силы, потребной для осуществления полета самолета. Разработанный самолёт с бипланной схемой расположения крыла имеет два крыла (верхнее и нижнее), указанные на рисунке 1.

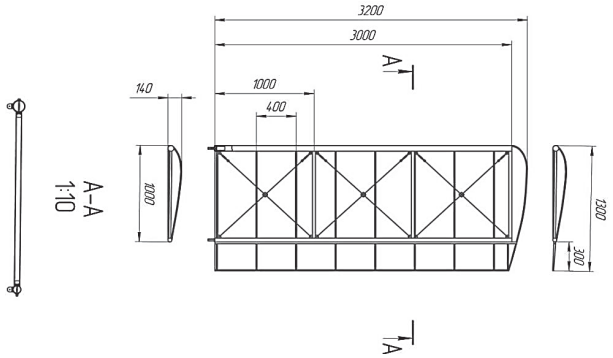


Рис. 2. Конструктивно-силовая схема консоли верхнего крыла

Нижнее крыло состоит из двух консолей, которые крепятся к фюзеляжу через узлы типа «ухо-вилка». Верхнее крыло включает центроплан, жёстко закреплённый в верхней части фюзеляжа, и две консоли с элеронами. Консоль выполнена по двухлонжеронной схеме (рисунок 2): в качестве лонжеронов используются трубы из сплава Д16Т — передняя (Ø60х2) и задняя (Ø40х1,5). Между ними установлены раскосы из труб Д16Т, Ø30х1 и расчалки (трос 3,5 мм, тандера). Роль нервюр выполняют профилированные латы из трубы Д16Т Ø10х1, которые укладываются в карманы обшивки. Также в конструкции предусмотрены кронштейны навески крыла и крепления подкосов (Д16Т). В качестве обшивки используется ткань «Дакрон» или другие синтетические материалы с аналогичными характеристиками.

Подобная конструкция несущих поверхностей широко применяется в сверхлёгких летательных аппаратах и мотодельтапланах. Она проста в изготовлении (не требует металлорежущих станков) и удобна в ремонте.

Заключение

Опираясь на статистические данные самолётов-аналогов, по общепринятой методике был разработан и спроектирован сверхлёгкий сельскохозяйственный самолёт, а также были получены данные, необходимые для его сборки, весовые, геометрические и аэродинамические параметры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бадягин А.А., Мухамедов Ф.А. Проектирование лёгких самолётов – М.: Машиностроение, 2012. — 208 с.

2. Кашатфутдинов С. Т., Лушин В. Н. Атлас аэродинамических характеристик крыловых профилей - Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, 2011. – 74 с.

УДК 629.12:621.9:621.791

Гнатив Денис Михайлович, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

Gnativ Denis Mikhailovich, student, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelslcoy

Комаров Артём Сергеевич, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

Komarov Artem Sergeevich, student, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelslcoy

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ: DED, EBM, WAAM
COMPARISON OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR SHIPBUILDING: DED, EBM, WAAM

Аннотация. В статье рассмотрены три технологии аддитивного производства металлов для судостроения: направленное энергетическое осаждение (DED), электронно-лучевое плавление порошка (EBM) и дуговая наплавка проволокой (WAAM). Цель исследования – сопоставить возможности этих процессов по масштабу изготавливаемых деталей, номенклатуре материалов, производительности, стоимости и требованиям к интеграции на верфях. Показано, что дуговые DED-процессы, прежде всего WAAM, наиболее перспективны для изготовления и ремонта крупногабаритных корпусов, силового набора и гребных винтов, тогда как EBM занимает нишу высокоточного производства компактных, но критически нагруженных узлов энергетических установок и арматуры. Обоснована комбинированная стратегия применения, позволяющая использовать сильные стороны каждой технологии в судостроении.

Abstract. The article considers three metal additive manufacturing technologies for shipbuilding: Directed Energy Deposition (DED), Electron Beam Melting (EBM), and Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). The aim of the study is to compare these processes in terms of build scale, material range, productivity, cost, and integration requirements at shipyards. It is shown that arc-based DED processes, especially WAAM, are most promising for manufacturing and repair of large hull structures, stiffeners, and propellers, whereas EBM occupies a niche of high-precision production of compact but highly loaded power plant components and fittings. A combined application strategy is justified, allowing shipbuilding to leverage the strengths of each technology.

Ключевые слова: аддитивное производство; судостроение; направленное энергетическое осаждение; электронно-лучевое плавление; дуговая наплавка проволокой.

Key words: additive manufacturing; shipbuilding; directed energy deposition; electron beam melting; wire and arc additive manufacturing.

Введение

Крупнотоннажное судостроение традиционно опирается на сварку, литьё и механообработку массивных металлических заготовок, что ведёт к значительным срокам изготовления, высокому расходу материала и ограниченной геометрической свободе конструкции. Развитие аддитивных технологий для работы с металлом открывает для верфей новые возможности: изготовление крупных деталей по цифровым моделям, сокращение цикла поставки, ремонт и доработка узлов непосредственно в доке.

Среди промышленных технологий, которые уже продемонстрировали применимость к морской отрасли, можно выделить три класса: направленное энергетическое осаждение (Directed Energy Deposition, DED), электронно-лучевое плавление (Electron Beam Melting, EBM) и технологии на основе дуговой наплавки проволокой, чаще всего объединяемые термином Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) как частный случай DED-Arc. Цель работы – выполнить сопоставительный анализ этих подходов с точки зрения задач современного судостроения, опираясь на опубликованные исследования и реализованные проекты, и обозначить области рационального применения каждой из технологий [1].

Обзор технологий

Directed Energy Deposition (DED)

В классической схеме DED фокусированный источник энергии (лазер, электронный луч или дуга) одновременно подаёт тепло на подложку, а подающий тракт вводит порошок или проволоку в зону плавления, формируя валик, из которого слой за слоем строится деталь или наплавка. Для судостроения наибольшее значение имеют дуговые варианты DED-Arc с использованием газо-дуговой сварки (GMAW, GTAW), поскольку они позволяют работать с распространёнными корпусными сталями и сплавами при высокой скорости наплавки.

Крупные исследовательские проекты в США (NSRP, Edison Welding Institute, HII и др.) создали роботизированные DED-системы с несколькими степенями свободы, рассчитанные на изготовление крупногабаритных элементов корпуса и силового набора, а также на разработку нормативной базы NAVSEA для квалификации процессов DED-Arc в кораблестроении. На схематичном изображении типичной роботизированной DED-ячейки с портальным манипулятором и сварочным источником энергии хорошо видна возможность построения сложных пространственных траекторий наплавки (рис. 1) [2].

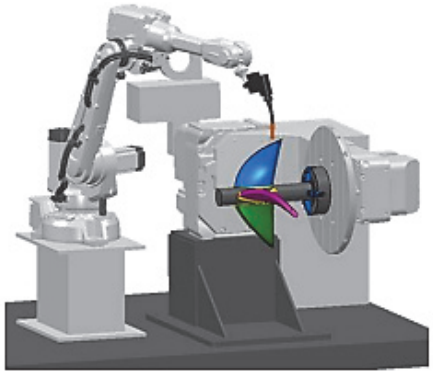


Рис. 1. Схема роботизированной DED-ячейки с порталом и сварочным источником энергии [1]

Electron Beam Melting (EBM)

EBM относится к методам послойного сплавления порошка в слое, близким к лазерному плавлению (PBF-LB/M), но использует электронный луч в высоком вакууме. Вакуумная камера содержит бункеры с порошком, механизм разравнивания слоя и стол построения; электронный пучок управляется электромагнитными катушками, обеспечивая быстрое сканирование и локальное плавление порошка при температурах до 600 – 1000 °C и выше [2]. Типичная структурная схема EBM-установки с колонной электронного луча, вакуумной камерой и механизмами подачи порошка показана на иллюстрации (рис. 2).

Поддержание всего порошкового ложа при повышенной температуре уменьшает остаточные напряжения и позволяет обрабатывать жаропрочные и склонные к растрескиванию сплавы, такие как титановый алюминид, что сделало EBM важной технологией для авиационных турбин и силовых деталей.

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

WAAM представляет собой специальный вариант DED-Arc, в котором в качестве материала используется сварочная проволока, плавящаяся от дуги (чаще всего MIG/MAG или TIG), а наплавка ведётся роботизированной системой по заранее рассчитанным траекториям. По существу, это автоматизированная наплавка с числовым программным управлением, оптимизированная для построения крупногабаритных конструкций из широко доступных сварочных материалов [3].

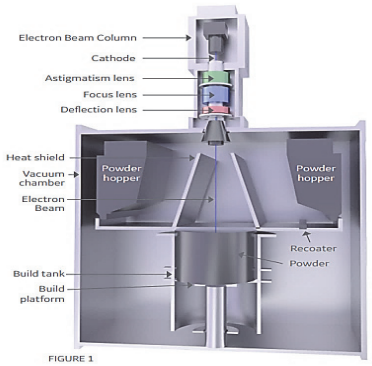


Рис. 2. Схематическое устройство EBM-установки с вакуумной камерой и системой послойного распределения порошка [4]

В морской промышленности WAAM стала одной из первых аддитивных технологий, успешно применённых для изготовления полноразмерных сертифицированных деталей. Наиболее известный пример – проект WAAMpeller, первый в мире 3D-печатный судовой винт, сертифицированный классификационным обществом Bureau Veritas и установленный на буксире Damen Stan Tug 1606.

По совокупности производительности и стоимости WAAM и DED-Arc лучше соответствуют требованиям верфей: они опираются на стандартное сварочное и роботизированное оборудование, снижают сроки и затраты по сравнению с литьём и механической обработкой, а также уже проходят квалификацию и сертификацию морских компонентов. EBM требует дорогих вакуумных установок и специализированных порошков, экономически оправдываясь в основном при серийном выпуске сложных высокоценных деталей и пока оставаясь в судостроении технологией с ограниченным числом критических применений, для которой регуляторные процедуры в морском секторе во многом ещё формируются на базе опыта авиации и энергетики [4]. Также EBM ограничен размерами своей камеры и объёма порошкового ложа, но придаёт высокую точность поверхности.

Заключение

Анализ опубликованных исследований и промышленных проектов показывает, что для задач современного судостроения наибольший практический потенциал имеют дуговые технологии направленного энергетического осаждения, в первую очередь WAAM как зрелый и уже сертифицированный вариант для крупных деталей. DED-Arc и WAAM обеспечивают требуемый масштаб, совместимость с основными судостроительными материалами, высокую производительность и относительно умеренные капитальные затраты.

EBM занимает более нишевую позицию, предлагая уникальное сочетание высокой точности, работы с жаропрочными сплавами и сниженных остаточных напряжений, что делает его перспективным для компактных, но критических по надёжности элементов судовых энергетических установок и арматуры. Однако ограничения по габаритам и стоимости оборудования сдерживают широкое распространение EBM в корпусном и силовом судостроении.

С практической точки зрения целесообразно рассматривать следующую стратегию применения:

- использовать WAAM и DED-Arc для изготовления и ремонта крупногабаритных элементов корпуса, гребных винтов, импеллеров, опорных конструкций и узлов модернизации, опираясь на накопленный опыт сертифицированных проектов (например, WAAMpeller);
- применять EBM там, где необходима максимальная плотность, сложная внутренняя геометрия и жаропрочные сплавы – например, в деталях турбомашин и высокотемператур-

ной арматуре судовых энергетических систем, при этом учитывать специфику морской коррозионной среды и адаптировать материалы и покрытия;

- развивать стандартизацию, методы неразрушающего контроля и цифровые цепочки данных для процессов DED-Arc/WAAM в кооперации с классификационными обществами и военно-морскими регуляторами, что позволит масштабировать их применение от единичных пилотных проектов до регулярной практики на верфях.

Таким образом, комбинация дуговых аддитивных технологий (DED-Arc/WAAM) для крупногабаритных конструкций и EBM для высоконагруженных компактных узлов представляется наиболее рациональным сценарием развития аддитивного производства в судостроении на горизонте ближайших лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Robotic Arc Directed Energy Deposition Additive Manufacturing for Shipbuilding: Final Report / NSRP, Edison Welding Institute. 2019. URL: https://www.nsrp.org/wpcontent/ uploads/2019/10/RA_Robotic_Arc_DED_AM_for_Shipbuilding_SDMT_Panel_10-16-19r1.pdf (дата обращения: 18.03.2026).
2. DED Additive Manufacturing for Shipbuilding Applications: Advantages // DM3D Technology. 2024. URL: https://dm3dtech.com/metal-additive-manufacturing-applications/shipbuilding/ (дата обращения: 18.03.2026).
3. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Explained // MakerVerse. 2025. URL: https://www.makerverse.com/resources/3d-printing/wire-arc-additive-manufacturing-waam-explained/ (дата обращения: 18.03.2026).
4. ELECTRON BEAM MELTING: Enabling Metal Additive Production Using Electron Beam Melting Technology // GE Additive. URL: https://go.additive.ge.com/rs/706-JIU-273/images/GE%20Additive_EBM_White%20paper_FINAL.pdf (дата обращения: 18.03.2026).

УДК 629.5.07:621.79:004.896

Гнатив Денис Михайлович, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
Gnativ Denis Mikhailovich, student, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelslcoy
Комаров Артём Сергеевич, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
Komarov Artem Sergeevich, student, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelslcoy

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДВОДНОГО РЕМОНТА КОРПУСОВ СУДОВ В ЕВРОСОЮЗЕ, КОРЕЕ И ЯПОНИИ
COMPARISON OF UNDERWATER SHIP BODY REPAIR TECHNOLOGIES IN THE EU, KOREA AND JAPAN

Аннотация. Статья посвящена сравнению технологий подводного ремонта корпусов судов в Европейском союзе, Южной Корее и Японии. Рассматриваются коффердамы для ремонтов «на плаву», роботизированные системы очистки и инспекции корпусов, а также применение сварки трением с перемешиванием, включая подводный вариант UWFSW в рамках проекта RESURGAM. Показано, что регионы по-разному комбинируют коффердамы, роботов и FSW/UWFSW в ответ на рост стоимости простоя флота и ужесточение экологических требований, формируя дополняющие, а не конкурирующие технологические ниши.

Abstract. The article compares underwater ship hull repair technologies in the European Union, South Korea, and Japan. It analyzes cofferdams for class-approved afloat repairs, robotic systems for hull cleaning and inspection, and the use of friction stir welding, including the underwater UWFSW variant developed within the RESURGAM project. The study shows that these regions combine cofferdams, robots, and FSW/UWFSW in different ways in response to rising fleet down-

time costs and stricter environmental regulations, thereby creating complementary rather than competing technological niches.
Ключевые слова: подводный ремонт; корпус судна; коффердам; подводный робот; сварка трением с перемешиванием.
Key words: underwater repair; ship hull; cofferdam; underwater robot; friction stir welding.

Введение

Ускоренная цифровизация судоходства, ужесточение экологических требований и рост стоимости простоя судов стимулируют переход от традиционного докового ремонта к технологиям подводного обслуживания и восстановления корпусов. Подводный ремонт позволяет выполнять часть работ без выхода судна в док, снижая время простоя и эксплуатационные затраты, но предъявляет повышенные требования к безопасности, качеству сварных соединений и экологической приемлемости методов. В разных регионах мира эти технологии развиваются неравномерно: Европейский союз активно инвестирует в роботизацию и твердотельную сварку, Южная Корея опирается на крупные верфи и судоходные компании как драйверы внедрения подводных роботов, а Япония делает ставку на высоконадежные робототехнические комплексы и сервисные решения крупных судовладельцев. Цель статьи – провести систематическое сравнение трех ключевых технологий подводного ремонта корпусов судов – коффердамов, подводных роботов и сварки трением с перемешиванием (FSW, включая подводный вариант UWFSW) [1].

Коффердамы и их региональные особенности

Коффердам - это временная герметичная конструкция, устанавливаемая снаружи корпуса в зоне повреждения и позволяющая осушить локальный участок для выполнения резки и сварки изнутри судна в сухой среде. Такой подход даёт возможность выполнять постоянные ремонты без постановки в док, используя привычные технологии дуговой сварки и стандартные процедуры контроля качества. Вместе с тем проектирование и подгонка коффердама к сложным обводам, контроль герметичности и зависимость от глубины и погоды ограничивают область его эффективного применения [2].



Рис. 1. Установка коффердама на корпус

В Европе коффердамы стали самостоятельным и хорошо отработанным направлением подводного сервиса. Специализированные компании в Бельгии и Нидерландах (Hydrex, FN Diving, Antwerp Underwater Solutions и др.) разрабатывают типовые и индивидуальные конструкции, выполняют подводные вставки листов обшивки и ремонт трещин, согласуя технологию с классификационными обществами. Разветвлённая сеть портов и круглосуточные аварийные команды позволяют выполнять такие работы «на плаву», сохраняя коммерческую эксплуатацию судна и резко сокращая простой [3].

В Южной Корее и Японии коффердамы также используются, но в открытых источниках они редко выделяются как отдельная инновационная технология: это, скорее, элемент стандартного инструментария верфей наравне с доковым ремонтом. При наличии крупных верфей и плановых докований основное внимание здесь переносится на другие способы снижения эксплуатационных затрат - прежде всего на роботизированную очистку и инспекцию корпусов [4].

Подводные роботы для очистки и инспекции

Подводные роботы стали ключевым инструментом обслуживания подводной части корпуса, позволяя автоматизировать очистку от обрастаний, визуальную и неразрушающую инспекцию и постепенно переходить к элементам локального ремонта. Используются дистанционно управляемые аппараты с щеточными модулями, автономные аппараты для планомерного обхода корпуса и роботы-«краулеры» на магнитном или колесном ходу, способные двигаться по обводам корпуса с контролем усилия прижатия и вибраций.

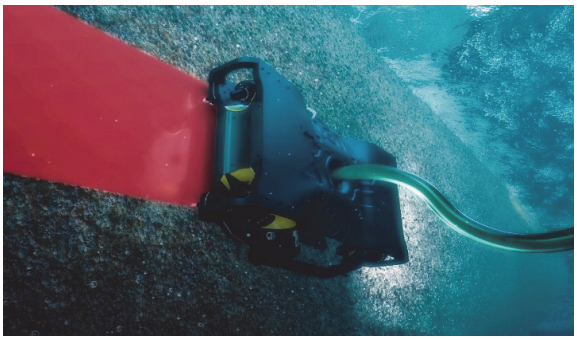


Рис. 2. Очиститель корпуса ECOsubsea

В ЕС основное внимание уделяется комплексным решениям, объединяющим инспекцию, очистку и подготовку к ремонтным операциям, в том числе в рамках исследовательских проектов HISMAR и других программ по снижению сопротивления и выбросов. Европейская экологическая политика и ограничения на традиционную подводную очистку стимулируют переход к роботам с системами сбора и фильтрации отходов, а также к более «чистым» способам последующего ремонта.

В Южной Корее роботы прежде всего рассматриваются как средство экономии топлива и сокращения выбросов за счёт частой очистки корпуса. Оператор HMM совместно с компанией Tas Global внедрил роботов-очистителей, способных надёжно удерживаться на криволинейных участках корпуса, адаптировать жёсткость щёток и усилие прижатия и обеспечивать видеоконтроль качества через несколько камер. Роботизированная очистка также развивается в сингапурских и корейских портах на базе ROV, позволяя уменьшить риск для водолазов и повысить скорость работ. Научные центры (например, KAIST) разрабатывают автономные системы визуальной инспекции корпусов и методы построения трёхмерных карт состояния покрытия, что создаёт задел для будущих ремонтных функций.

В Японии опыт высоконадёжной подводной робототехники сформировался в атомной энергетике: робот A-UT Machine, разработанный Mitsubishi Heavy Industries, многие годы используется для контроля сварных швов реакторных сосудов, демонстрируя отработанные решения по точному позиционированию и интеграции неразрушающего контроля в подводные системы. В торговом флоте судовладелец NYK развернул крупную программу роботизированной очистки корпусов совместно с Neptune Robotics, распространив технологию на сотни судов и добившись, по собственным оценкам, многократного возврата инвестиций за счёт снижения расхода топлива. При этом активный подводный ремонт с помощью роботов пока ограничен пилотными разработками и исследованиями, а основная отдача достигается именно за счёт регулярной очистки и детальной инспекции корпуса.

FSW и подводная FSW (UWFSW) в подводном ремонте

Сварка трением с перемешиванием (FSW) представляет собой твердотельный процесс, в котором вращающийся инструмент пластически деформирует и перемешивает материал в стыке без его плавления, что снижает деформации и количество дефектов по сравнению с дуговой сваркой. Первоначально FSW применялась в судостроении для алюминиевых надстроек, однако европейские проекты (например, HILDA) показали её применимость к стальным листам корпусов, позволяя получать высококачественные малодеформированные соединения.

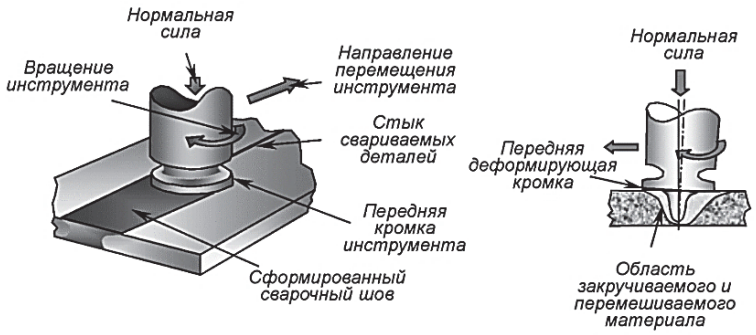


Рис. 3. Схема сварки трением с перемешиванием (FSW)

Подводный вариант процесса (UWFSW) использует воду как внешний контур охлаждения: интенсивное охлаждение способствует формированию мелкозернистой структуры, снижению остаточных напряжений и повышению прочностных характеристик шва, хотя и требует более мощного инструмента и точного контроля параметров. Экспериментальные исследования фиксируют рост прочности и твёрдости соединений и уменьшение пористости при UWFSW по сравнению с FSW в воздухе.

В ЕС реализуется стратегическая линия на сочетание UWFSW и робототехники: проект RESURGAM нацелен на создание робота-краулера, способного крепиться к борту судна и выполнять ремонт дефектов стального корпуса методом FSW непосредственно на плаву. Оценки показывают, что широкое внедрение FSW в судостроении и ремонте может снизить совокупные затраты до 15% и сократить сроки производства на треть, что выражается сотнями миллионов евро экономии ежегодно для европейского флота. В Корее и Японии исследования по UWFSW пока в основном ограничиваются академическими работами по алюминиевым и другим сплавам, без сопоставимых по масштабу демонстрационных проектов для судовых корпусов.

Заключение

Сравнение трёх технологий показывает, что они не конкурируют напрямую, а занимают разные ниши. Коффердамы в ЕС остаются надёжным инструментом ремонта в сухой среде без дока, особенно там, где есть развитая портовая инфраструктура и налаженное взаимодействие с классификационными обществами. Подводные роботы уже радикально меняют практику очистки и инспекции в Корее, Японии и Европе, снижая зависимость от водолазов и обеспечивая регулярность обслуживания, что напрямую влияет на топливную эффективность и выполнение экологических норм. FSW и UWFSW, особенно в формате роботизированных систем, открывают перспективу по-настоящему подводного ремонта ряда дефектов без установки коффердама и без выхода в док, но требуют дальнейшей стандартизации, отработки процедур одобрения и накопления долгосрочной эксплуатационной статистики [2].

В ближайшие годы в ЕС можно ожидать расширения пилотных применений роботизированного FSW-ремонта и постепенную интеграцию таких решений в практику крупных верфей и сервисных компаний; в Южной Корее - углубление связки «роботизированная очистка и инспекция - оптимизация графиков докового ремонта»; в Японии - дальнейшее развитие высоконадёжных робототехнических платформ и их адаптацию к ремонтным операциям в рамках крупных корпоративных программ обслуживания флота. Таким образом, переход к комплексным системам подводного ремонта корпусов уже начался, но идёт с разной скоростью и под влиянием специфики регуляторной среды и структуры флота в каждом из трёх рассматриваемых регионов [4].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Song C., Cui W. Review of Underwater Ship Hull Cleaning Technologies // Journal of Marine Science and Application. 2020. Vol. 19. № 3. P. 415-429. https://doi.org/10.1007/s11804-020-00157-z

2. Robinson A. ECOsubsea: Closed-Loop Hull Cleaning Is a Regulatory Imperative. Опубл.: 22.03.2025 // Marine Technology News. URL: https://www.marinetechnologynews.com/news/ ecosubsea-closed-cleaning-regulatory-649144 (дата обращения: 03.03.2026).
3. Hull repairs // Hydrex: Exspertise. 2023. URL: https://hydrex.be/turnkey-underwater-repair-solutions/hull-repairs/ (дата обращения: 01.03.2026).
4. Park D, Han J-B, Yeu T, Cho S-g, Kim S, Kim H, Lee Y. Development of an Autonomous Cleaning Robot with a Hydraulic Manipulator Arm for the Cleaning of Niche Areas of a Ship Hull // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11 № 5. P. 973. https://doi.org/ 10.3390/jmse11050973.

УДК 621.577
Дворецкий Руслан Александрович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Dvoretsky Ruslan Aleksandrovich, Student, Komsomolsk-on-Amur State University
Баранов Евгений Витальевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Baranov EvgenyVitalievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВОГО НАСОСА РАБОТАЮЩЕГО ОТ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
HEATING OF SEPARATE SYSTEMS USING A DIESEL-POWERED HEAT PUMP

Аннотация. В статье рассматривается одно из перспективных направлений автономного теплоснабжения — использование теплового насоса с приводом от дизельного двигателя и глубокой утилизацией теплоты продуктов сгорания и охлаждающей жидкости. Эту энергию возможно направить для обеспечения теплом отдельных объектов (частных домов, удаленных зданий, вахтовых поселков), не подключенных к централизованным сетям тепло- или электроснабжения. Обоснована актуальность такого решения в условиях необходимости повышения энергоэффективности и снижения зависимости от дизельного топлива. Приведена принципиальная схема системы из дизельного двигателя, теплового насоса, потребителя и теплообменников. Выполнено сравнение данной схемы с одним из традиционных решений и показано, что поток тепловой энергии, переданный потребителю, может в 2 - 2,3 раза превышать низшую теплоту сгорания дизельного топлива. Рассмотрены основные особенности эксплуатации подобных систем и сделаны выводы о целесообразности применения таких решений для теплоснабжения отдельных объектов.
Abstract. The article discusses one of the promising areas of autonomous heat supply — the use of a heat pump powered by a diesel engine and deep utilization of the heat of combustion products and coolant. This energy can be used to provide heat to individual facilities (private homes, remote buildings, shift settlements) that are not connected to centralized heat or electricity supply networks. The relevance of such a solution is justified in the context of the need to increase energy efficiency and reduce dependence on diesel fuel. A schematic diagram of a system consisting of a diesel engine, a heat pump, a consumer, and heat exchangers is presented. This scheme is compared with one of the traditional solutions and it is shown that the flow of thermal energy transferred to the consumer can be 2 - 2.3 times higher than the lowest heat of combustion of diesel fuel. The main features of the operation of such systems are considered and conclusions are drawn about the expediency of using such solutions for heat supply of individual facilities.
Ключевые слова: тепловой насос, теплоснабжение, дизельный двигатель, автономность, экономия топлива, энергоэффективность.
Key words: heat pump, heating, diesel engine, autonomy, fuel economy, energy efficiency.

Введение

Современный энергозависимый уровень жизни и объекты энергопотребления, удаленные от централизованных сетей, делают особо значимыми варианты выработки и снаб-

жения потребителя тепловой энергией в условиях невозможности подключения его к газовым магистралям или к сетям теплоснабжения. Этими объектами в современной России могут быть: частные домовладения, фермерские хозяйства, вахтовые поселки, небольшие предприятия. Традиционным решением в этом случае будет установка жидко- и твердотопливных котлов или электрических котлов с соответствующими недостатками этого решения: высокой стоимости топлива и низкой энергоэффективностью. Другой вариант – это установка тепловых насосов, которые могут обогревать помещения с помощью низкотемпературного тепла окружающей среды, но они требуют стабильного электроснабжения, что, учитывая большие площади нашей страны, не всегда выполнимо.

Перспективным энергоэффективным решением является применение теплового насоса с приводом от дизельного двигателя. Такая система объединяет в себе преимущества теплового насоса (возможность генерировать тепловую энергию из низкотемпературной окружающей среды с высоким коэффициентом преобразования тепловой энергии) и достоинствами дизельного двигателя (экономичность, автономность). Помимо этого данное сочетание дизельного двигателя и теплового насоса позволяет утилизировать энергию уходящих газов и системы охлаждения двигателя, что увеличивает общий коэффициент преобразования химической энергии топлива в тепловую энергию.

Основная часть

Система, состоящая из теплового насоса, работающего от привода – дизельного двигателя, показана на рис. 1. Дизельный двигатель 1 передает через вал и муфту крутящий момент на компрессорный тепловой насос 2. Охлажденный теплоноситель от потребителя тепловой энергии 3 поступает на насос 4, затем проходит через теплообменник 5, где нагревается от горячих продуктов сгорания, идущих от работающего дизельного двигателя, затем нагретый теплоноситель поступает в теплообменник 6, где его нагревают от энергии антифриза, циркулирующего в системе охлаждения дизельного двигателя. После этого теплоноситель поступает в тепловой насос, где он получает тепловую энергию от низкотемпературной среды и затем по трубопроводу направляется к потребителю тепловой энергии.

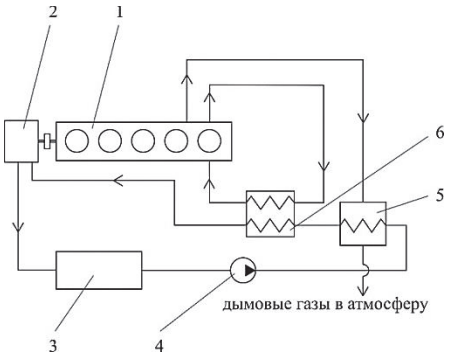


Рис. 1. Схема работы дизельного двигателя с тепловым насосом

Суммарный объем тепловой энергии, поступающий к потребителю тепловой энергии, будет складываться из нескольких тепловых потоков. Во-первых, это тепло, утилизированное в теплообменнике 4 от тепловой энергии выхлопных газов. Во-вторых, это поток тепла, переданный в теплообменнике 6 из системы охлаждения двигателя. В третьих, это тепловая энергия, которую тепловой насос передал от низкотемпературной среды, и большая часть энергии работы двигателя.

В качестве низкотемпературной среды могут выступать воздух окружающей среды, но недостатком этого варианта будет низкий коэффициент преобразования энергии в зимний период вследствие глубоких минусовых температур воздуха. Замена воздуха в качестве источника низкотемпературной среды на воду из водоемов будет энергоэффективной альтернативой. В некоторых вариантах можно использовать энергию грунта земли. Это усложняет схемы установок и требует дополнительного оборудования, но при этом коэффициент преобразования энергии в зимний период не будет зависеть от температуры окружающего воздуха.

Общая теплопроизводительность может быть рассчитана из следующего уравнения:

$$Q_{\text{тепло}} = Q_{\text{насоса}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{выхлоп}}$$

где: $Q_{\text{тепло}}$ – суммарный объем энергии, переданный потребителю тепловой энергии, кВт; $Q_{\text{насоса}}$ – энергия, переданная тепловым насосом от низкотемпературной среды, с учетом его механической работы, кВт; $Q_{\text{охл}}$ – поток тепловой энергии, переданный от жидкости, циркулирующей в системе охлаждения двигателя, кВт;$Q_{\text{выхлоп}}$ – энергия от утилизации тепла горячих продуктов сгорания, кВт.

При охлаждении дымовых газов до низких температур (до 40-50°С) в теплообменнике 5 будет происходить частичная конденсация водяных паров, находящихся в продуктах сгорания. В этом случае дополнительно утилизируется энергия, скрытая в водяном паре, находящемся в продуктах сгорания, и ее объем можно рассчитать как произведение теплоты парообразования и массового расхода сконденсированных паров. Данный вариант будет показывать большую энергоэффективность только при условии входа в теплообменник 5 теплоносителя охлажденного потребителем до максимально низких температур (до 30°С). Поэтому при условии использовании потребителем энергии тепла на обогрев помещений, следует устанавливать в данных помещениях низкотемпературную систему обогрева. Данная низкотемпературная система обогрева будет отличаться от привычных нам систем отопления (батарей) большой площадью теплообмена, включающую теплообменники под подоконником, теплый пол и теплые плинтуса. В результате этого в вышеуказанной системе отопления, для поддержания приемлемой температуры в помещении, может циркулировать теплоноситель с низкой температурой.

Если сравнить суммарный поток получаемой тепловой энергии вышеуказанной системы $Q_{\text{тепло}}$ и традиционного решения, состоящего из водогрейного котла, то котел будет передавать потребителю порядка 85% - 90% от энергии поступившего топлива. В то же самое время, система глубокой утилизации тепла, состоящая из дизельного двигателя и теплового насоса, при условии равенства четырем коэффициента преобразования энергии в тепловом насосе, частичной конденсации водяных паров в продуктах сгорания и КПД дизельного двигателя, равным 45%, сможет передать потребителю порядка 200% - 230% энергии от энергии поступившего топлива. Другими словами, это решение имеет энергоэффективность в 2,5 раза больше по сравнению с традиционными решениями. Оборотной стороной этой системы будет являться более сложное оборудование, требующее квалифицированной эксплуатации, дороговизна системы и ее установки.

Областью применения таких систем будут следующие варианты.

Автономные дома, временные и передвижные сооружения, фермерские хозяйства и прочие сооружения, расположенные в местах с отсутствующей или нестабильной электрической сетью и без газоснабжения. В этих вариантах обеспечение тепловой энергией возможно от котлов, работающих на привозном твердом или жидком топливе, а рассмотренное выше сочетание дизельного двигателя и теплового насоса позволит при той же самой теплопроизводительности значительно экономить топливо. Ключевым фактором при установке данных систем будет начальная стоимость топлива, так как для удаленных объектов расценки на дизельное топливо могут отличаться в разы от обычных цен. Некоторые северные районы нашей страны могут не иметь круглогодично действующих дорог (например, зимой по ледовым дорогам или ледовым переправам, а летом по речкам) и, следовательно, в этих районах требуется максимальная автономность. Поэтому стоимость топлива в данной местности будет определять срок окупаемости данных систем.

Заключение

Эксплуатация систем сочетающих дизельный двигатель, тепловой насос и систему утилизации тепла для производства тепловой энергии в районах с отсутствием или нестабильным снабжением электрической энергии и газоснабжением представляет значительный интерес. По сравнению с традиционными решениями данный вариант позволит уменьшить потребление топлива в 2,5 раза при одинаковой теплопроизводительности. Но серьезным минусом таких систем будет являться значительно большая стоимость оборудования и тех-

нически более сложная эксплуатация. Фактором, определяющим применение таких систем, будет начальная стоимость топлива в данной местности. Развитие таких систем связано с увеличением степени автоматизации и надежности оборудования, сочетанием с солнечными панелями, ветрогенераторами или солнечными коллекторами для дальнейшего снижения потребления топлива. В дальнейшем развитие таких систем будет приводить к тенденциям децентрализации систем теплоснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кропис Ю.Н., Муравейников С.С., Никитин А.А., Рябова Т.В., СулинА.Б., Тепловые насосы. СПб: Университет ИТМО, 2022. 76 с.

2. Бабакин Б. С, Суслов А. Э., Фатыхов Ю. А., Эрлихман В. Н.Теплонасосные установки в отраслях агропромышленного комплекса: Учебник / Под ред. проф. Ю. А. Фатыхова. СПб.: Издательство «Лань», 2014. 336 с.

3. Трубаев П.А., Гришко Б.М., Тепловые насосы: учеб.пособие. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 143 с.

УДК 629.735.33:621.9

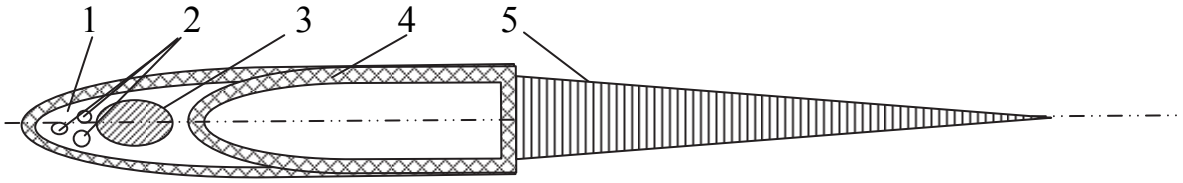
Елпанов Илья Игоревич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Yelpanov Ilya Igorevich, student, Komsomolsk-on-Amur State University.
Марьин Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Maryin Sergey Borisovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПОСТИ ВИНТА ВЕРТОЛЁТА
ANALYSIS OF HELICOPTER PROPELLER BLADES MANUFACTURING METHODS

Аннотация. При выполнении работы были изучены существующие методы производства лопастей винтов вертолётов. Проанализированные методы свидетельствуют об использовании различных технологий и материалов в авиастроении, также выявлены преимущества и недостатки как традиционных, так и инновационных методов их изготовления.
Abstract. When performing the work, the existing methods of production of helicopter rotor blades were studied. The analyzed methods testify to the use of various technologies and materials in the aircraft industry, and the advantages and disadvantages of both traditional and innovative methods of their production were identified.
Ключевые слова: лопасть, ПКМ, формообразование, несущий винт, рулевой винт, летательный аппарат.
Key words: blade, PMC (Polymer Composite Materials), shaping, main rotor, tail rotor, aircraft.

Введение

Лопасть – это ключевой элемент несущего винта вертолета, определяющий его летные характеристики и безопасность эксплуатации. Конструкция лопасти показана на рисунке 1. Анализ методов изготовления лопастей винтов охватывает различные технологии, материалы и подходы, которые применяются в авиационной отрасли. Выбор метода зависит от типа винта, требований к прочности, весу, эксплуатационной надёжности и других факторов. В данной работе мы изучим достоинства и недостатки методов изготовления лопастей вертолетов из различных материалов, приведем примеры технологий изготовления лопастей. Наиболее распространёнными являются лопасти, изготовленные из композитных материалов. Основной причиной для этого является легкость композитных лопастей в сравнении с металлическими при сохранении прочих характеристик. Изменения веса лопасти несущего винта от диаметра винта показано на рисунке 2 [1].



1 – носовая часть, 2 – противофлаттерные грузы, 3 – нагревательный элемент, 4 – лонжерон, 5 – хвостовая часть

Рис. 1. Членение лопасти несущего винта вертолета

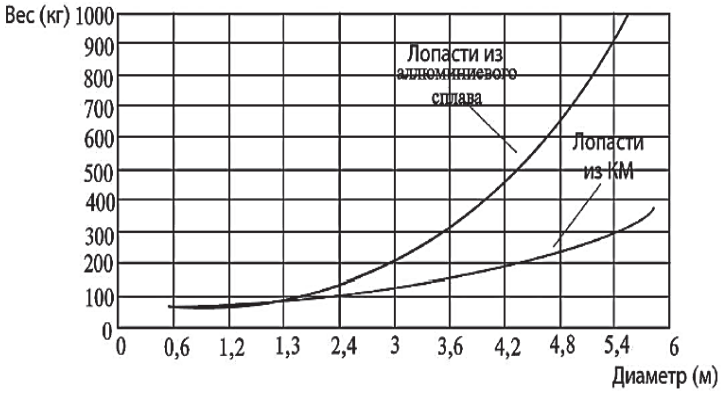


Рис. 2. Диаграмма сравнения веса лопасти из КМ и алюминиевых сплавов

Анализ методов производства лопастей

Рассмотрим методы изготовления лопастей из различных материалов

1. Металлические лопасти.

Изготовление металлической лопасти несущего винта вертолёта – это сложный процесс, сочетающий точную механическую обработку, сварку, термообработку и строгий контроль качества. Хотя сегодня большинство вертолётов используют композитные лопасти, металлические конструкции всё ещё применяются. Примеры вертолетов, в которых применяются металлические лопасти Ми-6 и Ка-25.

Достоинства металлических лопастей:

- высокая прочность и жёсткость;
- высокая ремонтопригодность;
- предсказуемость свойств материала.

Недостатки металлических лопастей:

- большой вес;
- склонность к коррозии.

2. Композитные лопасти.

Лопасти для таких вертолётов как Ка-52, Ка-50, Ми-171 изготавливают из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе стеклопластика, углепластика, арамидного волокна с различными наполнителями.

Достоинства композитных лопастей:

- высокая удельная прочность и жёсткость;
- высокая усталостная долговечность;
- коррозионная стойкость и устойчивость к агрессивным средам;
- снижение вибраций и шума в полёте.

Недостатки композитных лопастей:

- высокая себестоимость материалов и производства;
- низкая сдвиговая жёсткость тонкостенных элементов;
- низкая эрозионная стойкость (требует использования абразивостойких материалов для передних кромок);
- сложность ремонта по сравнению с металлическими лопастями;
- риск хрупкого разрушения [2].

Основные методы изготовления композитных лопастей:

Автоклавное и вакуум-автоклавное формование.

Наиболее широко применяется в самолетостроении. Для этих методов характерно использование препрегов и пропитанных жидкой смолой тканей. Формование изделия из препрегов или тканей с жидкой смолой ведется в специальном устройстве – автоклаве. Автоклав позволяет автоматически создавать заданное давление до 10-15 атм (кг/см^2), температура при этом может быть доведена до 250^{0}С.

Сущность формования автоклавным методом состоит в том, что в пресс-форму или на специальную болванку выкладывают препреги или пропитанные связующим ткани, укладывают дренажные ткани и другие вспомогательные материалы, всю сборку помещают в вакуум-мешок, затем устанавливают в автоклав, и проводят отверждение по заданной программе. К вакуумному мешку присоединяют установку для отсоса воздуха, под вакуумным мешком создается вакуум, проводят отсос воздуха в течение 30 минут, за это время удаляются пузырьки воздуха из связующего и воздуха между слоями препрега и вакуумную систему отключают. Затем включают режим автоклавного формования.

При вакуум-автоклавном формовании за счет использования вакуум-мешка пузырьки воздуха, находящиеся в связующем, отсасываются вместе с остальным воздухом, т. е. из связующего удаляются при отсосе воздуха летучие вещества, газы и пузырьки воздуха в этом случае изделие будет более сплошным, без пустот. При этом методе качество выше, чем при автоклавном формовании.

Прессование.

Является широко распространенным процессом переработки композитного материала в изделие, при котором препрег помещается в пресс-форму. При нагревании пресс-формы до температуры отверждения под механическим или пневматическим давлением проходит отверждение связующего за определенный промежуток времени.

Прессование ведут одним из следующих способов: эластичной средой (например, полиуретан), жестким пуансоном, упругим телом (сжатым воздухом или газом, сухим паром). Избыточное давление в установках создают либо вакуумированием, либо в пресскамерах с эластичной оболочкой, либо в автоклавах.

Метод пресс-камеры с эластичной оболочкой применяется для изготовления тонкостенных замкнутых контуров типа лонжеронов лопастей несущих винтов вертолета, элеронов для легких самолетов.

Сущность метода состоит в том, что предварительно отформованные пакеты изделия помещают в пресс-форму. Внутрь изделия предварительно закладывается прорезиненная эластичная оболочка. Внутрь оболочки через штуцера подается давление формования (0,6 – 0,9 МПа), которое прижимает формуемый контур к рабочей поверхности пресс-формы. После определенной выдержки во времени при температуре отверждения связующего проходит отверждение и получают готовое изделие. Пресс-форма снабжена термонагревательными элементами, формование идет в течение 6 – 10 часов. Если нет нагревателей в пресс-форме, то формование идет в термопечи.

Намотка.

С помощью этого метода можно получать трубчатые изделия, оболочки вращения, цилиндры, конуса. Для получения изделий со сложнопеременными сечениями по длине необходимо использовать станки с числовым программным управлением, что значительно усложняет технологию получения изделия, увеличивает его стоимость.

Метод намотки позволяет получать изделия с наиболее высокими деформационно-прочностными характеристиками.

При мокрой намотке принята следующая последовательность технологических операций: приготовление связующего, пропитка лент или волокон в пропиточной машине, намотка пропитанного наполнителя на оправку, обмотка полученного изделия полиэфирной, полипропиленовой или полиамидной пленкой (или эластичней цулагой), установка сборки в термошкаф и отверждение, удаление оправки, контролирование качества готового изделия.

Сухая намотка труб препрегами или сухой лентой приобретает все большую популярность, и в настоящее время этот метод является основным способом изготовления авиационных трубопроводов, удилищ, клюшек, теннисных ракеток.

В этом случае операции приготовления связующего и пропитка им наполнителя исключается, что значительно упрощает процесс и делает его менее грязным (повышается культура производства).

При всех разновидностях намотки с технологической точки зрения целесообразно при намотке нагревать оправку до температуры 60^0С.

Выводы

В статье представлена информация о технологии изготовления лопастей винтов вертолетов, изучены недостатки и достоинства применения материалов, и представлены примеры используемых в данный момент времени способов изготовления лопастей. По итогу анализа процессы производство характеризуются требованиями к характеристикам лопасти и ограничениями по материалам, оборудованию и специалистам. Современные лопасти для пилотируемых вертолётов изготавливают из композитных материалов так, как имеется необходимая для этого материальная база и при этом характеристики полученных лопастей равны или превосходят те, что могут иметь металлические лопасти, при уменьшении обшей массы конструкции. Исключением выступают случаи, когда кокой-либо недостаток композитных лопастей является критическим в условиях работы лопасти.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Б.Н Слюсарь, М Б. Флек, Е.С. Гольдберг и др. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 20 1 3. – 230 с. – ISBN 978-5- 4358-0056-2.

2. Бохоева Л.А., Пнев А.Г. Выбор и обоснование оптимальной технологии изготовления лопасти вертолета из композиционных материалов // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – № 5

УДК656.02

Жестков Алексей Васильевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zhestkov Alexey Vasilyevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Красильникова Ольга Алексеевна, кандидат технических наук, декан факультета авиационной и морской техники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Krasilnikova Olga Alekseevna, Candidate of Engineering Sciences, Dean of the Faculty of Aviation and Marine Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАВКИ ИЗВЕСТИ ИЗ КИТАЯ В РОССИЮ
ECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR THE SUPPLY OF LIME FROM CHINA TO RUSSIA

Аннотация. В работе рассмотрена поставка извести из Китая на Дальний Восток, с применением мультимодальной логистической схемы транспортировки, Произведен расчет продолжительности доставки, стоимости перевозки одного биг-бэга, грузоподъемностью одна тонна. Дано технико-экономическое обоснование целесообразности данных поставок.

Abstract. The paper considers the supply of lime from China to the Far East, using a multimodal logistics transportation scheme. The paper calculates the delivery time and the cost of transporting one big bag with a capacity of one ton. The paper provides a technical and economic justification for the feasibility of these deliveries.

Ключевые слова: мультимодальная логистическая схема, транспортный маршрут, биг-бэг, морской транспорт, железнодорожный транспорт, продолжительность маршрута, стоимость перевозки.

Key words: multimodal logistics scheme, transport route, big bag, sea transport, railway transport, route duration, and transportation cost.

Введение

Российский рынок извести в 2025–2026 годах характеризуется высокой степенью самообеспеченности и умеренной волатильностью.

В 2025 году объем производства составил около 11,79 млн тонн, что на 1,6 % ниже уровня 2024 года. На начало 2026 года сохраняется тренд на стабилизацию: в отдельные месяцы 2025 года (например, в марте) наблюдалось снижение производства на 6,1 % в годовом выражении.

На рынке наблюдается устойчивый тренд на импортозамещение. Доля импорта в общем объеме потребления остается невысокой, так как известь – дешевый и тяжелый товар, логистика которого на большие расстояния существенно увеличивает себестоимость.

Импорт из стран дальнего зарубежья, включая Китай, носит локальный характер и часто направлен на удовлетворение спроса в приграничных регионах, таких как Дальний Восток.

Основная часть

При мультимодальной перевозке из Китая негашеной извести наиболее эффективны следующие решения [1]:

1) мягкие контейнеры (биг-бэги/МКР): используются специализированные влагонепроницаемые модели с полипропиленовым ламинированием и полиэтиленовым вкладышем толщиной не менее 80–100 микрон. Это критично для морского плеча пути, чтобы соленый морской воздух не вызвал преждевременную реакцию.

Для негашеной извести массой 1 т размеры биг-бэга определяются её насыпной плотностью, которая для молотой негашеной извести в среднем составляет 900–1100 кг/м³. Следовательно, для размещения 1 т груза требуется объем около 1,0–1,1 м³.

Наиболее распространенный стандарт биг-бэга для такого объема:

- основание: 95 х 95 см;
- высота загрузки: 120 см;
- полная высота (с петлями): 150 см.

Биг-бэги с основанием 95х95 см после загрузки немного «раздуваются» в диаметре до 100–105 см и уменьшаются в высоте до 110 см (рис. 1);



Рис. 1. Негашеная известь в биг-бэгах

2) контейнеризация: биг-бэги загружаются в 20-футовые герметичные морские контейнеры (Dry Van). Это защищает груз от атмосферных осадков при перевалке в порту Находка (рис. 2) . В табл. 1 представлены характеристики 20-ти футового контейнера.

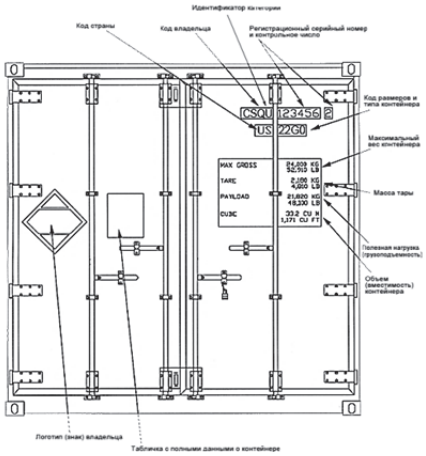


Рис. 2. Стандартный 20-футовый грузовой контейнер с маркировкой

Учитывая размеры биг-бэгов с известью и внутренние размеры 20-футового контейнера, можно сделать вывод:

- в один ряд по ширине контейнера встает 2 биг-бэга;
- в один 20-футовый контейнер обычно входит 20 биг-бэгов (в два ярус), что суммарно дает 20 тонн груза (нетто масса).

Таблица 1

Характеристики 20-ти футового контейнера

Размеры	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
Внешние	20' = 6096	7' 9.25" = 2370	8' 6" = 2591
Внутренние	19' 5.75" = 5935	7' 8" = 2335	7' 9.75" = 2383
Двери	-	7' 8" = 2335	7' 6.25" 2292
Вес			
Макс. брутто		52910 фунт = 24000 кг	
Тара		4585 фунт = 2080 кг	
Макс. загрузка		48325 фунт = 21920 кг	
Грузовместимость (объём)		1197.25 фут^3 = 34 м^3	

На рис. 3 представлена схема размещения биг-бэгов в контейнере

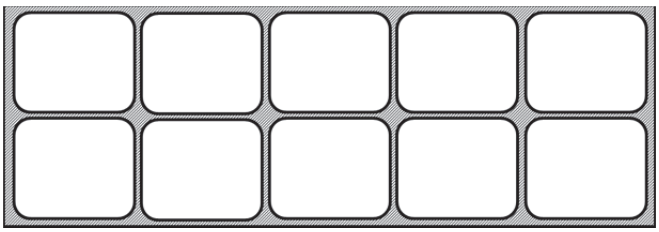


Рис. 3. Схема размещения биг-бэгов в контейнере

Для перевозки извести по морскому участку пути используют контейнеровоз «Капитан Маслов».

На судне Капитан Маслов можно максимально разместить 1748 20-футовых контейнеров (по слотам). Учитывая массу груженного контейнера с известью в биг-бэгах и грузоподъемность контейнеровоза, на нем можно перевести 829 контейнеров, что эквивалентно 16580 биг-бэгов.

Для перевозки груза на железнодорожном участке пути используется железнодорожная платформа модель 13-1281.

На одной железнодорожной платформе перевозится два контейнера, в каждом из которых находится по 20 биг-бэгов извести.

Рассчитаем продолжительность транспортировки груза из Шэньчжэня в Хабаровск. Продолжительность транспортного пути будет складываться из следующих величин: время морского пути, стояночное время, время железнодорожного пути.

Таблица 2

Продолжительность морского участка пути

Показатель	Значение
Стояночное время под погрузкой в порту отправления t_n^1, сут.	1,84
Продолжительность вспомогательных операций $t_{всп.погр}^1$, сут.	0,18
Общее стояночное время под погрузкой в порту отправления $t_{ст.п}^1$, сут.	2,02
Выгрузка, время грузовое под выгрузкой в порту назначения $t_{выгр}^1$, сут.	1,84
Продолжительность стоянки под вспомогательными операциями в порту назначения $t_{всп.выгр}^1$, сут.	0,18
Общее стояночное время в порту назначения $t_{ст.п}$, сут.	2,02
Общее стояночное время за рейс $t_{ст.р}$, сут.	4,04
Ходовое время в грузу $t_{х.гр}$, сут.	4,45
Продолжительность рейса $t_р$, сут.	8,49

Продолжительность железнодорожного участка пути, рассчитанного с помощью программы Rail-тариф [2] и составляет 7 суток.

Общая продолжительность доставки извести из Шэньчжэня по выбранному маршруту в Хабаровск составляет 15,49 суток.

Рассчитаем стоимость перевозки одного биг-бэга, грузоподъемностью одна тонна, при транспортировке из Шэньчжэня в Хабаровск.

В табл. 3 представлены расчетные показатели работы судна.

Таблица 3

Экономические показатели работы судна

Наименование параметра	Значение
Расходы судна за рейс, $R_{Р.}$, р.	7070961
Прямые постоянные расходы, $R_{пост}^{пр}$, р.	1789247
Расходы на амортизацию, $R_{ам}$, р.	396675
Расходы на ремонт, $R_{рем}$, р.	39667
Расходы на содержание экипажа, $R_{эк}$, р.	877993
Расходы на малоценный инвентарь, $R_{мал}$, р.	42028,18
Расходы на судовые сборы и агентирование, $R_{сб}$, р.	54538
Косвенные расходы, $R_{косв}$ р.	85202
Переменные расходы, $R_{пер}$ р.	5281714
Количество дизельного топлива на рейс, Qрдт, т	32,12
Количество мазута на рейс, Qрмаз, т	114,56
Себестоимость перевозки 1 конт., $S_Т$, р.	8530

Таким образом, себестоимость перевозки одного контейнера извести морским транспортом составляет 8530 руб. Основные расходы связаны с переменными затратами, а именно расходами на дизельное топливо и мазут.

Поскольку в контейнере перевозится 20 биг-бэгов с известью, то себестоимость перевозки одной тонны извести морским транспортом составляет – 427 руб.

Стоимость перевозки одной тонны извести железнодорожным транс-портом с морского порта Находка до города Хабаровск производился в программе Rail-тариф [2] и составляет 2 023 руб.

Дополнительные затраты в порту Находка связаны с взвешиванием груза, погрузкой и выгрузкой, хранением, проведением таможенного контроля, оформлением документов и составляют 625 руб. за одну тонну груза за контейнер.

В табл. 4 представлена сквозная тарифная ставка перевозки одного биг-бэга.

Таблица 4

Тарифная ставка перевозки одного биг-бэга

Наименование	Значение
Стоимость перевозки морским транспортом, р.	427
Стоимость перевозки железнодорожным транспортом, р.	2023
Дополнительные затраты в порту, р	625
Общая стоимость перевозки одного биг-бэга извести, р.	3 074

Заключение

Китай в 2025–2026 годах удерживает статус мирового лидера по мощностям производства энергоемких строительных материалов. К началу 2026 года экспорт Китая достиг рекордных показателей в стоимостном выражении ($3,7 трлн в 2025 году), что поддерживается низкой себестоимостью производства и развитой логистикой**.**

Для потребителей в Хабаровске экспорт извести из Шэньчжэня является экономически оправданным в условиях дефицита локальных мощностей или специфических требований к качеству (например, высокой активности негашеной извести). В 2025 году импорт из Китая в РФ в целом претерпел небольшое снижение (-2,4 %), но остается стратегически важным каналом поставок для восточных регионов страны.

На динамику реализации в 2026 году продолжают влиять дефицит персонала в добывающей отрасли и логистические ограничения Восточного полигона. Однако инвестиции в производство извести внутри России растут, что ведет к постепенному вытеснению дорогого импорта в центральных регионах при сохранении поставок из Китая на Дальний Восток.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Троицкая Н. А. Транспортно-технологические схемы перевозок отдельных видов грузов: учебное пособие для вузов. М.: КноРус, 2010. 231 с.

2. Расчет железнодорожного тарифа. // R-TARIFF.com. URL: http://r-tariff.com (дата обращения 17.02.2026)

3. Назаренко В.М., Назаренко К.С. Транспортное обеспечение внешне экономической деятельности. Москва: Центр экономики и маркетинга, 2000. 512 с.

УДК 629.5.023:004.92

Журбина Елена Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zhurbina Elena Nikolaevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Аксёнова Ольга Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Aksenova Olga Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бурменский Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Burmensky Andrey Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ КОРПУСНЫХ СЕКЦИЙ В CAD-СИСТЕМЕ КОМПАС-3D
PRINCIPLES OF MODELING VOLUMETRIC HULL SECTIONS IN THE KOMPAS-3D CAD SYSTEM

Аннотация. Развитие отечественными IT-компаниями собственных PLM-решений в области судостроения ставит перед учебными заведениями задачу по опережающему внедрению нового инструментария цифрового моделирования объектов морской техники в учебный процесс. При этом возникают определенные сложности в преподавании методики моделирования таких сложных объектов как, например, морских судов. Это связано и с большими раз-

мерами объектов моделирования, содержащих тысячи конструктивных элементов, и с постоянным развитием инструментария моделирования. В статье рассматриваются основные принципы моделирования объемных корпусных секций, которые могут быть реализованы различными методами и способами компьютерного моделирования.
Abstract. The development of domestic PLM solutions in shipbuilding by domestic IT companies poses the challenge for educational institutions to proactively integrate new digital modeling tools for marine equipment into the educational process. However, teaching the modeling methodology of complex objects such as sea vessels presents certain challenges. This is due to the large size of the modeled objects, containing thousands of structural elements, and the constant evolution of modeling tools. This article examines the basic principles of modeling three-dimensional hull sections, which can be implemented using various computer modeling methods and techniques.
Ключевые слова: судостроение, 3D-модель судна, компьютерное моделирование, CAD-система Компас-3D.
Key words: shipbuilding, 3D model of a ship, computer modeling, CAD system Kompas-3D.

Введение

Увлечение отечественными судостроительными предприятиями (в том числе конструкторскими бюро) зарубежными тяжелыми судостроительными САПР, привело к отставанию в развитии отечественных решений в данной области. И только принятие в 2015 решения Правительства России по импортозамещению программного обеспечения, в том числе и в судостроительной отрасли, дало толчок развитию отечественных PLM-решений для различных отраслей промышленности. Так консорциум из ведущих IT-компаний «РазвИТие» разработал дорожную карту по созданию отечественной «тяжелой» судостроительной PLM-системы на базе решений компании АСКОН, которая является разработчиком пока единственного в России математического ядра C3D [1].

Основой этой системы является CAD-система Компас-3D, которая является базовым инструментарием по разработке цифрового макета (цифрового двойника) судна. На первом этапе специалистами компании был выполнен реверс-инжиниринг 3D-модели корпуса судна-нефтесборщика. Функционал Компас-3D показал, что даже при использовании стандартных инструментов CAD-системы возможно моделирование судовых корпусных конструкций всего судна [2]. Аналогично в студенческом конструкторском бюро «Морские инженерные технологии» КнАГУ были выполнены проекты по моделированию конструкций с использованием только стандартных инструментов твердотельного моделирования (рис. 1).

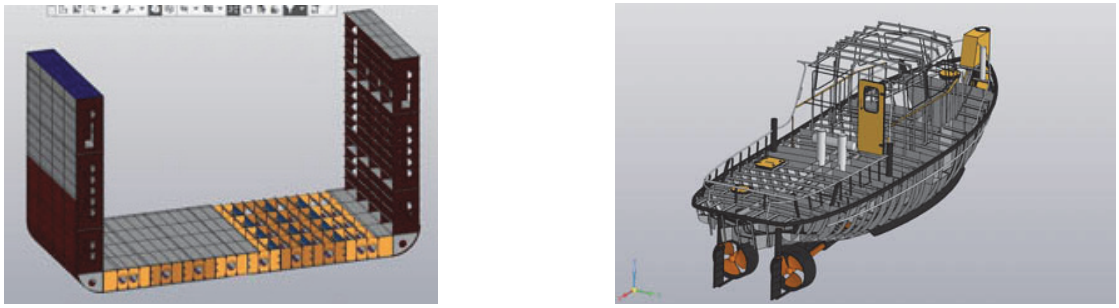


Рис. 1. Примеры моделирования корпусных конструкций инструментами 3D моделирования

Начиная с 19-й версии, был существенно расширен функционал Компас-3D по моделированию судовой поверхности, корпусных конструкций, различного судового оборудования, систем, и т.п. [3]. Развитие специализированного «судостроительного» функционала продолжается из версии к версии CAD-системы.

Соответственно развивается и методология моделирования конструкций корпусов судов. В статье рассматривается один из вариантов методологии моделирования объемных корпусных конструкций судов в Компас-3D.

Базовые принципы моделирования

Следует отметить, что учебные задачи по моделированию конструкции корпуса корабля отличаются от объема задач, решаемых в проектных организациях. Если в реальном процессе реализуется функциональный подход моделирования с переходом к зональному на последних стадиях, то в учебном процессе реально реализовать только зональный подход по моделированию отдельных корпусных секций или блоков. Это связано с ограничением во временных ресурсах, которые можно выделить на освоение того или иного учебного модуля. Однако даже при зональном подходе моделирования следует придерживаться принципов, которые заложены при функциональном подходе.

Основные принципы функционального подхода заключаются в том, что в процессе разработки конструкция корпуса моделируется не по отдельным блокам, а по совокупности в целом. В начале, проводится моделирование судовой поверхности, которая будет играть формообразующую роль для корпусных элементов, примыкающих к ней. Далее, корпус начинает насыщаться полотнищами переборок (поперечных и продольных), палуб, платформ и днищевых стрингеров с учетом принципа рассечения одних элементов другими. На следующем этапе моделируются продольные ребра жесткости, которые без разрыва могут идти от кормовой переборки бака, до носовой переборки машинного отделения. Далее можно переходить к зонально-функциональному принципу, в котором можно уже раздельно моделировать корпусные конструкции в ограниченной зоне корпуса. К чисто зональному принципу моделирования переходят после разбиения корпуса на укрупненные технологические единице: блоки и секции.

В учебном моделировании отдельных корпусных блоков или секций реализуется зональный принцип, но с частичным учетом функционального принципа на первых этапах.

Методика моделирования

Рассмотрим обобщенную методику моделирования днищевой секции контейнеровоза в районе цилиндрической части корпуса.

На первом этапе производится моделирование судовой поверхности в районе секции. Тут может быть два подхода:

- моделирование судовой поверхности в специальных программах (например, в CAD-системе FreeSHIP) с последующим ее импортом в модель секции в формате IJES;
- непосредственное моделирование судовой поверхности инструментами поверхностного моделирования Компас-3D (рис. 2).

В отдельной сборке формируется набор теоретических плоскостей в плоскостях которых будут размещаться конструктивные элементы. Построение данные плоскостей выполняется с помощью инструмента «смещенная плоскость». Данная модель будет представлять собой «цифровой плаз» (рис. 3) [4].

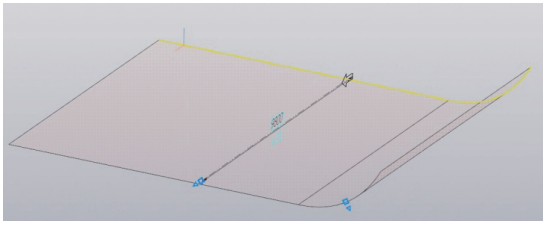


Рис. 2. Моделирование судовой поверхности

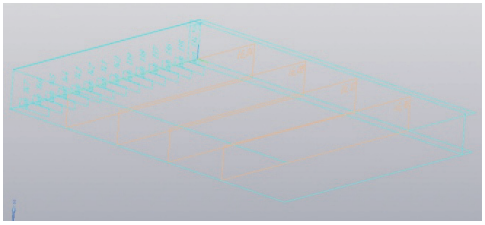


Рис. 3. «Цифровой плаз»

«Цифровой плаз» и поверхность корпуса вставляются в сборку «Днищевая секция» в качестве опорной геометрии с помощью команды «Добавить компоновочную геометрию из файла …».

Далее моделирование выполняется по принципу «сверху-вниз». В модель общей сборки добавляются подсборки, которые в свою очередь состоят из отдельных деталей. Сам процесс моделирования деталей в начале осуществляется в контексте сборки. В этом случае определяются габаритные размеры деталей. При этом следует использовать привязки к «теоретическим» плоскостям «электронного плаза» или к поверхностям, построенных на их основе. Такой подход позволяет получить так называемую полупараметрическую модель конструкции корпуса.

Полностью параметрическую модель корпуса построить невозможно, а вот управляя расположением теоретических плоскостей можно автоматически изменять габаритные размеры листовых деталей, без операций редактирования.

В последующем, для удобства, можно переходить к моделированию деталей в отдельных окнах. Выполнять в них различные вырезы или насыщать подкрепляющим набором, который не имеет привязки к компонентам сборке высшего уровня. Все конструктивные изменения подсборок или деталей будут отображаться в общей сборке.

Для редактирования деталей в составе сборки можно воспользоваться режимом отображения «управление сечениями». С помощью данной команды можно настроить режим отображения рабочего района моделирования, находящегося внутри сложной сборки (рис.4).

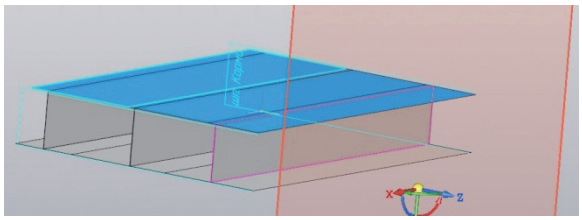


Рис. 4. Настройка режима отображения сечений

Во всяком случае, необходимо начинать моделирование с таких конструктивных связей, которые являются неразрезными и формируют основные габариты объемной корпусной секции, а также определяют размеры внутренних конструктивных элементов. Для днищевой секции, наряду с днищевой обшивкой корпуса, такой связью является настил двойного дна. На следующем этапе переходят к моделированию внутренних «неразрезных» элементов: днищевые стрингера и ребра жесткости основного набора (рис. 5). Для моделирования стрингеров используем команду «пластина по грани», а ребер жесткости – «профиль по кривой».

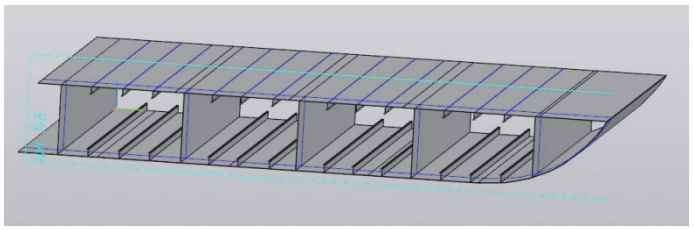


Рис. 5. Неразрывные продольные связи

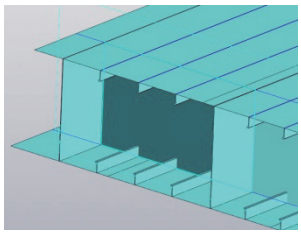


Рис. 6. Процесс моделирования бракет

Далее переходим к моделированию листовых разрезных элементов – бракет рамных флоров. Для этого вначале формируем внутренний контур расположения бракет между стрингерами с помощью команды «кривая пересечения». Далее моделируем грань в виде линейчатой поверхности на основе сформированного контура. И заканчиваем построение командой «пластина по грани» (рис. 6). После формирования листа бакеты, с помощью команды «прокол», формируем вырезы для прохода ребер жесткости основного набора днища и второго дна (рис. 7 и 8).

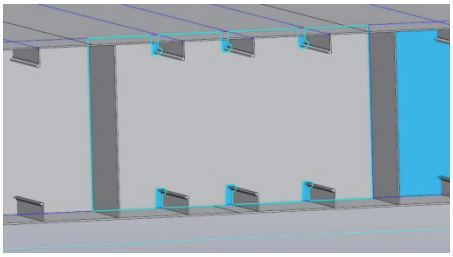


Рис. 7. Результаты выполнения команды «прокол»

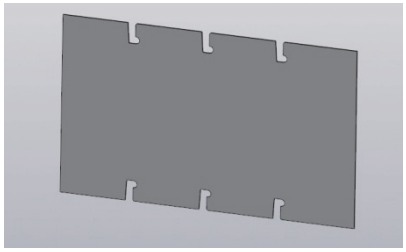


Рис. 8. Лист бракеты с вырезами

На последующих этапах производится моделирование вырезов в деталях, формирование подкрепляющего набора в виде ребер жесткости и книц.

На последнем этапе моделирования выполняется разбиение поверхностей обшивки корпуса и настила второго дна на отдельные листы различной толщины (рис. 9).

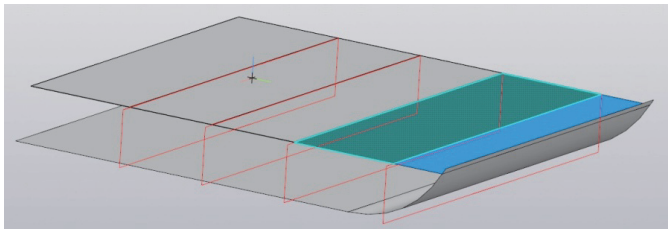


Рис. 9. Формирование листов настила второго дна

Заключение

Рассмотренные основные принципы и приведенная последовательность моделирования объемных корпусных секций позволяет достаточно эффективно разрабатывать в Компас-3D цифровые модели корпусных блоков и секций любой сложности.

Однако опыт моделирования показал, что требуется доработка отдельного инструментария моделирования. Например, пока не работают опции «плотное примыкание» и «продолжать до исходных границ» команды «пластина». Надеемся, что в новых версиях CAD-системы инструментарий моделирования будет дорабатываться и развиваться дальше.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров А.С. Новые инструменты консорциума "РазвИТие" для задач судостроения / А. С. Петров // Судостроение. 2020. № 6(853). С. 41-43.

2. Как мы проверили судостроительные способности КОМПАС-3D. Опубл.: 26.06.2018 // АСКОН. URL: https://ascon.ru/news_and_events/news/2739/ (дата обращения: 02.04.2026)

3. Гончаров А.С., Бурменский А.Д. Анализ развития CAD-системы КОМПАС-3D в области моделирования корпусных конструкций судов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 г. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. Ч 1. С. 528-531.

4. Даманский Д.В., Бурменский А.Д. Практический опыт использования новых инструментов моделирования судовых конструкций в КОМПАС-3D // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. Ч 1. С. 232-235.

УДК 593.3

Кравченко Андрей Константинович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Andrey Konstantinovich, post graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

Марьин Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Maryin Sergey Borisovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТРОЙНИК»
ANALYSIS OF TEE PARTS MANUFACTURING METHODS

Аннотация. В работе авторами рассмотрены основные существующие методы формообразования деталей типа «тройник». Выявлены определяющие факторы и критерии при выборе способов изготовления тройников, проанализированы преимущества и недостатки как традиционных, так и инновационных способов изготовления тройников. А так же авторами определены направления дальнейших исследований для решения поставленных задач.

Abstract. In the work, the authors considered the main existing methods of forming parts of the "tee" type. Determining factors and criteria were identified when choosing methods for manufacturing tees, the advantages and disadvantages of both traditional and innovative forming methods were analyzed. Ways of further research in this area are outlined.
Ключевые слова: формообразование, штамповка, гидрогазовая система, летательный аппарат.
Key words: shaping, stamping, hydrogas system, aircraft.

Введение

Тройники – это ключевые соединительные элементы гидро-газовых систем, работающие в экстремальных условиях, по которым передаются агрессивные рабочие среды (гидравлические жидкости, топливо, окислители) под высоким давлением, в широком температурном диапазоне (от -60 °С на высоте до +300 °С вблизи двигателей) при воздействии вибрационных и динамических нагрузок. От их надёжности напрямую зависит безопасность летательного аппарата. Разрушение или потеря герметичности тройника может привести к отказу жизненно важных систем самолёта, что чревато катастрофическими последствиями. Традиционные методы изготовления не всегда способны обеспечить стабильное качество и отсутствие дефектов в таких условиях. Поэтому совершенствование методов их изготовления, обеспечивающих максимальную прочность и герметичность – приоритетная задача при обеспечении надежности и безопасности полётов в совокупности с экономической эффективностью и серийностью, обусловленная необходимостью балансировать между высокой стоимостью единичного изделия и затратами на создание технологической оснастки для массового производства.

Анализ основных методов изготовления тройников

Изготовление деталей типа «тройник» для авиастроительной отрасли промышленности осуществляется с применением следующих как традиционных, так и инновационных технологий [1-3].

1. Горячая объёмная штамповка. Заготовку нагревают до пластичного состояния и под высоким давлением формуют в специальной технологической оснастке (штампе). Эта технология дает возможность штамповать детали сложной геометрии, при этом обеспечивая высокие механические свойства материала.

Преимущества:

- оптимальная надежность и прочность деталей;
- возможность получения крупногабаритных деталей;
- повторяемость в серийном производстве.

Недостатки:

- высокая стоимость оснастки (штампов);
- значительные энергозатраты на нагрев.

2. Вытяжка отвода из трубной заготовки. Формообразование происходит за счёт воздействия высокого давления среды (жидкость, эластомер, легкоплавкие наполнители) на внутреннюю поверхность заготовки, помещённой в матрицу. Особенно эффективен для тонкостенных трубчатых деталей.

Преимущества:

- отсутствие сварных швов;
- высокая точность геометрии.

Недостатки:

- ограниченные размеры изделий;
- высокая стоимость оборудования.

3. Отбортовка отверстий в трубе. Этот метод чаще применяется для более толстостенных труб или при крупносерийном производстве. В предварительно вырезанное отверстие трубы овальной формы с большим усилием вдавливается твёрдый пуансон (штамп), имеющий форму будущего раструба. Металл выдавливается по форме пуансона.

Преимущества:

- высокая производительность: быстрый процесс, подходящий для массового производства.
- простота оснастки.

Недостатки:

- риск разрушения: при работе с тонкостенными трубами из малопластичных материалов металл может треснуть или порваться;
- напряжение в металле: в структуре могут возникать остаточные напряжения из-за резкой деформации;
- возрастающее по высоте борта утонение металла.

4. Литьё (по выплавляемым моделям, в кокиль и песчаные формы). В литейные формы разливается расплавленный металл, после застывания которого получается заготовка для последующей механообработки или уже готовая деталь, в зависимости от требований точности. Применяется для сложных конфигураций и крупных размеров.

Преимущества:

- возможность создания сложных форм;
- экономичность при больших сериях.

Недостатки:

- возможные дефекты (поры, раковины);
- необходимость последующей механической обработки.

5. Механическая обработка на станках с ЧПУ. Изготовление из цельной заготовки путём последовательного снятия материала (фрезерование, токарная обработка). Применяется для единичных или мелкосерийных изделий, а также для деталей с особо высокими требованиями к точности.

Преимущества:

- высокая точность и качество поверхности;
- гибкость в производстве различных типоразмеров.

Недостатки:

- значительный расход материала;
- высокая стоимость при массовом производстве.

6. Штамповка заготовок и их сварка. Тройник собирается из отдельных отрезков труб или листовых заготовок с последующей сваркой стыков. Широко используется для трубопроводов различного назначения.

Преимущества:

- универсальность и простота;
- возможность ремонта и модификации.

Недостатки:

- наличие сварных швов, требующих контроля;
- возможные остаточные напряжения в материале.

7. Метод аддитивных технологий. Для изготовления таких деталей используются промышленные аддитивные установки, работающие по технологиям селективного лазерного плавления (SLM) или электронно-лучевого плавления (EBM).

Преимущества:

- сложная геометрия;
- снижение массы;
- скорость прототипирования.

Недостатки:

- стоимость материалов и оборудования;
- качество поверхности;
- длительная программа испытаний и сертификации каждой новой партии порошка и технологии печати.

На рис. 1 изображены детали типа «тройник», полученные рассмотренными выше методами.

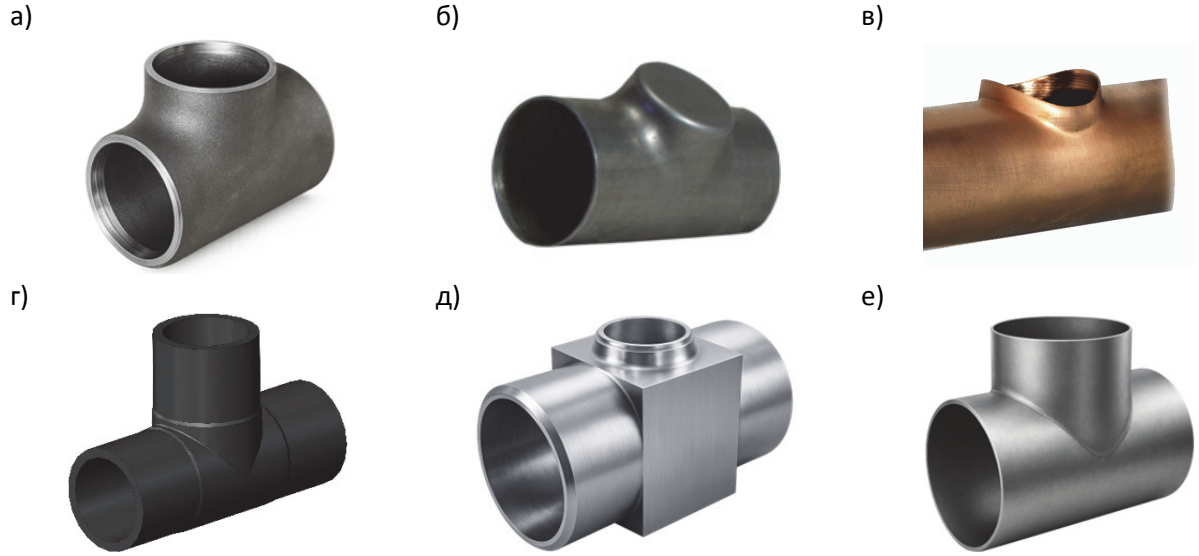


Рис. 1. Детали типа «тройник», полученные методами:
а – горячая объемная штамповка; б – вытяжка отвода из трубной заготовки; в – отбортовка отверстий в трубе; г – литье; д – механическая обработка; е – штамповка и сварка

Выводы

Анализ существующих преимуществ и недостатков рассмотренных методов изготовления деталей «тройник» гидро-газовых систем летательных аппаратов показал, что «идеального» метода формообразования, удовлетворяющего комплексно требованиям безопасности, надежности, прочности, герметичности, массовой характеристики, экономической эффективности, не существует. Однако, при повышении эффективности использования процессов листовой штамповки [4], различными методами которой изготавливается до 75 % деталей планера самолета, возможно достижение оптимального соотношения требуемых технических и экономических характеристик, повышения качества и надежности при изготовлении деталей «тройник» гидро-газовых систем летательных аппаратов.

Заключение

В этой связи, высокую актуальность приобретают вопросы разработки новых и совершенствования существующих технологических процессов формообразования, которые должны обеспечивать высокие механические характеристики материала, качество поверхностей, минимальное искажение формы поперечного сечения деталей и т.д. Таким образом, задачи разработки новых принципиальных способов изготовления деталей типа «тройник» из алюминиевых, стальных, титановых заготовок, а также повышения эффективности существующих способов становится перспективной областью исследований, когда при конкретных производственных условиях необходимо обеспечить производство деталей летательных аппаратов с заданными показателями по качеству при минимальных экономических затратах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Феоктистов, С.И. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов: Учеб. пособие / С.И. Феоктистов, Б.Н. Марьин, С.Б. Марьин, Д.Г. Колыхалов. – Комсомольск–на–Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 92 с. ISBN 5-7765-0477-5.

2. Марьин, Б. Н. Гидрогазовые системы летательных аппаратов / Б. Н. Марьин, С. Б. Марьин, Д.Г. Колыхалов, С.И. Феоктистов [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.

3. Барвинок, В.А. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В. А. Барвинок, А. Н. Кирилин, А. Д. Комаров [и др.]. – Москва : Наука и технологии ООО, 2002. – 430 с. – ISBN 5-93952- 009-X. – EDN YIWLQD.

4. Изготовление трубы свертыванием листовой заготовки / И. В. Лозовский, С. Б. Марьин, В. В. Черномас, А. К. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 12(765). – С. 124-130. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-12-124-130. – EDN XAPDHX.

УДК 697.34
Купрещенко Павел Ляонасович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kupreschenko Pavel Liaonasovich, Student, Komsomolsk-on-Amur State University
Баранов Евгений Витальевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Baranov Evgeny Vitalievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ТЭЦ ДО ПОТРЕБИТЕЛЯ
ANALYSIS OF WAYS TO REDUCE HEAT LOSSES DURING THE TRANSPORTATION OF HEAT ENERGY FROM A CHP TO A CONSUMER

Аннотация. Данная статья раскрывает проблематику теплосбережения, сложившуюся в сегодняшнее время и заключающуюся в экономической выработке тепловой энергии, транспортировке и её потреблении. Целью работы является рассмотрение методов эффективности, экономического потребления и сбережения тепловой энергии. Полученные методы могут быть использованы при разработке более энергоэффективных схем теплоснабжения.
Abstract. This article explores the current challenges of heat conservation, including the economic production, transportation, and consumption of thermal energy. The goal is to examine the methods of efficiency, economic consumption, and thermal energy savings. These methods can be applied in the development of more energy-efficient heating systems.
Ключевые слова: сетевые подогреватели, тепловая сеть, тепловая энергия, потребитель, производство тепла, изоляция трубопроводов, тепловые потери.
Key words: network heaters, heating network, thermal energy, consumer, heat production, pipeline insulation, heat losses.

Введение

Россия является самой большой с особенными климатическими условиями страной, раскинутой по северному полушарию, с огромными запасами энергоресурсов и их потреблением, которые ранее не принято было экономить. В сфере жилищно-коммунального комплекса сохраняется огромный объем зданий, принадлежащий строительству прошлого столетия. При проектировании эти самых зданий не были так широко развиты технологии по теплосбережению, а те, которые были использованы, уже устарели или пришли в негодность. Вследствие устаревших технологий, расход энергоресурсов становится неэффективным, что, в свою очередь, ведет к увеличению расхода оплаты за потребленный ресурс.

В связи с этим, в конце XX века теплосбережение вышло на новую траекторию по применению широкой линейки эффективного оборудования и новых технологий, что позволяет значительно повысить экономичность и надежность работы уже существующих тепловых систем и проектировать новые системы.

Основная часть

Теплофикация – это централизованная система теплоснабжения, при которой тепло (горячая вода и отопление) вырабатывается на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) одновременно с производством электроэнергии и подается потребителям по тепловым сетям (трубопроводам).

Любую систему теплоснабжения можно разбить на три ключевых звена (рис. 1):

1) производство тепла (ТЭЦ, котельная);

2) транспортировка и распределение тепловой энергии (магистральный трубопровод, центральные тепловые пункты);

3) потребитель (индивидуальные тепловые пункты, жилые дома) [1].

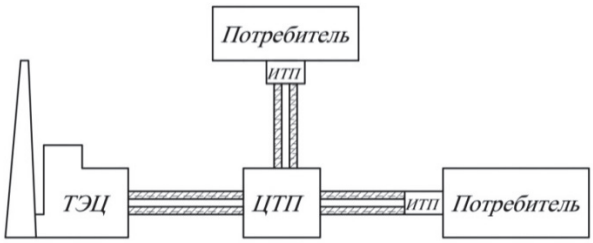


Рис. 1. Схема теплоснабжения

Производство тепловой энергии для теплофикации потребителя является трудоемким и затратным процессом.

Процедура получения теплоты на ТЭЦ происходит зачастую в паротурбинных циклах. Смысл его состоит в следующем. В паровых котлах генерируется перегретый пар, который в дальнейшем срабатывает в турбине. Определенное количество пара, частично отработавшего в турбине, забирается из теплофикационных регулируемых отборов турбины с давлением 0,05...0,25 МПа и направляется либо непосредственно к потребителю, либо в сетевые подогреватели, в которых за счет теплоты конденсации пара происходит подогрев сетевой воды до, например, 120°С [2], в зависимости от температуры окружающей среды.

Вода, проходящая через нагрев в теплообменных установках, подается в сетевой трубопровод теплоснабжения с помощью сетевых насосов и должна соответствовать температурному графику.

Сетевая вода должна соответствовать ГОСТ Р 51232-98 питьевой воды и СанПиН 1.2.3685-21 (нормативы качества).

В теплоснабжении городов приоритетное распространение получили двухтрубные системы теплоснабжения. Двухтрубная система теплоснабжения состоит из двух линий: подающей и обратной. По подающей линии сетевая вода подводится от источника теплоты (ТЭЦ) к центральным тепловым пунктам (ЦТП), где распределяется на микрорайоны (с контролем расхода, давления, температуры), а по обратной линии она возвращается на ТЭЦ или в котельную [3].

Потери тепла в окружающую среду, при транспортировке теплоносителя сказываются экономически и ложатся в большинстве случаев на потребителя.

Прокладка теплосети может быть реализована в трех вариантах (рис. 2-4):

1) надземного типа;

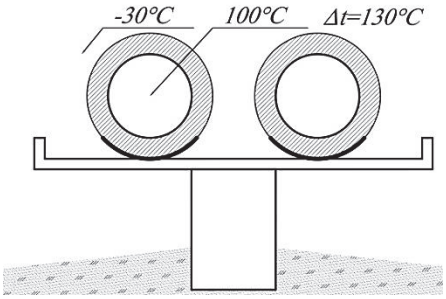


Рис. 2. Надземная прокладка трубопроводов

2) бесканального типа;

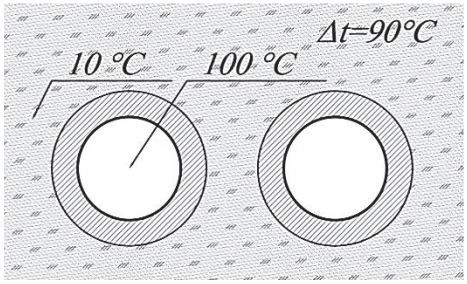


Рис. 3. Бесканальная прокладка тепловых сетей в грунте

3) канального типа

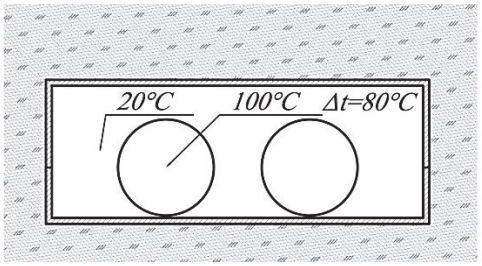


Рис. 4. Прокладка тепловых сетей в подземных каналах

Для снижения тепловых потерь в системах теплофикации применяются следующие способы сбережения.

1. Современная теплоизоляция трубопроводов.

Минеральные ваты изготавливают из расплавов доменных шлаков, а также из осадочных горных пород (мергель, доломит, известняк) и изверженных горных пород (базальт, диабаз, порфирит и т.д.), снижают тепловые потери при транспортировке энергоносителя в 2–3 раза по сравнению со старой теплоизоляцией. При этом, минеральная вата стойкая к воздействию части химических веществ, имеет низкую жёсткость.

Пенополиуретан (ППУ)- это вещество, которое изготовлено из вспененной пластмассы на основе изоцианата и полиола. В составе материала может присутствовать до 90% воздуха. Пенополиуретан также используют как мягкую устойчивую прокладку между металлической трубой, которая относится к основе тепломагистрали, так и в качестве защиты наружного кожуха. Формируется конструкция «труба в трубе». Такая труба отлично работает и позволяет добиться высоких эксплуатационных показателей. Эксплуатационные расходы уменьшаются, снижаются затраты на ремонт теплотрасс, долговечность эксплуатации трубы повышается с 10-15 лет до 30. Также можно добиться снижения теплопотерь, сроки строительства теплотрассы сокращаются, при монтаже магистрали уменьшаются общие расходы.

2. Теплоизоляция зданий.

Это мероприятия и использование материалов, направленных на снижение тепловых потерь и сохранение комфортной температуры внутри помещений. Основные способы применяют для утепления стен, крыш, фундаментов и полов, что значительно сокращает расходы на отопление. В большинстве случаев используют минеральную вату, пенополистирол и пенополиуретан.

3. Автоматизация индивидуальных тепловых пунктов (ИТП).

Это установка электронных контроллеров, датчиков и регулирующих клапанов для управления теплоснабжением здания без постоянного участия человека. Она предназначена для регулирования и поддержания комфортной температуры (отопление/ГВС) при изменении погодных условий и теплового режима, и позволяет снизить энергопотребление и вести дистанционный диспетчерский контроль.

4. Надземная прокладка трубопроводов.

Надземная прокладка трубопроводов — это способ монтажа тепловых сетей над поверхностью земли (на высоте от 0,2 м и выше) с использованием опор, эстакад или мачт. Этот метод применяется, когда подземная укладка невозможна из-за вечномерзлых грунтов, скалистой местности, высокой плотности коммуникаций или для перехода через препятствия (реки, овраги). Способ прокладки считается самым простым и менее затратным. При этом способе повышается риск теплопотерь и механических повреждений.

5.Бесканальная прокладка тепловых сетей в грунте.

Это способ подземной укладки труб (обычно предизолированных в ППУ-оболочке) непосредственно в грунт без установки каналов или лотков. Способ обеспечивает экономию материалов, ускорение монтажа, снижение тепловых потерь и защиту труб от коррозии.

6. Прокладка тепловых сетей в подземных каналах.

Это способ подземной укладки труб, помещенных в защитные железобетонные конструкции (лотки), ниже уровня поверхности земли. Такой способ обеспечивает защиту труб от влаги и нагрузок, позволяет использовать минеральную вату как дополнительную изоля-

цию. В этом случает внутри железобетонной конструкции устанавливается температура значительно выше, чем температура окружающей среды. Замкнутая конструкция системы будет ограничивать скорость движения среды и соответственно интенсивность конвективного теплообмена. Все это уменьшает теплообмен между горячей водой, протекающей в трубах и окружающей средой.

7. Установка гидравлических балансировочных клапанов обеспечивает равномерное распределение теплоносителя, предотвращая перегрев или недогрев радиаторов.

8. Низкотемпературное теплоснабжение.

Это способ организации отопления, при котором теплоноситель (вода) нагревается до меньших температур, чем обычно. Эта энергоэффективная система обеспечивает комфортный микроклимат за счет использования теплых полов или низкотемпературных радиаторов. В случае дополнительной установки современных стеклопакетов будут достигнуты более высокие результаты, которые будут приводить к снижению потерь теплоты.

Заключение

Применение рассмотренных мероприятий позволит значительно снизить аварийность, продлить срок службы теплосетей, сократить тепловые потери при транспортировке тепла, увеличить КПД теплофикации и обеспечить подвод к потребителю теплоносителя с более высокой температурой. Данные мероприятия позволят не только экономить углеводородное топливо, но и способствуют улучшению экологической обстановки за счет уменьшения удельного потребления топлива, уменьшению стоимости тепловой энергии для конечного потребителя за счет снижения потерь.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дегтяренко А.В. Теплоснабжение: учебное пособие – Томск: Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2010. 185 с.

2. Вафин Д.Б.Теплоснабжение и тепловые сети: учебное пособие. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2014. 228 с.

3. Сухоцкий А.Б. Основы учета, контроля и регулирования в системах теплоснабжения [пособие]. – Минск: Теплосила, 2024. 274 с.

УДК 621.438.9

Куртанов Владимир Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kurtanov Vladimir Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Попов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Popov Alexey Yurievich, candidate of engineering sciences, associate professor of the department «Heat power plants», Komsomolsk-na-Amure State University

ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА
CLOSED-CYCLE GAS TURBINE PLANT

Аннотация. Данная работа посвящена вопросу оценки возможности использования двуокиси углерода в качестве рабочего тела в газотурбинной установке замкнутого цикла. Рассмотрена возможность использования энергии отработавшего рабочего тела для обеспечения тепловых потребителей. В программе HYSYS разработана функциональная модель и проведены тепловые расчеты газотурбинной установки.

Abstract. This paper is devoted to the issue of assessing the possibility of using carbon dioxide as a working fluid in a closed-cycle gas turbine installation. The possibility of using the energy of the spent working fluid to provide thermal consumers is considered. A functional model has been developed in the HYSYS program and thermal calculations of a gas turbine installation have been performed.

Ключевые слова: газотурбинная установка, замкнутый цикл, утилизация теплоты.

Key words: gas turbine plant, closed-loop, heat energy utilization.

Введение

Газотурбинные установки замкнутого цикла функционируют на основе модифицированного цикла Брайтона, где рабочее тело циркулирует в закрытом контуре без контакта с окружающей средой (рис. 1). В отличие от традиционных открытых систем, данный подход обеспечивает стабильность термодинамических параметров и позволяет использовать различные рабочие тела. Такая особенность расширяет возможности интеграции установок в системы с низкотемпературными тепловыми источниками при сохранении основных термодинамических закономерностей.

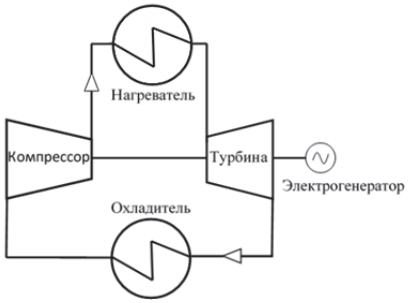


Рис. 1. Газотурбинная установка замкнутого цикла

Основная часть

Выбор рабочего тела является критическим фактором, определяющим термодинамические характеристики газотурбинных установок замкнутого цикла. Гелий, азот и диоксид углерода демонстрируют принципиальные различия в теплоемкости, вязкости и критических параметрах. Высокая удельная теплоемкость гелия способствует эффективному теплообмену, тогда как повышенная плотность CO_2 снижает энергозатраты на сжатие. Эти различия напрямую влияют на конструктивные особенности установки и общую эффективность термодинамического цикла.

Интеграция газотурбинных установок замкнутого цикла в когенерационные системы демонстрирует значительный потенциал повышения общей энергоэффективности. Ключевым преимуществом является возможность утилизации тепловой энергии выхлопных газов для сопутствующих процессов.

Базовая математическая постановка включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии для рабочего тела в замкнутом цикле, при этом поток рассматривается в приближениях, адекватных масштабу элементов установки. Свойства рабочего тела задаются реалистичным уравнением состояния с учётом зависимостей плотности, энтальпии и теплоёмкости от температуры и давления, а также зависимых транспортных коэффициентов (вязкость, теплопроводность). Компонентные модели компрессора, турбины и теплообменников формулируются через граничные условия, уравнения массового баланса и энергетические соотношения, что приводит к системе уравнений для стационарного режима. Полученная система решается итерационными численными методами с контролем сходимости по массовому расходу и энергии, что обеспечивает возможность последующего численного анализа и оптимизации параметров цикла.

Интеграция регенераторов в математическую модель газотурбинной установки замкнутого цикла позволяет утилизировать тепловую энергию отработавших газов, направляя её на предварительный подогрев рабочего тела перед камерой сгорания. Данный подход снижает энергетические потери и повышает общую эффективность цикла.

Функциональная модель газотурбинной установкиразработана в программе ХАЙСИС (Aspen HYSYS) [1]. Данная программа позволяет проводить моделирование технологических процессов теплоэнергетическихустановок с автоматическим расчетом термодинамических свойств теплоносителей.

Для расчета термодинамических свойств газовых смесей выбранаматематическая модель Пенг-Робинсон (Peng-Robinson) [2].

В качестве рабочего тела применена двуокись углерода (CO_2).

Технологическая схема функциональной модели газотурбинной установкизакрытого на рисунке2.

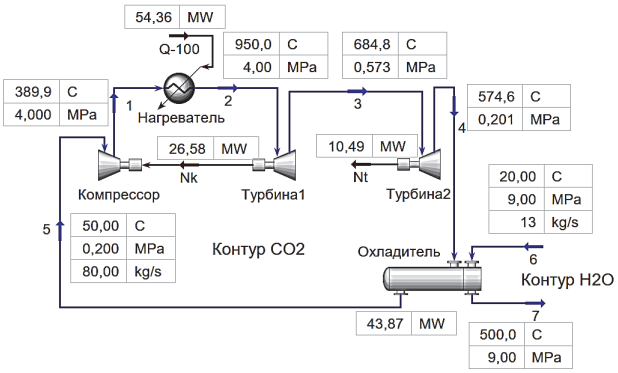


Рис. 2. Технологическая схема функциональной модели ГТУ

Технологическая схема функциональной модели ГТУ и ее расчет выполнены в соответствии с общими положениями, предложенными в работе «Симуляторы тепловых схем энергетического оборудования» [3].

В таблице приведены исходные данные и результаты расчета ГТУ замкнутого цикла.

Таким образом в ГТУ замкнутого цикла с двуокисью углерода в качестве рабочего тела эффективность выработки электроэнергии незначительна и составляет около 20 %. Основной эффект сводится к утилизации теплоты отработавшего рабочего тела ГТУ с выработкой перегретого пара.

Таблица

Исходные данные и результаты расчета

Название	Значение	Размерность
Исходные данные		
Давление CO_2 перед компрессором	0,2	МПа
Расход CO_2	80	кг/с
Степень сжатия компрессора	20	-
Температура CO2 после подвода теплоты	950	°C
Температура CO2 после охладителя	50	°C
Температура охлаждающей воды	20	°C
Температура перегретого пара после охладителя	500	°C
Результаты расчета		
Температура газовза Турбиной 1	685	°C
Температура газовза Турбиной 2	575	°C
Расход охлаждающей воды	13	кг/с
Электрическая мощность ГТУ	10,5	МВт
Тепловая мощность ГТУ	43,9	МВт

Заключение

В статье проведена оценка возможности использования двуокиси углерода в ГТУ замкнутого цикла. Для решения этой задачи была разработана функциональная модель в программе HYSYS, проведен тепловой расчет. Дальнейшим направлением исследований является оценка возможностей использования альтернативных рабочих тел в цикле ГТУ и определение оптимальныхпараметров этого цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aspen HYSYS. Unit Operations Guide. – Burlington : Aspen Technology, 2010. 1722 с.

2. Peng D.Y., Robinson, D.B. A New Two-Constant Equation of State // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals. 1976. Т.15. С. 59-64.

3. Симуляторы тепловых схем энергетического оборудования: метод. указания по выполнению лаб. работ / сост. А. Ю. Попов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. 19 с.

УДК 629.5.04
Лаврентьева Алина Александровна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Lavrentieva Alina Alexandrovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ЭКИПАЖА ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ
ORGANIZATION OF CREW QUARTERS ON TRANSPORT VESSELS

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы классификации, состава и нормативного регулирования помещений транспортных судов различного назначения. Проанализирована зависимость номенклатуры судовых помещений от специализации судна (грузовое, пассажирское, наливное) и района плавания. Описаны конструктивные особенности судовых отсеков, включая требования к герметизации, противопожарной защите и минимальным размерам (высота подволока, кубатура кают). Отдельное внимание уделено комплектованию помещений для экипажа в соответствии с международными стандартами (SOLAS-74, MLC-2006) и правилами Российского морского регистра судоходства. Приведены количественные нормативы площади и объема жилых помещений, а также требования к меблировке и санитарно-бытовому оснащению.
Abstract. The article discusses the issues of classification, composition and regulatory regulation of the premises of transport vessels for various purposes. The dependence of the nomenclature of ship spaces on the specialization of the vessel (cargo, passenger, liquid) and the area of navigation is analyzed. The design features of the ship's compartments are described, including requirements for sealing, fire protection, and minimum dimensions (ceiling height, cabin size). Special attention is paid to the completion of crew quarters in accordance with international standards (SOLAS-74, MLC-2006) and the rules of the Russian Maritime Register of Shipping. Quantitative standards of the area and volume of residential premises, as well as requirements for furnishing and sanitary facilities are given.
Ключевые слова: транспортное судно, классификация судовых помещений, номенклатура помещений.
Key words: transport vessel, classification of ship's premises, nomenclature of premises.

Введение

Современное транспортное судно представляет собой сложный инженерный комплекс, в котором на ограниченной площади сочетаются производственные, грузовые и бытовые зоны. Эффективность эксплуатации судна, безопасность плавания и условия труда экипажа напрямую зависят от рационального проектирования помещений – от машинных отделений до жилых кают и общественных пространств. Проектирование судовых помещений сталкивается с рядом противоречий. С одной стороны, судовладелец стремится максимизировать объем грузовых отсеков для повышения коммерческой эффективности судна. С другой стороны, международные конвенции (прежде всего Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (SOLAS-74) [1] и Конвенция 2006 о труде в морском судоходстве (MLC-2006) [2]) и национальные правила (например, требования Российского морского регистра судоходства [3]: часть III «Устройства, оборудование и снабжение», часть V «Деление на отсеки», часть VI «Противопожарная защита») устанавливают жёсткие минимальные стандарты по площади, высоте, освещённости и вентиляции помещений для экипажа, а также по противопожарной защите и непотопляемости.

Кроме того, номенклатура помещений существенно варьируется в зависимости от типа судна. Танкер, контейнеровоз, пассажирский лайнер и судно прибрежного плавания имеют совершенно разный набор помещений и отсеков: от специализированных насосных отде-

лений и коффердамов до спортивных залов и лазаретов. Также важным фактором выступает автономность плавания – чем дольше судно находится в рейсе без захода в порты, тем более развитой должна быть инфраструктура жизнеобеспечения (провизионные камеры, прачечные, помещения для досуга). Необходима систематизация сведений о классификации судовых помещений, выявление факторов, определяющих их состав и размеры, а также анализ требований к оснащению (комплектованию) помещений для экипажа.

Формирование помещений транспортных судов

В структуре любого транспортного судна помещения принято разделять по функциональному назначению и объемно-планировочным характеристикам. Выделяют три основные категории:

1. Производственно-технические помещения. Сюда относятся отсеки, обеспечивающие эксплуатацию судна как плавучего средства: машинные и котельные отделения, румпельные отделения, цехи механической обработки, мастерские различного профиля.

2. Грузовые помещения. Данная категория предназначена для размещения перевозимого груза. В зависимости от типа судна это могут быть грузовые трюмы, танки (для наливных судов), твиндеки, а также специализированные помещения (рефрижераторные камеры).

3. Помещения для обитания и жизнеобеспечения. Данный сегмент объединяет жилые каюты, камбузы, столовые (салоны), санитарно-гигиенические узлы, медицинские пункты, а также общественные пространства (спортзалы, бассейны, курительные комнаты), предназначенные для комфортного пребывания экипажа.

Дополнительно выделяют помещения специального назначения (лаборатории, рулевые рубки, штурманские и радиорубки) и служебные коридоры (трапы, тамбуры, шахты), обеспечивающие коммуникацию между основными зонами.

Набор и площадь помещений на борту не являются универсальными. Номенклатура судовых помещений зависит от двух параметров: типа судна и того, как долго оно может находиться в море без захода в порт. На грузовых судах почти всё место занято трюмами, а жилая часть (кормовой надстройки) – не более 10–15% длины. На пассажирских – наоборот, главное это каюты и общественные зоны, поэтому там сложная планировка и много противопожарных переборок. На танкерах обязательны насосные и изолирующие коффердамы между грузом и остальными отсеками. Также важен район плавания. Суда неограниченного района плавания получают больше удобств: отдельную библиотеку, бассейн или сауну, увеличенные холодильники для провианта, чтобы можно было находиться в рейсе 60–90 дней без пополнения запасов. В отличие от них, суда прибрежного плавания (каботажные) имеют усеченную номенклатуру, где жилые помещения часто совмещены с судовой канцелярией, а медицинский блок может быть заменен укладкой первой помощи.

Конструктивные особенности помещений транспортных судов определяются жесткими требованиями безопасности мореплавания и спецификой эксплуатации. Ключевыми характеристиками являются: конструкция проема и герметизация, противопожарная защита. Все помещения, расположенные ниже ватерлинии или на границе с забортной средой, имеют усиленный набор (шпангоуты, карлингсы) и оборудуются водонепроницаемыми закрытиями (двери, люки). Жилые и служебные помещения выше ватерлинии оснащаются штормовыми (ветро- и водонепроницаемыми) дверями. Помещения разделяются переборками типа «А» (противопожарные, выдерживающие воздействие огня в течение 60-120 минут) и типа «В» (неконструктивные, препятствующие распространению дыма). Что касается регламентации размеров, то она базируется на международных и национальных нормативных актах. Основополагающими документами являются SOLAS-74 и MLC-2006.

Площади и объемы жилых помещений регламентируются следующим образом:

1. В соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства и MLC-2006, высота жилых помещений (от настила до подволока) должна составлять не менее 2,03 метров (допускается локальное снижение в подпалубных пространствах).

2. Для одноместных кают минимальная площадь установлена на уровне 4,5–7,0 м², общий объем жилого пространства на одного члена экипажа не должен быть менее 3,75–4,75 м³ (в зависимости от валовой вместимости судна и даты постройки).

3. Жилые каюты и рулевые рубки должны иметь естественное освещение. Площадь иллюминаторов или окон нормируется как минимум 5-10% от площади палубы помещения.

Оснащение (комплектование) помещений для экипажа регламентируется не только строительными нормами, но и санитарными правилами, а также условиями трудового договора моряка. Укомплектование осуществляется по двум направлениям: меблировка и снабжение. Каждое жилое помещение (каюта) должно быть укомплектовано металлической или деревянной мебелью, закреплённой стационарно (противоударные крепления). Стандартный набор включает: койку не менее 198 см длиной и 80 см шириной (с ортопедическим матрасом, зафиксированную от перемещения), письменный стол, стул, шкаф (объемом 475 литров) для одежды и полки для личных вещей. Для офицерского состава (командный состав) предусматривается наличие отдельного санузла (душ и туалет) в каюте, тогда как для рядового состава (палубная и машинная команды) часто предусматриваются блочные санузлы на несколько кают. На больших судах все каюты оборудованы санузлом. Обязательному укомплектованию подлежат прачечные (с установкой стиральных и сушильных машин промышленного типа), сушильные шкафы для спецодежды и вентиляционные системы с подогревом воздуха для северных широт. На судах с численностью экипажа более 15 человек обязательно наличие отдельной судовой амбулатории (лазарета), изолированной от жилых и производственных зон. Также в обязательном порядке предусматриваются отдельные помещения для проведения досуга (салоны отдыха), оснащённые аудиовизуальной аппаратурой, спортивным инвентарём и библиотечным фондом.

Заключение

В ходе выполнения работы систематизированы сведения о классификации судовых помещений, выявлены ключевые факторы, определяющие их номенклатуру и размеры, а также проанализированы нормативные требования к оснащению помещений для экипажа. В процессе работы выяснилось, что международные конвенции (SOLAS-74, MLC-2006) гармонизируют большинство позиций, а различия обусловлены прежде всего типом судна и районом плавания, а не страной регистрации. Проанализированы строительные нормы (Правила Регистра), эксплуатационно-технические ограничения (тип судна, автономность), эргономические и социальные стандарты (MLC-2006). В будущем автоматизация и беспилотное судовождение (maritime autonomous surface ships - MASS) изменят список помещений на борту судна. При экипаже из 2–5 человек столовые, лазареты и спортзалы могут стать не нужны, зато возрастёт роль удалённых постов и серверных. И наконец, важно изучить экономику: выигрыш от увеличения грузовместимости за счёт жилых зон против риска штрафов за нарушение MLC-2006.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНВЕНЦИЯ по охране человеческой жизни на море 1974 года СОЛАС-74 текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками (с изменениями на 23 мая 2024 года). Опубл.: 23.05.2024 // Консорциум Кодекс. URL: https://docs.cntd.ru/document/901765675 (дата обращения: 03.04.2026) .

2. КОНВЕНЦИЯ 2006 ГОДА О ТРУДЕ В МОРСКОМ СУДОХОДСТВЕ с поправками. Опубл.: 23.02.2006 // ИБИКОН. Решения для судоходства. URL : https://ibicon.ru/f/mlc-2006-amendments-2022-normes-240912-007-print-ru-sm.pdf (дата обращения: 03.04.2026).

3. Правила классификации и постройки морских судов. (Версия: 01.01.2026) // Российский морской регистр судоходства. URL: https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru. (дата обращения: 03.04.2026).

УДК 593.3, 539.52
Левченко Владислав Сергеевич, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Levchenko Vladislav Sergeevich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State Uni-versity
Бормотин Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, про-фессор кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bormotin Konstantin Sergeevich, doctor of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Professor of the Department «Aircraft engineering and computer-aided design», Komsomolsk-na-Amure State University
Кривенок Антон Александрович, кандидат технических наук, ведущий инженер, филиал ПАО «ОАК» - Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю. А. Гагарина
Krivenok Anton Aleksandrovich, candidate of technical science, lead engineer, branch of the «UAC» - Komsomolsk-na-Amure aviation plant named after Yu. A. Gagarin

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ФОРМООБРАЗОВАНИЮ ДЕТАЛИ ТИПА «ЛОБОВИК» НА ПРЕССЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБТЯЖКИ FET-1500
ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA ON THE FORMATION OF "FRONTAL LOBE" TYPE DETAILS ON THE FET-1500 CROSS-STRETCHING PRESS.

Аннотация. В работе рассмотрено формообразование детали типа «Лобовик» на прессе поперечной обтяжки FET-1500. Для подготовки к формообразованию детали был проведен расчет управляющей программы в программном обеспечении S3F с заданными параметрами деформирования. Проведен натурный эксперимент на трех лентах, по результатам эксперимента сделан замер уровня деформаций по сечениям.
Abstract. The work examines the shape formation of a part of the "Lobovik" type on a FET-1500 transverse press. To prepare for the shape formation, a control program was calculated using the S3F software with specified deformation parameters. An empirical test was conducted on three strips, and based on the results, deformation levels were measured along the cross-sections.
Ключевые слова: формообразование, обтяжной пресс, управляющая программа, деформация.
Key words: forming, drawing press, control program, deformation.

Введение

«Лобовик» это носовая часть предкрылка, которая принимает на себя основной аэродинамический поток, обеспечивает правильную форму щели между предкрылком и основным крылом для увеличения подъёмной силы [1], что требует точного и качественного изготовления детали.

S3F - специализированное программное обеспечение, используемое для моделирования, расчёта и отработки управляющих программ для обтяжных прессов FET и FEL, применяемых в авиастроении для формообразования деталей из листового металла. Программное обеспечение позволяет загружать электронные модели обтяжного пуансона и заготовки и на основе исходных данных рассчитать управляющую программу для формообразования с учетом кинематики пресса [2]. На рисунке 1 изображен обтяжной пуансон для формообразования детали «Лобовик», на рисунке 2 показано расположение детали «Лобовик» на обтяжном пуансоне, красным цветом выделен контур детали, все остальное – тело пуансона.

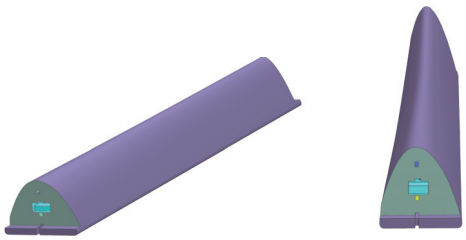


Рис. 1. Обтяжной пуансон для формообразования детали «Лобовик»

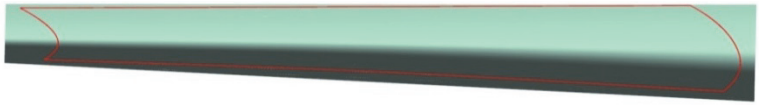


Рис. 2. Расположение детали «Лобовик» на обтяжном пуансоне

Эксперимент проводился в один переход в отожжённом состоянии на трех лентах габаритами 2000х300 мм. Материал лент – 1163, свойства материала в отожжённом состоянии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства 1163 в отожжённом состоянии

Характеристика	Значение
Модуль Юнга, E, МПа	68918
Коэффициент Пуассона, μ	0,33
Предел текучести σ_{02}, МПа	128,79
Предел прочности, $\sigma_{в}$, МПа	338,13
Относительное удлинение δ_5 %	17,9 %

Расчёт управляющей программы в S3F

Для расчета управляющей программы в S3F были загружены вводные данные и заданы параметры деформирования, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Заданные параметры деформирования для расчета УП в S3F

Параметр	Значение
Высота подставки под пуансон	1595 мм
Начальный угол оборачивания	63°
Деформация на этапе формования вершины	0,5 %
Деформация на этапе оборачивания	1 %
Деформация на этапе калибровки	2 %
Деформация на этапе разгрузки	1 %

Этапы расчета движения рабочих органов пресса в S3F показаны на рисунке 3.

На основе выходных данных из S3F проведен натурный эксперимент на обтяжном прессе FET-1500, получены данные об уровне деформаций и визуальные данные прилегания лент на разных этапах формования (формирования вершины, калибровка). Полученные данные представлены на рисунках 4-6.

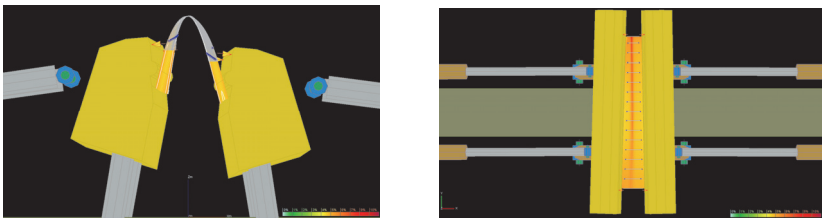


Рис. 3. Расчет кинематики в S3F

Формообразование детали типа «Лобовик» на обтяжном прессе FET-1500

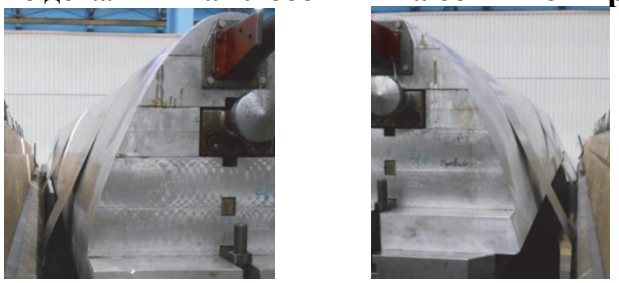


Рис. 4. Прилегание лент на этапе формования вершины

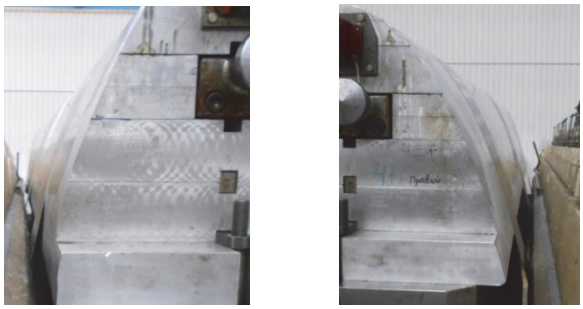


Рис. 5. Прилегание лент на этапе калибровки

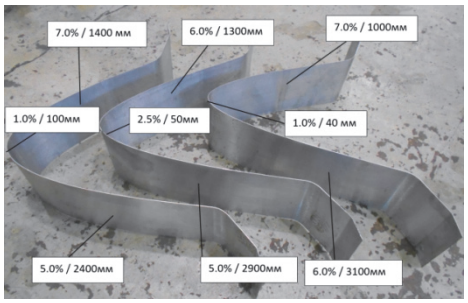


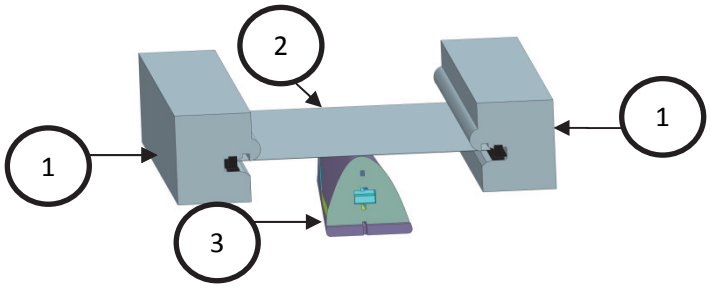
Рис. 6. Распределение деформаций и радиусов кривизны по сечениям

Численное моделирования формообразования детали типа «Лобовик» на прессе FET-1500

Для последующей работы, сравнения с текущими результатами натурного эксперимента, проведения работ по оптимизации была построена упрощенная электронная модель пресса FET-1500 (Рисунок 7).

Построение расчетной модели в CAE системе marc, полностью повторяющей натурный эксперимент позволит оптимизировать движение зажимов, при которых будет максимально использован пластичный ресурс материала и равномерно распределены деформации по всей заготовке [3]. Применение оптимизации к формообразованию деталей позволит максимально эффективно использовать производственные ресурсы и снизить издержки производства для качественного получения деталей.

1 – зажимные губки;
2 – обтяжной пуансон; 3 – заготовка
Рис. 7. Упрощенная электронная модель пресса FET-1500 на начальном этапе формообразования детали «Лобовик»



Заключение

Для получения качественной геометрической формы детали «Лобовик» на обтяжном прессе, управляющая программа, рассчитанная в S3F не является оптимальной, так как после формообразования на обтяжном прессе требуется выполнять ряд доводочных ручных работ что отрицательно сказывается на поверхности детали, а применяемая технология формообразования детали в один переход значительно снижает возможности формообразования.

Ряд проблем, выявленных в данной работе побуждает автора к дальнейшему исследованию проблем связанных с формообразованием. Применение законов механики твердого деформируемого тела и современные методы численного моделирования и оптимизации позволяют получать значительные результаты при совершенствовании процессов формообразования.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00332.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Житомирский Г. И. Конструкция самолетов: учебник для студентов вузов. 6-е изд., испр. / Г. И. Житомирский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2021. - 416 с.

2. Моделирование кинематики движения рабочих элементов обтяжного пресса FET / Р. Ф. Крупский, А. А. Кривенок, А. В. Станкевич [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 9(92). – С. 40-45. – EDN STHSRF.

3. Бормотин, К. С. Об оптимизации кинематической схемы формообразования обтяжкой тонких упругопластических обшивок / К. С. Бормотин, А. А. Буренин, А. А. Кривенок // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2022. – № 2. – С. 14-24. – DOI 10.31857/S0572329922020064. – EDN FXRSOL.

УДК 629.543
Леонова Виктория Анатольевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Leonova Victoria Anatolyevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Серкова Алиса Анатольевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serkova Alice Anatolyevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ НАДСТРОЙКИ СУДНА В KOMPASFLOW
MODELING AND RESEARCH OF SHIP SUPERSTRUCTURE FLOW IN KOMPASFLOW

Аннотация. В работе приводится описание надстроек и рубок судов разного назначения. Описываются функции и оснащение надстроек. Отмечаются современные решения в организации надстроек. Приводится результат моделирования в программе Kompas-3D надводной части корпуса среднетоннажного танкера. Приведены результаты расчета в приложении KompasFlow. Рассмотрено обтекание надводного корпуса, как в диаметральной плоскости, так и обтекание надстройки в районах с резкими изменениями формы. Отмечается хорошее согласование полученных результатов с результатами других исследований.
Abstract. The paper provides a description of the superstructures and cabins of vessels for various purposes. It describes the functions and equipment of the superstructures. It also highlights modern solutions for organizing superstructures. The paper presents the results of modeling the above-water part of a medium-tonnage tanker in the Kompas-3D program. The paper also presents the results of calculations in the KompasFlow application. The paper examines the flow around the above-water hull, both in the diametral plane and around the superstructure in areas with sharp changes in shape. The paper notes that the obtained results are in good agreement with the results of other studies.
Ключевые слова: надстройка судна, моделирование, Kompas-3D, KompasFlow, силы аэродинамического сопротивления.
Key words: ship superstructure, modeling, Kompas-3D, KompasFlow, aerodynamic drag forces.

Введение

Определение оптимальной формы корпуса - одна из основных задач в работе проектировщика. В процессе проектирования судна анализируется не только подводная часть корпуса, но и надводные объемы судна. Формы надводной части прочного корпуса и надстройки влияют на величину сил аэродинамического сопротивления движению судна и, соответственно, на выбор мощности энергетической установки. Обычно величину сил сопротивления определяют по результатам испытаний моделей судов, причем для подводной части корпуса составляющие сил сопротивления оцениваются в опытовом бассейне, а для надводной части - в аэродинамической трубе или на основе данных судов-прототипов. Проведение модельных испытаний требует больших вложений трудовых и материальных ресурсов, также они довольно продолжительны по времени. Сократить затраты и упростить процесс моделирования позволяет трехмерное компьютерное моделирование изучаемых объектов и применение прикладных пакетов программ. В процессе изучения специальных дисциплин «Гидромеханика», «Теория корабля», «Проектирование судов» студентам могут быть полезны навыки владения инструментами численного моделирования. В работе рассмотрена задача

моделирования обтекания надводной части судна с помощью программы Kompas-3D и его приложения KompasFlow.

Архитектурные особенности надстроек и рубок

Суда можно классифицировать по различным критериям, включая их функциональное назначение. Архитектурные решения надстроек и рубок могут значительно варьироваться в зависимости от типа и назначения судна. Сравнивая архитектурные особенности пассажирских и грузовых судов, можно отметить, что надстройки первых имеют высокую и объёмную конструкцию, чтобы разместить помещения для пассажиров и обеспечить комфортные условия во время рейса, а надстройки на грузовых судах создаются более компактными и функционально ориентированными. Основная цель – разместить в минимальном объеме надстройки необходимое оборудование, обеспечить оптимальные условия для его эксплуатации и эффективной работы судовой команды.

В надстройках судов размещаются жилые и общественные помещения для экипажа, техническое оборудование и вспомогательные системы, устанавливаются антенны связи, навигационные приборы и электрооборудование. Длина и количество ярусов надстроек также зависят от габаритов судна и его конструктивной схемы. Рулевая рубка является центральным элементом системы управления судном. Размещение ходовой рубки на надстройке улучшает обзор и управление судном. На крупных судах рубка может быть многоуровневой, включающей различные рабочие станции, навигационные приборы и системы связи.

На современных транспортных судах наблюдается тенденция к разделению надстроек на две части. Это позволяет оптимизировать распределение оборудования и помещений, более эффективно использовать внутреннее пространство и улучшать условия для экипажа. Разделение надстроек также может способствовать снижению общего веса конструкции и улучшению аэродинамических характеристик судна. Таким образом, оптимизация организации и размещения надстроек судов является важным фактором для обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации судов в различных условиях.

Отличительной чертой архитектуры крупнотоннажных судов является очень длинный ходовой мостик, т.к. ширина надстройки и рубки значительно меньше ширины судна, которая достигает 60-65 м, как отмечено в работе [1]. Крылья ходового мостика подкрепляются опорами (колоннами). Колонны играют важную роль в обеспечении структурной целостности и прочности конструкции. Их форма и размеры могут варьироваться в зависимости от архитектурного дизайна и требований к их надёжности (рис.1).



Рис. 1. Надстройки и ходовые мостики крупнотоннажных танкеров [2]

Моделирование и расчет

Инструментами твердотельного моделирования программы Kompas-3D построена модель судна, включающая надводную часть прочного корпуса, надстройку, бак, ют, рубку, кожух дымовой трубы. Исходной информацией стали характеристики среднетоннажного танкера (длина 128,6 м, ширина 20,4 м, высота борта 11,5 м, осадка 8,7 м, скорость 13,4 уз.). Выбранное судно имеет архитектуру, типовую для танкеров данных размеров, кормовую надстройку, рубку и небольшой ходовой мостик.

Модель выполнена упрощенной, в нее не включены элементы, которые имеют значительно меньшие размеры по сравнению с размерами судна: это леерное ограждение, устройства на палубах, оборудование и элементы, устанавливаемые на крыше рубки. Исключение данных элементов не повлияет на общую форму и характеристики потока воздуха, обтекающего судно.

Результат моделирования в программе Kompas-3D представлен на рис. 2 а. Проведен расчет обтекания воздухом надводной части судна в приложении KompasFlow. Рассмотрены

сечения (рис.2 - 3): по диаметральной плоскости, в плоскости крыши рубки, в плоскости ходового мостика. Расчетная сетка была сгенерирована без адаптации в особых зонах: повышения давления, разряжения или срыва потока. Для получения более точных результатов расчетов необходимо использовать адаптацию расчетной сетки, это позволяет получить значения характеристик с меньшими вычислительными затратами.

В рассматриваемом примере необходимо было выполнить расчет в пределах времени аудиторного занятия, поэтому расчетная сетка довольно крупная. Полученные вектора скоростей и поля давлений хорошо согласуются с результатами исследований обтекания корпуса судна в программе SolidWorks Flow Simulation [3].

Дополнительные сечения по ярусам надстройки были построены для изучения характера движения воздушного потока за основным блоком надстройки. Полученные результаты расчетов иллюстрируют направление скорости потока воздуха и распределение поля давлений (рис.3). Представлен расчет обтекания надстройки одновременно с двух сторон, но, принимая симметричный характер обтекания, можно выполнить расчет только с одной стороны от диаметральной плоскости (для экономии вычислительных ресурсов).

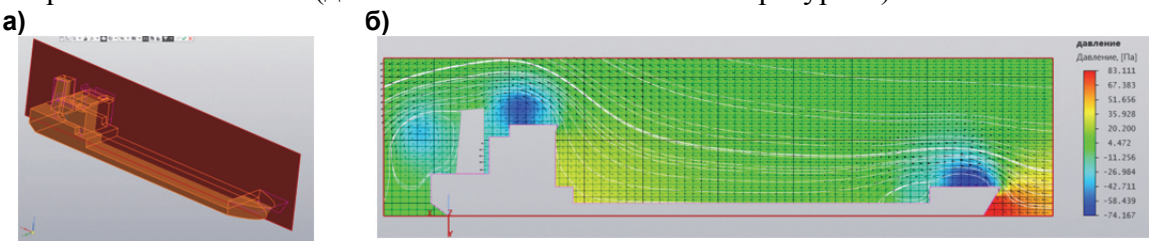


Рис. 2. Обтекание надводной части судна:
а) расчетное сечение судна в диаметральной плоскости; б) поле давлений

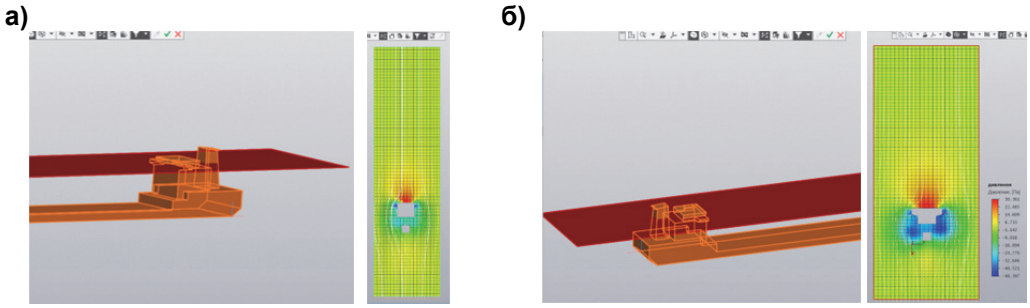


Рис. 3. Расчетная область и поле давлений: а) в районе рубки; б) на уровне ходового мостика

Заключение

Рассмотренные особенности организации и оснащения надстроек судов требуют дальнейшего изучения и определения основных факторов, влияющих на их размеры и форму. Расчетные методики исследования обтекания надводной части судна можно применить к исследованию аэродинамики судов, для которых составляющая сил сопротивления воздуха имеет значимую величину (например, скоростные суда). Полученные модели и результаты расчетов могут быть использованы в учебном процессе при подготовке студентов кораблестроительных специальностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теплов В.А., Каменских И.В. Помещения для экипажа на крупнотоннажных судах // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : материалы Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых, г. Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 г. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2025. Ч. 1. С.172-176.

2. ULCC Tankers > 320000 DWT. Опубл.: 01.01.2002 // Auke Visser's Renewed Historical Tankers Site. URL : https://www.aukevisser.nl/supertankers/index.htm (дата обращения 15.03.2026).

3. Князьков В.В. Численное моделирование сопротивления воздуха движению судна // Транспортные системы. № 1 (31), 2024. С. 18-24.

УДК 621.7.043 : 629.73.063
Лозовский Иван Владимирович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Lozovsky Ivan Vladimirovich, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

ОБЗОР ВИДОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРОГАЗОВЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
REVIEW OF TYPES AND CHARACTERISTICS OF PIPELINE ELEMENTS OF HYDROGAS SYSTEMS OF AIRCRAFT

Аннотация. Рассмотрена классификация элементов тонкостенных трубопроводных систем летательных аппаратов. Определены основные методы изготовления таких элементов. Для некоторых видов тонкостенных трубопроводных элементов предложен метод свертывания листовой заготовки в эластосыпучей среде.
Abstract. The classification of elements of thin-walled pipeline systems of aircraft is considered. The basic methods of manufacturing such elements are determined. For some types of thin-walled pipeline elements, the method of folding a sheet blank in an elastofluctuating medium is proposed.
Ключевые слова: гидрогазовые системы летательных аппаратов, изготовление трубопроводов, штамповка, эластосыпучая среда, свертывание листовой заготовки.
Key words: aircraft hydrogas systems, pipeline manufacturing, stamping, elastofluids, and sheet metal rolling.

Введение

В системах ЛА широко применяются тонкостенные трубопроводные конструкции. К таким системам относят: топливную систему, систему кондиционирования воздуха, противообледенительную систему, пневмосистему и другие. Типовые элементы тонкостенных трубопроводных конструкций изображены на рисунке 1, это – переходники, муфты, уголки, крутоизогнутые патрубки, тройники, законцовки, трубопроводы круглого и некруглого сечения и др [1].

Используемый метод изготовления элементов трубопроводов влияет на качество трубопровода, ресурс конструкции, и как следствие, на надёжность всей системы в целом.

Основная часть

Для изготовления элементов тонкостенных трубопроводных конструкций используют листовые или трубчатые заготовки из материалов типа: АМг-2м, АМг-3, ОТ-4, 12Х18Н10Т и другие.

Использование готовых тонкостенных труб в качестве заготовки элементов трубопроводов является технологичным процессом но, в некоторых случаях затруднительно, из-за ограниченности сортамента тонкостенных труб и условий поставок их на производство. Поэтому на авиационном производстве ряд элементов изготавливают из листовых заготовок, что является менее технологичным процессом [2].

Для изготовления цилиндрических, конических элементов из листовых заготовок, на авиационных производствах используют несколько методов:

Первый метод – метод изготовления полупатрубков в жестких штампах или в штампах с эластичной средой, с последующей их подгонкой и сваркой в приспособлении. При этом полученная конструкция имеет два или более продольных сварных шва.

Второй метод – метод прокатки листовой заготовки на валковых станках, с последующей подгонкой и сваркой заготовки. Таким методом сложно изготавливать трубопроводы малого диаметра и большой длины, поэтому на производстве метод прокатки используется ограничено.

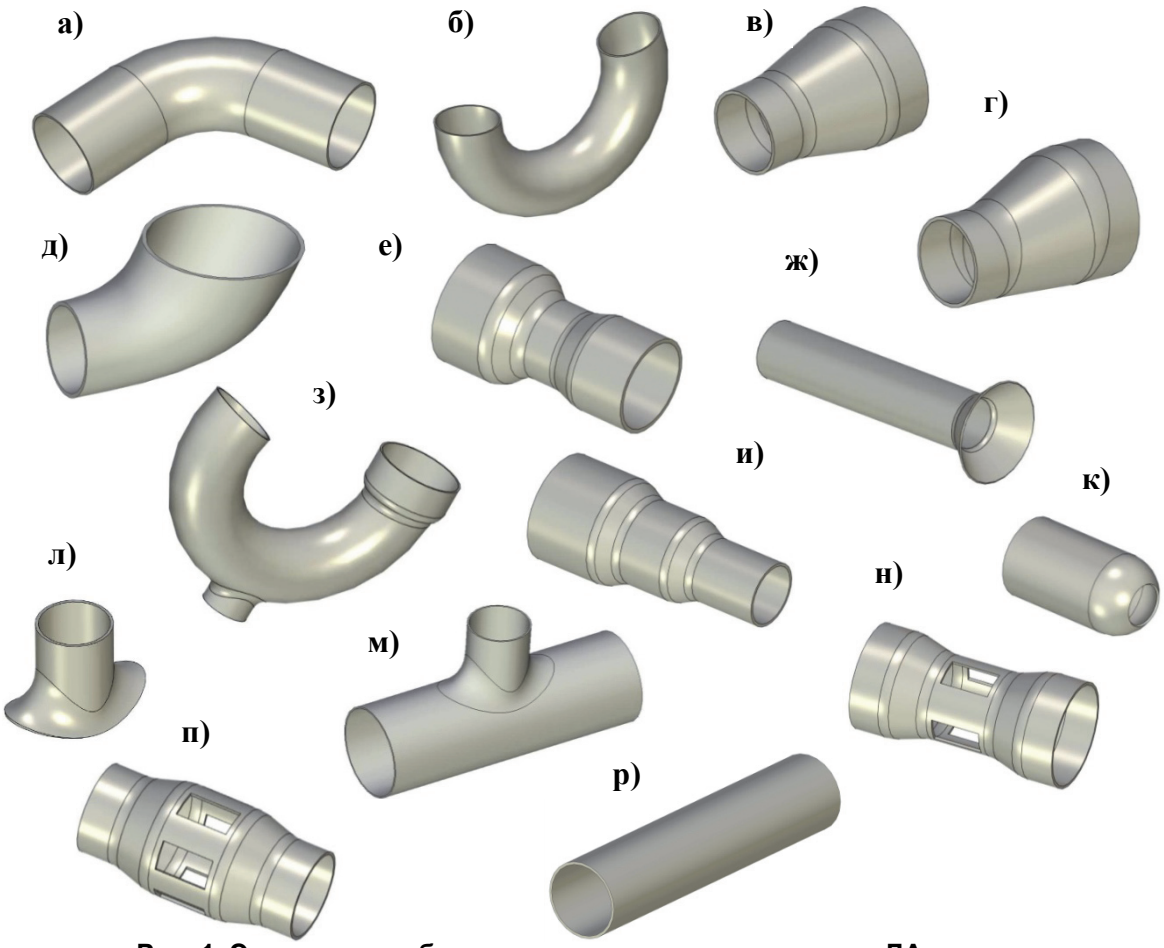


Рис. 1. Элементы трубопроводов гидрогазовых систем ЛА:
а – Патрубок; б – Крутоизогнутый патрубок; в – Переходник; г – Асимметричный переходник;
д – Крутоизогнутый переходник; е – Муфта; ж – Законцовка; з – Фитинг;
и – Переходник; к – Законцовка; л – Фланец; м – Тройник ; н – Муфта; п – Кожух;
р – Цилиндрический патрубок

Для изготовления цилиндрических, конических элементов трубопроводов, элементов типа «тройник» и др. предлагается использовать метод свёртывания листовой заготовки в эластосыпучей среде [3]. Для этого используется специальный штамп, описанный [4, 5].

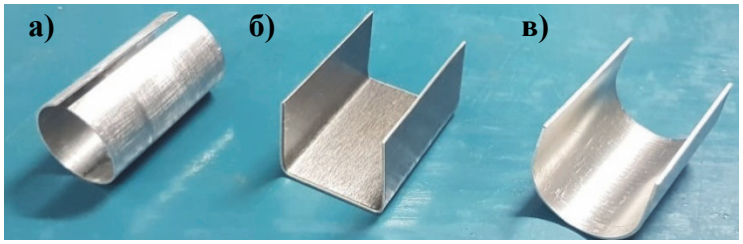


Рис. 2. Образцы труб и профилей, изготовленные из листовых заготовок свертыванием в эластосыпучей среде:
а – свертывание по диаметру; б – двухугловая гибка в одной плоскости; в – U-образная гибка

На рисунке 2 представлены примеры образцов труб и профилей, изготовленные из листовых заготовок свертыванием в эластосыпучей среде.

Процесс свертывания листовой заготовки с использованием эластосыпучей среды можно рассматривать как гибку листовой заготовки с одновременным радиальным сжатием. Теоретические исследования процесса пластического изгиба были заложены в работах: Р. Хилла, А. Надаи, И.П. Ренне, А.А. Ильюшина, Е.Н. Мошнина и др. Они легли в основу математической модели процесса свертывания (определение напряженно-деформированного состояния листовой заготовки при гибки с учетом радиального сжатия)

Заключение

В трубопроводных системах самолёта широко применяются элементы типа тройник, крутоизогнутые патрубки, фитинги и другие элементы, изготавливаемые из алюминиевых титановых и коррозионностойких сплавов. Эти элементы широко влияют на ресурс и надежность систем. Для повышения ресурса и надежности систем возможно изготавливать элементы трубопроводов из трубчатых заготовок или листовых заготовок с минимальным количеством сварных швов. Уменьшение утанения деталей при формообразовании, а так же, исключение сворных швов из зон концентрации напряжения ведет к существенному улучшению показателей надежности, ресурса и технологичности монтажных работ.

Увеличение номенклатуры элементов трубопроводных систем летательных аппаратов, с одной стороны, усложняют конструкцию и увеличивают общую стоимость технологии, с другой стороны, способствует улучшению показателей надежности и ресурса, технологичности монтажный работ, ремонтопригодность, уменьшение гидравлических потерь и увеличение общей эффективности бортовой системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гидрогазовые системы летательных аппаратов / Б. Н. Марьин и др.; под ред. Марьина Б. Н.. – Изд. 2-е, перераб. и доп.. – Владивосток : Дальнаука, 2006.

2. Основы технологии машиностроения : учебник для высших учебных заведений / Б.Н. Марьин, А.Г. Братухин, В.А. Ким [и др.] ; под. Ред. Б. Н. Марьин. – Владивосток : Дальнаука, 2015. – 608 с.

3. Изготовление трубы свертыванием листовой заготовки / И. В. Лозовский, С. Б. Марьин, В. В. Черномас, А. К. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 12(765). – С. 124-130. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-12-124-130.

4. Патент на полезную модель № 240497 U1 Российская Федерация, МПК B21D 5/02, B21D 22/10, B21D 37/02. Штамп для изготовления заготовок с внешней цилиндрической поверхностью свертыванием листовой заготовки : заявл. 07.02.2025 : опубл. 15.01.2026 / С. Б. Марьин, И. В. Лозовский ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет".

5. Патент на полезную модель № 215992 U1 Российская Федерация, МПК B21D 22/02. Штамп для свертывания деталей из листовых заготовок : № 2022128547 : заявл. 02.11.2022 : опубл. 12.01.2023 / С. Б. Марьин, И. В. Лозовский, А. К. Кузнецов, В. К. Каргин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет".

УДК 621.175

Максимова Татьяна Владимировна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Maximova Tatiana Vladimirovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Хвостиков Александр Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет Khvostikov Alexander Stanislavovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associ-ate Professor of the department "Thermal power plants", Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОНДЕНСАТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ КОМСОМОЛЬСКОЙ ТЭЦ-2
STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF ADDITIONAL COOLING OF THE STEAM TURBINE CONDENSER AT KOMSOMOLSKAYA CHPP-2

Аннотация. Цель работы — исследование эффективности дополнительного охлаждения конденсатора паровой турбины Комсомольской ТЭЦ-2. Проведен анализ методов повышения эффективности охлаждения в летний период. Установлено, что применение тепловых насосов требует наличия теплового потребителя, отсутствующего летом, а бинарные циклы связаны с высокими затратами. Наиболее перспективным признано использование детандер-генераторного агрегата, позволяющего утилизировать избыточное давление газа для выработки электроэнергии и охлаждения циркуляционной воды, что обеспечивает улучшение вакуума без привязки к тепловому потребителю.

Abstract. The aim is to study the efficiency of additional cooling for the steam turbine condenser at Komsomolskaya CHPP-2. Methods for improving cooling efficiency in summer are analyzed. Heat pumps require a heat consumer absent in summer; binary cycles involve high costs. The most promising is an expander-generator unit utilizing excess gas pressure for power generation and circulating water cooling, providing vacuum improvement without a heat consumer.
Ключевые слова: паротурбинная установка, конденсатор, вакуум, охлаждение циркуляционной воды, детандер-генераторный агрегат.
Key words: steam turbine plant, condenser, vacuum, circulation water cooling, expander-generator unit.

Введение

Одним из основных способов достижения высокого термического коэффициента полезного действия паротурбинной установки (ПТУ) является понижение параметров пара за турбиной. Согласно основам термодинамики, снижение давления и температуры отработавшего пара уменьшает количество теплоты, передаваемой холодному источнику, что при неизменных параметрах свежего пара позволяет увеличить располагаемый теплоперепад и, как следствие, повысить мощность турбины и экономичность цикла. Для обеспечения этого процесса, а также для получения чистого конденсата, замыкающего цикл питания парогенератора, служит конденсационная установка.

В современных ПТУ наибольшее распространение получили водяные конденсаторы, являющиеся основными потребителями воды в системе технического водоснабжения тепловых и атомных электростанций: доля воды, направляемой на охлаждение конденсаторов, достигает 90–94 %. При этом капитальные затраты на систему технического водоснабжения составляют до 10–12 % от общей стоимости установленного киловатта мощности. В условиях неизбежного роста дефицита водных ресурсов актуальным направлением является разработка систем охлаждения конденсаторов с минимальным водопотреблением или переход к гибридным (мокро-сухим) схемам, позволяющим снизить нагрузку на водные источники и повысить эффективность работы турбинного оборудования. При этом значения температуры конденсации t_k, кратности охлаждения m и недогрева δt должны определяться технико-экономическими расчетами, поскольку снижение p_k ниже экономически обоснованного уровня приводит к тому, что затраты на перекачку охлаждающей воды и увеличение капитальных вложений превышают стоимость дополнительно выработанной электроэнергии. В эксплуатационной практике ориентируются на поддержание так называемого экономического вакуума, обеспечивающего максимальный прирост мощности турбоустановки с учетом всех сопутствующих факторов.

Целью работы является исследование эффективности применения дополнительного охлаждения конденсационной установки паровой турбины Комсомольской ТЭЦ-2

Результаты исследования

Тепловые электрические станции в летнее время сталкиваются с трудностями достижения температур конденсации t_k, вследствие нагрева охлаждающей воды и высоких объемов отправляемого пара в конденсатор при отсутствии отборов на теплофикацию. Для повышения эффективности работы конденсатора в летний период используют методы модернизации поверхности и интенсификации теплообмена, оптимизации гидравлического режима, повышения герметичности конденсатора и поиска источников с более низкими температурами. Кроме того, рассматриваются инновационные методы: использование магнитной обработки воды, применение нанофлюидов, адиабатное охлаждение воздуха перед конденсаторами и применение термоэлектрических модулей. Анализ литературы показал что исследований и работ по прямому применению парокомпрессионных или абсорбционных холодильных машин в системе охлаждения конденсатора нет.

В работе [1] исследуются возможности охлаждение конденсатора с помощью парокомпрессионного теплового насоса. Современные парокомпрессионные тепловые насосы с высокими коэффициентами трансформации позволяют повысить температурный уровень этой теплоты до значений, пригодных для использования в системах регенеративного подогрева конденсата или теплоснабжения. Согласно представленным данным (на примере АЭС с реактором БН-600), использование теплового насоса в схеме основного конденсатора для

повышения экономических показателей (генерации электрической мощности) является неоправданным. Математическое моделирование показало, что мощность, потребляемая компрессором теплового насоса, оказывается выше дополнительной электрической мощности, вырабатываемой энергоблоком, как при установке испарителя на входе, так и на выходе конденсатора [1]. Несмотря на нецелесообразность использования парокомпрессионных тепловых насосов для прямого увеличения выработки электроэнергии, выделяются две ключевые области, где их применение эффективно – снижение теплового загрязнения окружающей среды и системы теплоснабжения.

Рассматривается также возможность применения абсорбционных тепловых насосов (АБТН) для утилизации теплоты конденсатора. Статья [2] демонстрирует, что АБТН позволяют эффективно утилизировать низкопотенциальную теплоту (20–30 °C), которая традиционно сбрасывается в окружающую среду через градирни или водоемы. В рассмотренном примере на ТЭЦ с турбоагрегатом ПТ-60 реализована схема, при которой циркуляционная вода после конденсатора направляется не в градирню, а в испарители АБТН. Аналогично рассматривается применение теплового насоса для теплофикации. Это позволяет снизить тепловое загрязнение окружающей среды и использовать утилизированную теплоту для нагрева сетевой воды и химочищенной воды на собственные нужды. Охлаждение циркуляционной воды в АБТН с 22,2 до 17,8 °C позволяет дополнительно снизить температуру на входе в конденсатор (при рециркуляции) либо создать дополнительный перепад температур, потенциально улучшающий вакуум. Применение АБТН требует отбора пара из отбора турбины. Это снижает пропуск пара через турбину и, соответственно, выработку электроэнергии. Таким образом, имеет место энергетический компромисс: улучшение вакуума за счет охлаждения циркуляционной воды может быть частично нивелировано снижением расхода пара через турбину.

Экономический эффект достигается не на отдельной ТЭЦ, а в энергосистеме в целом. За счет снижения генерации на ТЭЦ с относительно высоким удельным расходом топлива и замещения ее более эффективными источниками достигается системная экономия. Для изолированной ТЭЦ (без учета системного эффекта) экономическая выгода может быть неочевидной. При этом отмечается, что утилизированная теплота должна иметь полезное применение и наличие теплового потребителя. При отсутствии потребителя эффект от АБТН снижается [2].

Следующее направление для утилизации низкопотенциального тепла конденсатора – это применение бинарного цикла. Рассматриваемая технология предлагает альтернативный подход к отводу теплоты конденсации, который может быть сопоставлен с традиционными системами охлаждения (водяными и воздушными) и рассмотренными ранее тепловыми насосами. Ключевым элементом с точки зрения охлаждения конденсатора является конденсатор-испаритель, в котором происходит передача теплоты от конденсирующегося водяного пара (после паровой турбины) к низкокипящему веществу. Далее низкокипящее рабочее тело совершает работу в своей турбине, а его конденсация осуществляется в конденсаторе низкокипящего рабочего тела, который может быть выполнен воздушным [3]. Также в научной литературе рассматриваются бинарные турбоустановки с утилизацией низкопотенциальной геотермальной теплоты.

Еще один способ создания и поддержание глубокого вакуума в конденсаторе – использование детандер-генераторного агрегата. Природный газ, поступающий на ТЭЦ с избыточным давлением (1,1 МПа), перед подачей в котлы должен быть дросселирован до номинальных параметров. Вместо дросселирования газ направляется в детандер-генераторный агрегат, где расширяется, совершая полезную работу и вырабатывая электроэнергию. При этом газ охлаждается до низких температур. Охлажденный газ используется в охладителе циркуляционной воды для снижения ее температуры перед подачей в конденсатор паровой турбины. Для повышения эффективности работы детандер-генераторного агрегата производят предварительный нагрев газа отборным паром 1,2 атм до 135 °C. Далее происходит расширение газа с 1,1 МПа до 0,0015 МПа с выработкой электроэнергии и охлаждением газа до 1 °C. Отработавший газ отправляется на охлаждение циркуляционной воды после конденса-

тора. Применяемая технология позволяет полностью исключить стандартные системы охлаждения циркуляционной воды [4].

Заключение

Проанализировав методы повышения эффективности работы конденсатора, можно сделать следующие выводы:

1. В работе паротурбинных установок в летний период возникают сложности с поддержанием давления и температуры конденсации на должном уровне.

2. Использование тепловых насосов для охлаждения конденсатора требует наличия теплового потребителя, который в летнее время отсутствует.

3. Наиболее перспективным методом охлаждения конденсатора считается использование детандер-генераторного агрегата, позволяющего не только повысить эффективность конденсатора, но и получить дополнительную электрическую нагрузку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Щеклеин С. Е., Ташлыков О.Л., Дубинин А.М. Повышение энергоэффективности АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 15-25.

2. Романюк В.Н., Бобич А. А. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 4. С. 31-43.

3. Галашов Н. Н. Цибульский С.А. Анализ влияния основных параметров паротурбинного цикла на эффективность тринарных парогазовых установок // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, № 4. С. 14-21.

4. Приходченко А.В., Моисеев И.М., Лобов Д.С. Повышение экономичности паротурбинной установки с детандер-генераторным агрегатом // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 17 мая 2018 года. - Омск: Омский государственный технический университет, 2018. С. 99-103.

УДК 539.32

Мельничук Владимир Константинович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Нестеренко-Савинова Варвара Викторовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Слепцов Владимир Владимирович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Потянихин Дмитрий Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Melnichuk Vladimir Konstantinovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Nesterenko-Savinova Varvara Viktorovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Sleptsov Vladimir Vladimirovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Potianikhin Dmitrii Andreevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Computer Design, Komsomolsk-na-Amure State University

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА КРУЧЕНИЕ
LABORATORY STAND FOR TESTING ELEMENTS OF AIRCRAFT STRUCTURES FOR TORSION

Аннотация. В работе представлена модель лабораторного стенда, предназначенного для проведения экспериментальных исследований на кручение стержневых образцов из авиационных материалов с целью определения модуля сдвига материала. Конструкция стенда включает силовую раму, узлы закрепления образца, систему нагружения в виде рычага с грузами и измерительную систему на базе индикатора часового типа. В результате разработки

реализована возможность регулирования прикладываемого крутящего момента и длины образца. Разработанная установка может эффективно использоваться в учебном процессе для демонстрации закономерностей деформирования при кручении.
Abstract. This article presents the model of a laboratory stand designed for experimental torsion testing of aircraft material specimens to determine the material's shear modulus. The stand includes a massive frame, specimen clamps, a loading system consisting of a lever with weights, and a dial indicator-based measurement system. The design allows for adjustment of the applied torque and specimen length. The developed stand can be effectively used for educational purposes to demonstrate the principles of torsional deformation.
Ключевые слова: модули упругости, модуль сдвига, кручение, крутящий момент, лабораторный стенд.
Key words: elastic moduli, shear modulus, torsion, torque, laboratory stand.

Введение

При проектировании авиационной техники возникает необходимость определения механических свойств профильных элементов конструкций при различных видах нагружения. Одним из базовых видов нагружения для трехмерных стержневых конструкций является кручение, при котором в материале возникают касательные напряжения. В экспериментальном исследовании на кручение можно определить модуль сдвига материала, предел текучести (для пластичных материалов) и предел прочности (для хрупких материалов). Кроме того, по известным модулям упругости первого и второго рода можно вычислить коэффициент Пуассона ν, необходимый для задания свойств материалов во всех пакетах инженерного анализа, по формуле

$$\nu = \frac{E-2G}{2G}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, G – модуль сдвига.

В связи с этим актуальной задачей является разработка учебного лабораторного стенда, позволяющего проводить испытания образцов на кручение с возможностью измерения их деформационных характеристик.

Конструкция экспериментальной установки

Цифровая модель проектируемой экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Опорная рама 1 и стойка каретки 9 выполнены из профильной трубы прямоугольного сечения 80×40×4, опорные стойки и подкосы 8 выполнены соответственно из профильной трубы прямоугольного сечения 60×60×4 и 60×30×3. Опорные стойки 8 жёстко закреплены на раме 1. Каретка 2 выполнена из профильной трубы прямоугольного сечения 80×40×4, соединена со стойкой 9 и может перемещаться вдоль рамы 1 по направляющим. Конструкция позволяет проводить испытания образцов длиной от 200 до 1300 мм. Нагружаемый рычаг 3 служит инструментом для создания крутящего момента путём приложения силы за счет подвеса груза. Трёхкулачковый токарный патрон 5 жёстко закреплён на раме, такой же патрон 4 неподвижно закреплён на свободно вращающемся конце вала для передачи крутящего момента от рычага 3 брусу 10. При помощи патронов можно закреплять брус круглого сечения диаметром от 2 до 70 мм. Индикатор часового типа 6 крепится на планки 7, изготавливаемые при помощи аддитивных технологий индивидуально под каждый испытываемый брус.

При кручении бруса в его поперечных сечениях возникают касательные напряжения, а сам элемент подвергается угловой деформации, характеризуемой углом закручивания. В пределах упругой работы материала между приложенным крутящим моментом и углом закручивания сохраняется линейная зависимость, то есть, деформация элемента подчиняется закону Гука [1]:

$$\varphi = \frac{M_k l}{G J_p}, \quad (2)$$

где φ – угол закручивания, M_k – крутящий момент, l – рабочая длина образца, G – модуль сдвига материала, J_p – полярный момент инерции поперечного сечения.

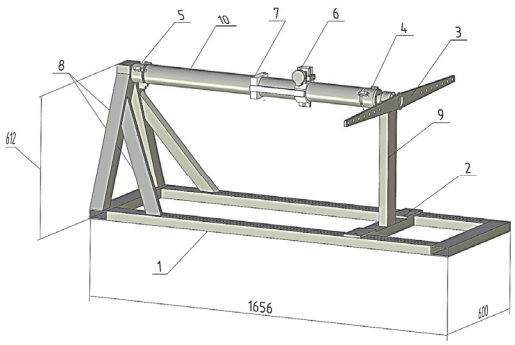


Рис. 1. Цифровая модель экспериментальной установки:
1 – опорная рама; 2 – каретка; 3 – нагружаемый рычаг; 4 – подвижный патрон;
5 – неподвижный патрон; 6 – индикатор; 7 – крепление планки индикатора;
8 – опорные стойки; 9 – стойка каретки; 10 – брус.

Из выражения (2) следует, что при известных геометрических параметрах элемента и измеренных значениях крутящего момента и угла закручивания можно определить модуль сдвига материала.

Порядок проведения испытаний

1. Подготовить лабораторный стенд к работе и выполнить внешний осмотр конструкции, проверить надёжность крепления узлов.

2. Измерить геометрические параметры образца (диаметр рабочей части и рабочую длину), внести полученные значения в протокол измерений.

3. Установить образец в зажимные патроны стенда. Один конец закрепить в неподвижном узле, второй – в подвижном узле с нагружающим рычагом.

4. Установить измерительную систему и привести индикатор в рабочее положение. Выполнить начальную настройку прибора и зафиксировать нулевое показание.

5. Нагрузить образец крутящим моментом 5 Н·м, чтобы выбрать зазоры в системе и привести в контакт соприкасающиеся поверхности.

6. Плавно нагрузить образец ступенями в 5 Н·м и измерить угол поворота сечения, соответствующий каждой ступени нагрузки. Внести значения крутящих моментов и углов поворота в протокол измерений.

7. По результатам измерений построить график M_k – φ и определить модуль сдвига по формуле

$$G_э = \frac{\Delta M_{к.ср.} l_0}{\Delta \varphi_{ср.} J_p}, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_{ср}$ рад = $\Delta\varphi_{ср}$ мин (π/180°).

При кручении стержней некруглого сечения (прямоугольных, треугольных, эллиптических и др.) гипотеза плоских сечений неприменима. Точные расчёты на кручение таких стержней могут быть полученных методами теории упругости. В данном эксперименте воспользуемся методами для получения приближённых значений.

При кручении стержней, сечения которых представляют собой равнобедренную трапецию, приближённые значения максимальных касательных напряжений и относительного угла закручивания могут быть получены путём определения указанных величин для стержня с сечением эквивалентного прямоугольника, который строится по схеме.

При кручении стержня сложного замкнутого сечения, состоящего из прямоугольных элементов, момент инерции определяется по формуле

$$J_K = J_{K_1} + J_{K_2} + J_{K_3} + \cdots = \sum J_{K_n}, \quad (4)$$

где n = 1, 2, 3, … – номера составных простых частей рассматриваемого сечения.

При кручении тонкостенных стержней открытого профиля (швеллера, двутавра, уголка) можно воспользоваться теорией расчёта на кручение стержней прямоугольного сечения.

В этом случае профиль разбивают на прямоугольные элементы, толщина h которых значительно меньше их длины b, и тогда момент инерции определяется формулой

$$J_K = \eta \frac{1}{3} \sum b_n^3 h_n, \quad (5)$$

где η – некоторый поправочный коэффициент, учитывающий схематизацию, связанную с заменой реального профиля прямоугольниками. Для уголкового сечения η равен 1, для двутаврового – 1,2, для таврового – 1,15, для швеллерного – 1,12.

В тонкостенных открытых профилях длину контура обозначают через s, а толщину – через δ. Тогда формула (5) принимает вид

$$J_K = \eta \frac{1}{3} \sum \delta_n^3 s_n \quad (6)$$

Заключение

Разработана 3D-модель лабораторного стенда для определения модуля упругости второго рода (модуля сдвига) материала при испытании на кручение. Определен порядок проведения испытаний, разработан типовой протокол испытаний. Установка профилей, отличных от круглого, в зажимных патронах может осуществляться с применением креплений-переходников, которые могут быть изготовлены с применением аддитивных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – 9-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 512 с.

2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 736 с.

УДК 629.5.023.2:004.925.83

Морозова Олеся Анатольевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Morozova Olesya Anatolyevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Журбина Елена Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zhurbina Elena Nikolaevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Журбина Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Zhurbina Irina Nikolaevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

САПР КОМПАС−3D В СУДОСТРОЕНИИ: ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРПУСНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
CAD KOMPAS-3D IN SHIPBUILDING: EXPERIENCE IN HULL SURFACE MODELING

Аннотация. В статье представлен практический опыт применения системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D для создания трёхмерной модели судовой поверхности. Рассмотрена процедура формирования заданной формы корпуса с созданием каркасной модели, на основе которой генерируются участки поверхности. Изучены алгоритмы и процедуры редактирования кривых. Выявлены особенности формирования поверхности.

Abstract. The article presents practical experience with the KOMPAS-3D CAD system, focusing on its use for the creation of a 3D ship surface model. The methodology for generating a predefined hull geometry, utilizing a wireframe model as a basis for surface patch creation has been examined. Algorithms and procedures for curve editing were examined. Characteristics of surface formation were determined.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, КОМПАС-3D, трёхмерное моделирование, судовая поверхность, теоретический чертеж судна, поверхности по сечениям.

Key words: automated design, KOMPAS-3D, 3D modeling, hull surface, ship lines plan, sectional surfaces.

Введение

Судовые поверхности являются одними из самых сложных объектов проектирования и трёхмерного моделирования. Связано это с такими аспектами, как:

- высокая степень кривизны;
- необходимая гладкость поверхностей;
- масштабность конструкции;
- технологические требования и т.д.

При автоматизированном проектировании выявляется проблема создания качественной поверхности корпуса судна, которая влияет на точность изготовления конструкций. Некачественная поверхность ведет к ухудшению остойчивости, непотопляемости, гидродинамических характеристик, мореходных качеств судна. [1-3]

Для построения судовой поверхности применяются специализированные САПР. Однако модули по поверхностному моделированию есть и в других система, например, КОМПАС-3D. Проверить возможности КОМПАС-3D и получить практический опыт моделирования судовой поверхности в нём являлось главной целью данной работы.

Формирование судовой поверхности в САПР КОМПАС-3D

Построение поверхности наружной судовой обшивки в программе КОМПАС-3D проводилось с использованием теоретического чертежа (ТЧ), который графически изображает батоксы, ватерлинии, шпангоуты. Формирование гладких шпангоутов является одним из самых важных этапов, так как влияет на качество поверхности. Для формирования поверхности, сначала необходимо создать отдельные участки, позволяющие создать более сглаженную поверхность. Однако, при чрезмерном количестве участков возрастает время выполнения операций моделирования, что в реальном производстве может привести к срыву сроков сдачи проектной документации.

Для моделирования выбрали грузовое судно с размерами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Размерения судна

Характеристики судна	Значение
Длина наибольшая, м	168
Длина между перпендикулярами, м	158
Ширина по ГВЛ, м	27,2
Высота борта, м	13,8
Осадка по ГВЛ, м	8,75
Осадка максимальная, м	9,215

В данной работе для создания компоновочной геометрии от начальной координатной плоскости, имитирующей нос судна, построили вспомогательные плоскости, смещенные на расстояния между шпангоутами. На вспомогательных плоскостях сплайнами (кривыми) были обведены линии шпангоутов по скопированным эскизам с ТЧ, что сократило объем вводимых данных и, следовательно, явилось преимуществом данной методики. Особое внимание уделялось на совпадение масштаба эскиза и рабочей плоскости, чтобы при формировании итоговой модели не было искажений поверхности.

Каждая кривая определяется набором точек. Далее полученные кривые анализируются, выглаживаются, редактируются до тех пор, пока не будет получена достаточно точная каркасная модель (рис. 1).

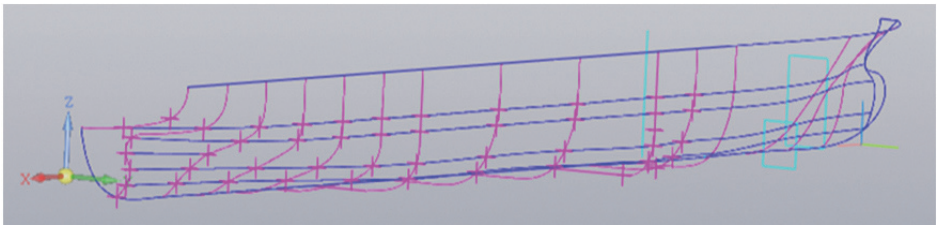


Рис. 1. Каркасная модель

Поверхность создается по сети кривых в двух направлениях, при этом необходимо одинаковое количество контрольных точек на сечениях для избежания неровностей в местах совмещений, т.е. получения нежелательных характеристик формы (рис. 2). Данное обстоятельство применимо к средней части судна, где шпангоуты имеют приблизительно одинаковую форму. Однако, для носовой и кормовой частей судна необходимо выполнять более сложные построения с нанесением дополнительных контрольных точек и созданием линий профилей.

Полученная поверхность корпуса судна представлена на рис. 3.

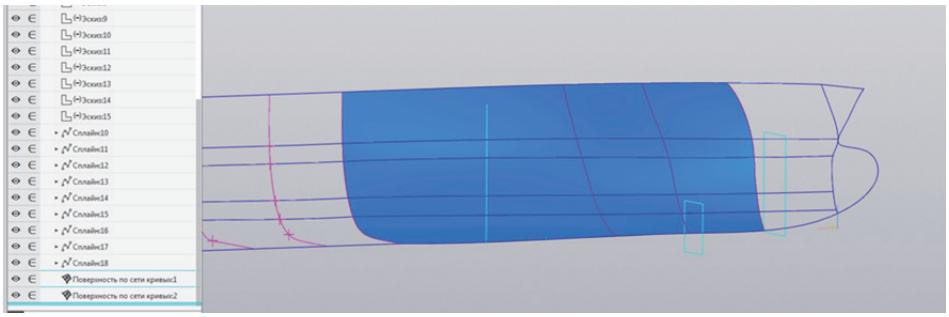


Рис. 2. Построение поверхности

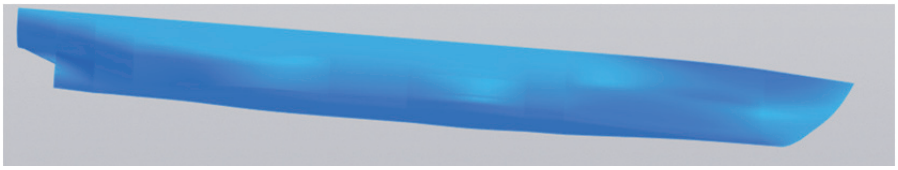


Рис. 3. Поверхность судна

Применяемая методология должна тщательно отрабатываться в каждом конкретном случае. Для создания относительно простых поверхностей наиболее целесообразно начать с разбиение на меньшее количество участков с минимальным количеством точек. Если необходимы новые сечения, то они могут быть получены путем пересечения с вертикальными плоскостями (обводами судна) с дальнейшей корректировкой в соответствии с формой кривых сечений. Данная процедура уменьшает время создания корпуса судна. Но надо всё же понимать, что она также может привести к потере качества создаваемой поверхности.

Заключение

В данной работе исследована одна из методологий построения судовой поверхности корпуса в САПР КОМПАС-3D, основанная на двух этапах: создание каркасной модели и генерации участков поверхности. Получен практический опыт моделирования трёхмерной модели с использованием инструментария системы. Можно сделать вывод, что практика построения качественных гладких поверхностей во многом зависит от опыта моделирования и квалификации проектировщика, а также сложности формируемой модели. Идеальных поверхностей невозможно добиться, поэтому задачей проектировщиков является свести определенные ошибки к минимуму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рыченкова А.Ю., Клименко Е.С., Бородина Л.Н. Геометрическое моделирование и оценка ка-

чества каркасной поверхности корпуса судна в САПР КОМПАС-3D // Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 62. С. 81-90.

2. Горавнева Т.С. Способы моделирования кривых применительно к САПР // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 3(131). [Электронный ресурс]. URL:https://web.snauka.ru/issues/2022/03/97870 (дата обращения: 02.04.2026).

3. Попов Е.В., Шоркина И.Н. Автоматизация моделирования поверхности судового корпуса // Омский научный вестник. 2023. № 4(188). С. 13-21.

УДК 621.175.2

Обухова Валерия Игоревна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Obukhova Valeria Igorevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Хвостиков Александр Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Alexander Stanislavovich Khvostikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department "Thermal power plants", Komsomolsk-na-Amure State University

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ КОНДЕНСАТОРОВ
IMPROVING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF STEAM TURBINE INSTALLATIONS THROUGH THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR CLEANING CONDENSATORS

Аннотация. Целью работы является разработка и теоретическое обоснование комплексного подхода к повышению эффективности работы конденсатора паротурбинной установки путем интенсификации теплообмена. Выполнен аналитический обзор методов интенсификации теплообмена в конденсаторах паровых турбин. Показано, что карбонатные отложения на внутренней поверхности трубок создают термическое сопротивление на порядок выше сопротивления металлической стенки. Расчетным путем установлено, что снижение эффективной теплопроводности стенки в 2 раза приводит к росту давления в конденсаторе p_k на 15-25%. Предложен трехуровневый комплексный подход к управлению процессом теплообмена, включающий профилактические, основные и финишные мероприятия. Обоснована перспективность перехода к капельной конденсации за счет гидрофобизации поверхности, что позволяет увеличить коэффициент теплопередачи в 1,5-2 раза и снизить давление в конденсаторе на 0,5–1,0 кПа, обеспечивая прирост КПД ПТУ не менее 0,5–1,0%. Результатытребуютэкспериментальногоподтверждениянанатурныхобразцах.

Abstract. The purpose of this work is to develop and theoretically substantiate a comprehensive approach to improving the efficiency of a steam turbine condenser by intensifying heat exchange. An analytical review of methods for intensifying heat exchange in steam turbine condensers has been conducted. It has been shown that carbonate deposits on the inner surface of the tubes create thermal resistance that is an order of magnitude higher than the resistance of the metal wall. It has been calculated that a 2-fold decrease in the effective thermal conductivity of the wall leads to a 15-25% increase in the pressure in the condenser, pk. A three-level comprehensive approach to managing the heat exchange process has been proposed, which includes preventive, basic, and finishing measures. The prospects for switching to drip condensation through surface hydrophobizationhave been substantiated, which allows for a 1.5-2-fold increase in the heat transfer coefficient and a 0.5-1.0 kPa decrease in the condenser pressure, resulting in a minimum 0.5-1.0% increase in the PTA efficiency. Theresultsrequireexperimentalconfirmationusingreal-lifesamples.

Ключевыеслова: паротурбинная установка, конденсатор,гидрофобизация поверхности, отложения, теплопередача.

Key words: steam turbine plant, condenser, surface hydrophobization, deposits, heat transfer.

Введение

Одной из ключевых задач современной энергетики является повышение энергоэффективности тепловых электростанций. Несмотря на активное внедрение парогазовых установок, именно паротурбинные установки (ПТУ) остаются доминирующими в российской теплоэнергетике. Их экономичность, характеризующаяся значением КПД, в значительной степени определяется работой низкопотенциального комплекса, главным элементом которого является конденсатор турбины. Создание и поддержание глубокого вакуума (снижение давления отработавшего пара p_k) напрямую повышает теплоперепад и мощность турбины: изменение давления за турбиной на 1 кПа изменяет экономичность ПТУ примерно на 1%, а для АЭС – до 2%. Однако, на практике эффективность работы конденсаторов далека от идеальной. Основные проблемы связаны с загрязнением трубной системы, недостаточной производительностью воздухоудаляющих устройств, несоответствием характеристик циркуляционных насосов и градирен, а также с ростом температурного напора. Как следствие, возникают ограничения мощности энергоблоков: ежегодные ограничения по РФ за период 1995-2006 гг. выросли с 5,2 до 12 ГВт, а пережог топлива составляет тысячи тонн условного топлива.

Целью работы является разработка и теоретическое обоснование комплексного подхода к повышению эффективности работы конденсатора паротурбинной установки путем интенсификации теплообмена.

Основная часть

В широком смысле повышение экономичности ПТУ традиционно достигается двумя путями: совершенствованием термодинамического цикла (рост начальных параметров пара) и оптимизацией тепловой схемы. Однако повышение параметров пара требует огромных капитальных затрат и применимо лишь для новых блоков. При исследовании эффективности охлаждения конденсаторов основное внимание уделяется эксплуатационным факторам [1]: качеству охлаждающей воды, кратности охлаждения и эффективности градирен. Анализ публикаций демонстрирует широкое применение химических методов борьбы с отложениями (применение фосфонатов) и механической очистки. Что касается интенсификации самого процесса теплообмена, то существует обширная база знаний, описывающая пассивные методы (развитые и шероховатые поверхности, закручиватели потока, змеевики) и активные способы [2]. Особняком стоит метод перехода от пленочной конденсации к капельной, который, как показали эксперименты, способен на порядок снизить термическое сопротивление. Также известны работы по созданию супергидрофобных поверхностей (эффект лотоса) методами лазерной абляции и химического травления [3].

При всей многочисленности работ по интенсификации теплообмена наблюдается явный разрыв между лабораторными достижениями и их применением в реальной энергетике. Во-первых, отсутствуют систематические данные о влиянии перевода пленочной конденсации в капельную на интегральные характеристики промышленного конденсатора (коэффициент теплопередачи) при переменных режимах эксплуатации ТЭС. Во-вторых, в литературе практически не представлена информация о комбинированных способах гидрофобизации (например, сорбция из водной эмульсии в период останова + модификация внутренней поверхности), обеспечивающих одновременно высокий краевой угол смачивания и защиту от отложений. В-третьих, отсутствует методология и экспериментальные данные по внедрению гидрофобизации на действующих конденсаторах ТЭС в штатном режиме без длительных остановов.

Таким образом, проблема повышения энергоэффективности ТЭС за счет интенсификации теплообмена в конденсаторах путем перехода к капельной конденсации является крайне актуальной. Решение этой проблемы позволит снизить давление в конденсаторе, уменьшить недовыработку электроэнергии (которая на отдельных энергоблоках достигает 18–26 МВт из-за роста температурного напора), сократить пережог топлива (снижение температуры охлажденной воды на 1°С дает экономию до 2 г/кВт·ч) и повысить маневренность оборудования. Особую значимость это приобретает в условиях роста ограничений мощности

ТЭС в неотопительный период, когда из-за неэффективности охлаждения конденсаторов мощность может снижаться на 18% от установленной.

Методы исследований основываются на аналитическом исследовании эффективности применения методов интенсификации теплообмена в конденсаторах и расчетов конденсаторов и тепловых схем паротурбинных установок.

Термическое сопротивление слоя отложений рассчитывается на основе закона теплопроводности Фурье для плоской или цилиндрической стенки:

$$R_{\text{отл}} = \frac{\delta_{\text{отл}}}{\lambda_{\text{отл}} \cdot F}$$

где $\delta_{\text{отл}}$ – толщина слоя отложений, м; $\lambda_{\text{отл}}$ - коэффициент теплопроводности материала отложений, Вт/(м·К); F – площадь поверхности теплообмена, м².

Для многослойной стенки общее термическое сопротивление определяется суммированием сопротивлений всех слоев:

$$\mathrm{R_{общ}} = \mathrm{R_{пар}} + \mathrm{R_{ст}} + \mathrm{R_{отл}} + \mathrm{R_{воды}} = \frac{1}{\alpha_{\text{пар}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{отл}}}{\lambda_{\text{отл}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{воды}}}$$

Теплопроводность слоя загрязнений зависит от его химического состава, структуры и пористости. По составу на практике отложения чаще всего имеют карбонатный характер (соединения кальция и магния). Например, анализ загрязнений с Волгоградской ТЭЦ-3 показал, что сумма оксидов кальция и магния (CaO + MgO) в составе отложений достигала 90,51 %. Структура отложений часто сложна. Например, нижний слой, плотно сцепленный с металлом, трудно удаляется механически, в то время как верхний слой может быть более рыхлым. Пористость накипи существенно влияет на ее теплопроводность: чем выше пористость, тем ниже теплопроводность.

Для сравнения, теплопроводность чистой латунной стенки трубки составляет около 80–110 Вт/(м·К), в то время как теплопроводность слоя карбонатных отложений может быть в десятки раз ниже – порядка 1–3 Вт/(м·К) и даже меньше, если слой пористый. Таким образом, даже тонкий слой накипи создает термическое сопротивление на порядок выше сопротивления самой металлической стенки.

Анализ эксплуатационных данных показывает, что применение какого-либо одного метода очистки редко приводит к полному восстановлению теплотехнических характеристик конденсатора. Это обусловлено сложным, многослойным характером отложений, включающим плотный карбонатный подслой и рыхлые поверхностные загрязнения. Кроме того, различные участки поверхности могут иметь неодинаковую степень загрязнения, а геометрия трубок (овальность, профиль) создает локальные зоны, труднодоступные при применении отдельных методов.

Комплексный подход предполагает последовательное или комбинированное применение различных методов, дополняющих друг друга и обеспечивающих синергетический эффект [4]. На основе анализа литературных данных предлагается трехуровневая система, включающая профилактические, основные и финишные мероприятия.

Профилактические мероприятия включают применение систем шариковой очистки, защитных покрытий и профилированных трубок.

Системы шариковой очистки (СШО). Наиболее распространенный метод постоянной профилактики, заключающийся в циркуляции по трубкам вместе с охлаждающей водой эластичных шариков диаметром на 1–3 мм больше внутреннего диаметра трубок. Однако исследования показывают, что эффективность СШО резко снижается при наличии плотных карбонатных отложений, которые препятствуют движению шариков и приводят к их невозврату [5].

Защитные покрытия. Перспективным направлением является нанесение на внутреннюю поверхность трубок антиадгезионных или биоцидных покрытий. Современные полимерные композиционные покрытия обладают высокой технологичностью и ремонтопригодностью, обеспечивая долговременную защиту. Наноструктурированные покрытия, получаемые методом спрей-пиролиза, могут иметь срок службы до 25 лет.

Применение профилированных трубок. Исследования Татаринцева В.А. показывают, что в трубках с винтообразной профилировкой интенсивность солеотложений ниже, чем в гладких. Высота выступов накатки оказывает большее влияние, чем шаг между ними. Это следует учитывать при проектировании новых или модернизации существующих конденсаторов.

Основные мероприятия включают периодическое удаление отложений с помощью химической очистки, моющими композициями или механической очистки.

Химическая очистка. Метод основан на циркуляции через конденсатор моющих растворов, растворяющих карбонатные и другие отложения. Эффективность химической очистки подтверждена практикой: на Волгоградской ТЭЦ-3 после ВХО температурный напор снизился с 16,1 до 7,1°С, а экономический эффект составил 3,7 млн руб/год . Однако метод имеет недостатки:

- необходимость монтажа временных обвязок и приобретения реагентов;
- риск появления неплотностей в вальцовочных соединениях;
- возможное наличие остаточных отложений в виде «островков».

Разработка новых моющих композиций. Актуальным направлением является совершенствование рецептур моющих растворов. Новая моющая композиция для очистки внутренних поверхностей конденсаторных трубок обладает высокой эффективностью и обеспечивает полное удаление отложений. Экспериментальные исследования выполнены на стендовой установке, что подтверждает достоверность результатов [5].

Механическая очистка. Включает методы гидродинамической (высоконапорной) и механической (щетками, роторами) очистки.

Финишные мероприятия включают удаление остаточных загрязнений с помощью ультразвуковой обработки. Может применяться как дополнение к химической или механической очистке для разрушения остаточных отложений в труднодоступных зонах.

Заключение

В результате выполнения теоретических и расчетных исследований, направленных на повышение энергоэффективности паротурбинных установок за счет интенсификации теплообмена в конденсаторах, получены следующие основные результаты.

Расчетным путем подтверждено, что рост термического сопротивления из-за отложений (эквивалентное снижение эффективной теплопроводности стенки в 2 раза) приводит к повышению давления в конденсаторе p_k на 15–25% в зависимости от нагрузки и температуры охлаждающей воды. Это полностью согласуется с известными литературными данными (изменение p_k на 1 кПа меняет экономичность ПТУ на ~1%). Таким образом, целевое снижение p_k за счет перехода к капельной конденсации, ожидаемое на уровне 0,5–1,0 кПа, является достижимым и обеспечит прирост КПД не менее 0,5–1,0%.

В отличие от многочисленных работ, посвященных отдельным методам очистки (химической, механической, шариковой) или вопросам создания супергидрофобных поверхностей в лабораторных условиях, в данной работе впервые предложен и обоснован комплексный трехуровневый подход к управлению процессом теплообмена в конденсаторе:

- профилактический уровень (шариковая очистка + защитные покрытия + профилированные трубки);
- основной уровень (периодическая химическая / механическая очистка);
- финишный уровень (ультразвуковая обработка).

Таким образом, представленные в работе результаты подтверждают, что переход от разрозненных методов очистки к комплексной системе управления процессом теплообмена является эффективным и экономически оправданным направлением повышения энергоэффективности ТЭС. Теоретические исследования требует экспериментального подтверждения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калатузов В.А. Низкопотенциальная часть тепловых электростанций одна из причин ограничения их мощности// Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 3(65). С. 34-37.

2. КуршаковА.В., РыженковА.В., Бодров А.А.[и др.]. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ // Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 16-20.

3. Бойнович Л.Б.,Емельяненко А.М.Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. 2008. Т. 77, № 7. С. 619-638.

4. Татаринцев В.А. Повышение эффективности работы теплообменных аппаратов с внутритрубными отложениями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2021. Т.21. № 3. С. 5-13.

5. Овечкина О.В.,ЖуравлевЛ.С., АровинаН.А.Моющая композиция для очистки от отложений внутренних поверхностей трубок конденсаторов паровых турбин ТЭС всех типов // Электрические станции. 2022. № 2. С. 7-9.

УДК 621.438.9

Попов Николай Дмитриевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Popov Nikolaj Dmitrievich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Попов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Popov Alexey Yurievich, candidate of engineering sciences, associate professor of the department «Heat power plants», Komsomolsk-na-Amure State University

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОТУРБИННОЙУСТАНОВКИ С ДВУСТУПЕНЧАТЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ
FUNCTIONAL MODEL OF A GAS TURBINE UNIT WITH TWO-STAGE HEAT SUPPLY

Аннотация. Данная работа посвящена вопросуповышения эффективности использования энергии топлива в газотурбинной установке с двуступенчатым подводом теплоты. Рассмотрена возможность использования энергии отработавших газов для обеспечения тепловых потребителей. На основе полученной модели проведены тепловые расчеты газотурбинной установки.
Abstract. This work is devoted to the issue of increasing the efficiency of using fuel energy in a gas turbine installation with a two-stage heat supply. The possibility of using exhaust gas energy to provide thermal consumers is considered. Based on the obtained model, thermal calculations of the gas turbine installation were carried out.

Ключевые слова: газотурбинная установка, двухступенчатый подвод теплоты, утилизация тепловой энергии.
Key words: gas turbine plant, two-stage heat supply, heat energy utilization.

Введение

Газотурбинная установка (ГТУ) с двухступенчатым подводом теплоты – это установка, в которой процесс подвода теплоты к рабочему телу осуществляется в два этапа. Это позволяет повысить эффективность работы ГТУ за счёт приближения рабочего процесса к изотермическому.

В такой схеме атмосферный воздух сжимается в ступенях компрессора и поступает в первую камеру сгорания, где нагревается до максимальной температуры. После расширения в первой турбине продукты сгорания поступают во вторую камеру сгорания, где происходит второй этап подвода теплоты при постоянном давлении. Затем газы расширяются во второй турбине и выбрасываются в атмосферу.

В данной работе представлены результаты моделирования и анализа работы ГТУ с двухступенчатым подводом теплоты.

Основная часть

Функциональная модель газотурбинной установкиразработана в программе ХАЙСИС (Aspen HYSYS) [1]. Данная программа предназначена для визуального моделирования технологических процессов с расчетом термодинамических свойств теплоносителей.

Для расчета термодинамическихсвойств газовых смесей выбранаматематическая модель Пенг-Робинсон (Peng-Robinson) [2].

Моделирование камер сгорания выполнено с помощью операции Реактор-Гиббса (GIBBS Reactor).

В качестве топлива использован метан (CH_4).

Технологическая схема функциональной модели газотурбинной установкис двухступенчатым подводом теплоты и основные результаты теплового расчёта представлена на рис. 1.

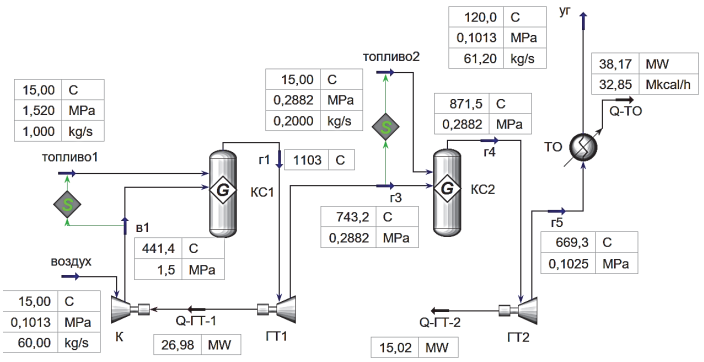


Рис. 1. Технологическая схема функциональной модели ГТУ

Технологическая схемафункциональной модели ГТУ и ее расчет выполнены в соответствии с общими положениями, предложенными в работе «Симуляторы тепловых схем энергетического оборудования» [3].

На рисунке 1 обозначены: К– компрессор;КС1, КС2– камеры сгорания;ГТ1, ГТ2 – приводная и силовая турбины; ТО – сетевой подогреватель.

В таблице приведены исходные данные и результаты расчета ГТУдвухступенчатым подводом теплоты.

Таблица

Исходные данные и результаты расчета

Название	Значение	Размерность
Исходные данные		
Степень сжатия компрессора	15	-
Расход топлива в первой ступени	1,00	кг/с
Расход топлива вовторой ступени	0,20	кг/с
Расход воздуха	60	кг/с
Результаты расчета		
Коэффициент избытка воздуха	4,5	-
Температура газов послеКС1/КС2	1100/870	°С
Температура газовза ГТ2	670	°С
Температура газовза ГТУ	120	°С
Электрическая мощность ГТУ	15	МВт
Тепловая мощность ГТУ	38 (33)	МВт (Гкал/ч)

На основе разработанной функциональной модели ГТУ проведены расчетные исследования. Так отмечено, что при неизменных параметров газогенераторной части (К, КС1, ГТ1) избыток воздуха за газовой турбиной ГТ1 позволяет повышать температуру перед турбиной ГТ2 за счет дополнительного сжигания топлива. Это приводит к повышению электрической мощности ГТУ, при этом повышается температура отработавших газов за газовой турбиной ГТ2. Так, при нулевом расходе топлива в КС2 температура отработавших газов составляет 560 °С, при расходе топлива в КС2равном 0,1 кг/с – 616 °С, а при 0,2 кг/с – 670°С. Для снижения тепловых потерь в ГТУ применен подогреватель сетевой воды, использующий теплоту отработавших газов в целях теплофикации.

На рис. 2 представлена зависимость выработки электрической и тепловой энергии от дополнительного расхода топлива во второй ступени подвода теплоты ГТУ.

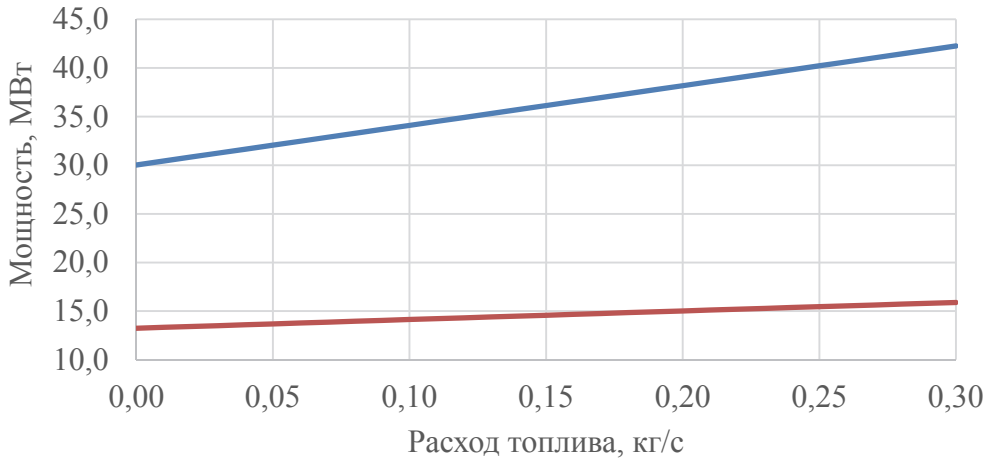


Рис. 2. Зависимость выработки электрической и тепловой энергии от дополнительнойподачи топлива во второй ступени подвода теплоты ГТУ

Таким образом,увеличение расхода топлива во второй ступени подвода теплоты на каждые 1 г/с приводит к добавлению электрической мощности ГТУ на 9 кВт, а тепловой мощности на 40 кВт.

Заключение

В статье проведена оценка возможности двуступенчатого подвода теплоты в ГТУ. Для решения этой задачи была разработана функциональная модель в программе HYSYS, проведен тепловой расчет. Дальнейшим направлением исследований является определение оптимальных значений степени сжатия в компрессоре и количеству тепловой энергии подводимой во второй ступени ГТУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aspen HYSYS. Unit Operations Guide. – Burlington : Aspen Technology, 2010. – 1722 с.

2. Peng, D.Y., Robinson, D.B. A New Two-Constant Equation of State // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals, – 1976. Т.15. – С. 59-64.

3. Симуляторы тепловых схем энергетического оборудования: метод. указания по выполнению лаб. работ / сост. А. Ю. Попов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 19 с.

УДК 621.438

Попова Алена Алексеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Popova Alyona Alekseevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Смирнов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Smirnov Alexey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Thermal Power Plants», Komsomolsk-na-Amure State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ STIG-ТЕХНОЛОГИИ
RESEARCH OF THE GAS TURBINE UNIT EFFICIENCY USING STIG TECHNOLOGY

Аннотация. Целью данной работы является исследование эффективности работы газотурбинных установок с применением STIG-технологии (впрыском пара). Рассмотрена схема соответствующей газотурбинной установки. Выполнены расчеты технико-экономических показателей отечественных газотурбинных установок ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2 без впрыска пара и с учетом впрыска пара. Оценена производительность утилизационных котлов, служащих для подачи пара в камеру сгорания газотурбинной установки. Определены технико-экономические показатели комбинированных установок в оптимальном режиме работы и с фактическим впрыском пара.

Abstract. The purpose of this work is to study the efficiency of gas turbine units using STIG technology (steam injection). The scheme of the corresponding gas turbine unit is considered. The technical and economic indicators of domestic gas turbine units GTE-65.1 and GTE-170.2 without steam injection and with steam injection are calculated. The performance of waste heat boilers used to supply steam to the combustion chamber of the gas turbine unit is evaluated. The technical and economic indicators of combined plants in the optimal operating mode and with actual steam injection have been determined.
Ключевые слова: газотурбинная установка, STIG-технология, впрыск пара, камера сгорания, утилизационный котел, эффективность работы.
Key words: gas turbine plant, STIG technology, steam injection, combustion chamber, waste heat boiler, efficiency.

Введение

Важное значение в тепловой энергетике России имеют вопросы, связанные с высокой степенью износа энергетического оборудования, КПД применяемых теплоэнергетических установок, а также с необходимостью сокращения эксплуатационных затрат. Устаревшее оборудование тепловых электростанций (ТЭС) не только снижает эффективность работы станций, но и увеличивает расход топлива, что, в условиях зависимости от природных ресурсов, становится большой нагрузкой для экономики страны. «Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2050 года» акцентирует внимание на технологическом обновлении энергетической отрасли, подчеркивая необходимость внедрения высокоэффективных решений для повышения мощности, КПД и экономической устойчивости станций.

По данным Энергетической стратегии, одним из перспективных направлений развития тепловой энергетики является внедрение парогазовых технологий, которые позволяют существенно повысить экономичность станций, а также повысить эффективность использования топлива.

Таким образом, в России государственная поддержка развития парогазовых установок (ПГУ) рассматривается как стратегический приоритет, что подтверждается планами по локализации производства отечественных газотурбинных установок (ГТУ), включая модели ГТЭ-65 и ГТЭ-170, разработанных ПАО «Силовые машины». Эти технологии открывают возможности для повышения энергетической независимости страны, а также для экспорта высокотехнологичного оборудования.

Основная часть

В парогазовых установках с впрыском пара в воздушный и/или газовый тракт энергетической газотурбинной установки в качестве рабочего тела используются продукты сгорания топлива и водяной пар, которые в виде парогазовой смеси расширяются в газовой турбине. Такие установки характеризуются относительной простотой технологического процесса и высокими показателями экономичности [1].

Увеличение удельной полезной работы ГТУ достигается не только за счет повышения температуры газа и оптимизации степени сжатия в цикле, но и за счет сокращения затрат работы на сжатие в компрессоре. Это достигается либо охлаждением воздуха в компрессоре путем впрыска воды, либо вводом в расширительную часть тракта ГТУ дополнительного рабочего тела – воды или водяного пара. Такое решение преобразует энергетическую ГТУ в ПГУ с впрыском пара, где пароводяное рабочее тело сжимается в жидкой фазе при относительно малой работе сжатия, повышая экономичность установки [2].

Существует несколько вариантов тепловых схем ПГУ с впрыском пара. Они могут быть выполнены как с отводом отработанной парогазовой смеси в атмосферу и потерей водяного пара (открытая схема), так и с конденсацией водяных паров в контактном конденсаторе или конденсаторе другого типа с возвратом рабочего тела в цикл.

В открытых схемах ПГУ с впрыском пара обычно производят только электроэнергию. В схемах с конденсацией для возврата воды требуется значительное охлаждение уходящих газов с использованием, например, газовых сетевых подогревателей (ГСП) или другого оборудования, что делает такие установки теплофикационными, так как возникает необходимость отпуска тепла внешним потребителям.

Варианты тепловых схем ПГУ с впрыском пара с отводом парогазовой смеси в атмосферу (открытая схема) приведены на рис. 1. Основными элементами схем являются энергетическая ГТУ и котел-утилизатор, в котором из химически очищенной питательной воды генерируется перегретый пар, вводимый затем в камеры сгорания ГТУ.

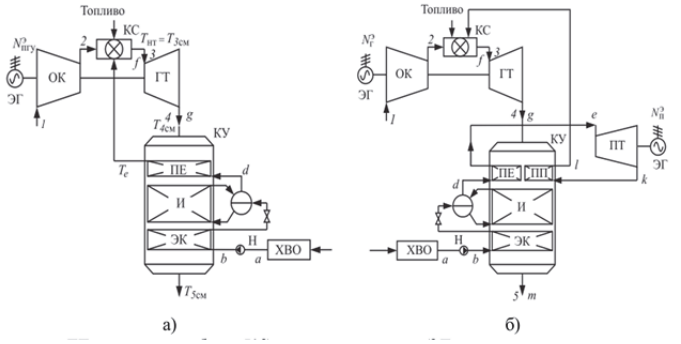


Рис. 1. Тепловые схемы ПГУ ВП открытой схемы:
ОК – осевой компрессор; КУ – котел-утилизатор; ПЕ – перегреватель;
И –испаритель; ЭК – экономайзер; Н – насос; ХВО – химическая водоочистка;
ПТ – паровая турбина; ПП – промежуточный перегреватель

Для исследования эффективности работы таких установок была предложена схема парогазовой установки с впрыском пара в камеру сгорания на основе отечественных газотурбинных двигателей ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2, разработанных ПАО «Силовые машины».

Оценка эффективности производилась по технико-экономическим и другим эксплуатационным характеристикам, полученным в результате расчета соответствующих тепловых схем.

Характеристики установок ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2 представлены в табл. 1, а результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Расчетные характеристики ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2

Модель	Номинальная мощность, МВт	Степень повышения давления	Расход выхлопных газов, кг/с	Температура на входе в турбину, °С	Температура на выходе из турбины, °С
ГТЭ-65.1	66,9	15,9	194,9	1330	555
ГТЭ-170.2	171	12,2	535	1310	539

Таблица 2

Результаты расчетов ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2

Показатель	Марка ГТУ	
	ГТЭ-65.1	ГТЭ-170.2
Температура парогазовой смеси на входе в турбину, °С	1330	1310
Температура парогазовой смеси на выходе из турбины, °С	722,98	758,71
Степень повышения давления	15,90	12,20
Степень расширения в турбине	15,09	11,57
Давление парогазовой смеси на входе в турбину, МПа	1,57	1,21
Внутренняя работа турбины, кДж/м^3	23966,05	22676,48
Внутренняя работа ПГУ, кДж/м^3	17891,40	17434,95
Электрическая работа ПГУ, кДж/м^3	16486,93	16066,31
Электрический КПД ГТУ без впрыска пара, %	37,20	34,80
Электрический КПД ПГУ с впрыском пара, % (оптимальный режим)	44,60	43,50
Электрический КПД ПГУ с впрыском пара, %	42,80	40,30
Расход топлива, м^3/с	3,74	9,81
Мощность компрессора, МВт	22,72	51,41
Мощность турбины, МВт	89,62	222,41
Расход парогазовой смеси, м^3/с	82,45	223,88
Расход воздуха, м^3/с	47,84	124,61
Подача воды/пара, кг/с (оптимальный режим)	23,99	69,76
Подача воды/пара, кг/с	19,51	57,14

Кроме того, были произведены расчеты котлов-утилизаторов (КУ) для парогазовых установок, целью которых было оценить потенциальную паропроизводительность котлов для подачи водяного пара в камеру сгорания ГТУ. Результаты расчетов по основным параметрам утилизационных котлов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчетов КУ для ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2

Показатель	Марка ГТУ	
	ГТЭ-65.1	ГТЭ-170.2
Температура пара в пароперегревателе, °С	692,98	728,71
Давление пара в пароперегревателе, МПа	1,60	1,30
Температура парогазовой смеси после турбины, °С	722,98	758,71
Температура питательной воды, °С	120,21	120,21
Паропроизводительность утилизационного котла, кг/с	20,60	58,95
Температура продуктов сгорания за экономайзером, °С	170,21	165,07

В результате сравнительного анализа полученных результатов было установлено, что, несмотря на мощность газотурбинного двигателя и соответствующие параметры отработавших газов после турбины, практически вся теплота этих газов уходит на выработку водяного пара, который полностью используется для впрыска в камеру сгорания ГТУ. Однако, даже вырабатываемое утилизационным котлом количество пара не обеспечивает работу ГТУ в оптимальном режиме, то есть с максимумом электрического КПД. Но можно отметить, что даже то количество пара, которое подано на впрыск в камеру сгорания ГТУ позволило повысить электрический КПД ГТЭ-65.1 с 37,2 до 42,8, а для ГТЭ-170.2 – с 34,8 до 40,3.

Заключение

В ходе исследования был проведен комплексный анализ возможностей применения парогазовых установок с впрыском пара для повышения экономичности и эффективности тепловых электростанций для выполнения стратегических целей тепловой энергетики России.

Были изучены виды ПГУ с впрыском пара и реализованные проекты, изучены и подобраны марки отечественных газотурбинных двигателей – ГТЭ-65.1 и ГТЭ-170.2, разработанных ПАО «Силовые машины», на основе которых разработаны соответствующие тепловые схемы.

Произведены расчетные исследования технико-экономических показателей комбинированной установки, включая характеристики котла-утилизатора. Проанализировано влияние впрыска пара на эксплуатационные показатели ГТУ. Расчеты показали, что впрыск пара в камеру сгорания ГТУ позволит повысить электрический КПД ГТЭ-65.1 с 37,2 % до 42,8 %, а для ГТЭ-170.2 – с 34,8 % до 40,3 %.

Результаты работы подчеркивают важность дальнейшего развития парогазовых технологий для обеспечения энергетической независимости и устойчивого развития тепловой энергетики России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фаворский О.Н., Цанеев С.В., Буров В.Д., Карташов Д.В. Технологические схемы и показатели экономичности ПГУ с впрыском пара в газовый тракт // Теплоэнергетика. 2005. № 4. С. 28–34.

2. Арсентьев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. Ленинград: Машиностроение, 1982. 247 с.

УДК 681.7.069.24
Руденко Михаил Сергеевич, старший преподаватель кафедры Летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Красноярский край
Rudenko Mikhail Sergeevich, Senior Lecturer at the Department of Aircraft, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Kray
Орешкин Дмитрий Игоревич, инженер, АО «Решетнёв», г. Железногорск, Красноярский край
Oreshkin Dmitry Igorevich, Engineer, Reshetnev JSC, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Kray

СНИЖЕНИЕ МАССЫ КЛЕЕВЫХ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ФЕРМЫ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ ТИТАНА
REDUCING THE WEIGHT OF THE ADHESIVE ATTACHMENT POINTS OF THE TRUSS BASED ON LASER TEXTURING OF TITANIUM

Аннотация. В работе представлены результаты подтверждения эффективности лазерного текстурирования для снижения массы ферменных конструкций космических аппаратов. Предметом исследования являлась обработка поверхности титановых втулок перед склеиванием с углепластиковыми трубками. Показано, что применение данной технологии позволяет повысить прочность клеевого соединения до 25–30 МПа. Для выбранной фермы рефлектора разработанная расчетная методика позволила уменьшить длину вклеивания титановых втулок, обеспечив снижение общей массы конструкции на 12,7%.
Abstract. The paper presents the results of confirming the effectiveness of laser texturing to reduce the mass of spacecraft trusses. The subject of the study was the surface treatment of titanium bushings before gluing with carbon fiber tubes. It is shown that the use of this technology makes it possible to increase the strength of the adhesive joint to 25-30 MPa. For the selected reflector truss, the developed calculation method made it possible to reduce the length of the titanium bushings, reducing the total weight of the structure by 12.7%.
Ключевые слова: лазерное текстурирование, снижение массы клеевого соединения, космический аппарат.
Key words: laser texturing, weight reduction of the adhesive joint, spacecraft.

Введение

Снижение массы конструкции является одним из требований при проектировании космических аппаратов (КА). Минимизация массы силовых элементов при сохранении требуемых показателей прочности и жесткости позволяет напрямую увеличить массу полезной нагрузки, выводимой на орбиту, что определяет экономическую и функциональную эффективность аппарата.

Одним из направлений реализации этой задачи является внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ), в частности углепластиков [1]. Их применение обусловлено высокими показателями удельной жесткости и прочности при минимальной плотности. Вместе с тем, технологический процесс механической обработки (сверления, фрезерования) таких материалов сопряжен с образованием технологических дефектов: нарушением целостности армирующих волокон, расслоением матрицы и возникновением микротрещин. Подобные повреждения приводят к локальной потере прочности и снижению ресурса и надежности конструкции в условиях эксплуатации, что нивелирует преимущества от использования ПКМ.

В связи с высоким риском повреждения структуры ПКМ при механической обработке, основным способом сборки конструкций из композиционных материалов становится клеевое соединение. На практике при создании силовых ферм КА углепластиковые элементы часто соединяют с деталями из титановых сплавов. Выбор титана обусловлен его высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и, что важно для совместной работы в условиях перепада температур, совместимостью с ПКМ по коэффициенту линейного теплового расширения.

Однако применение титана в клеевых узлах сопряжено с технологической трудностью. Этот металл относится к категории трудносклеиваемых материалов вследствие нали-

чия на его поверхности устойчивой пассивирующей аморфной оксидной пленки (TiO_2) [2]. Данная пленка обладает низкой поверхностной энергией и препятствует образованию прочных межатомных и межмолекулярных связей с адгезивом, что делает зону соединения потенциально слабым звеном конструкции.

Результаты проведенных исследований [3] свидетельствуют о том, что предварительная лазерная обработка поверхности (лазерное текстурирование), выполняемая по специально разработанным траекториям, обеспечивает более существенное повышение адгезионной прочности соединения титана с адгезивом по сравнению с традиционными методами подготовки (механическим рифлением и химическим травлением). Это, в свою очередь, способствует увеличению прочностных характеристик всего узла в целом.

Процесс лазерного текстурирования основан на воздействии наносекундных лазерных импульсов на поверхность титана. В результате лазерной абляции формируется система канавок, одновременно происходит модификация поверхностного слоя: тонкая пассивирующая пленка аморфного оксида трансформируется в кристаллическую фазу анатаза, обладающую более высокой химической активностью по отношению к адгезиву. Повышение прочности клеевого соединения обеспечивается совокупностью трех взаимосвязанных факторов: химической модификацией поверхности, увеличением фактической площади контакта и эффектом механического заклинивания (анкерного запирания) адгезива в сформированном микрорельефе.

Целью данной работы является подтверждение практической эффективности технологии лазерного текстурирования при создании элементов ферменных конструкций КА. В качестве объекта исследования выбрана ферма массой 3,4 кг, состоящая из клеевых соединений углепластиковых трубок с титановыми фитингами, предназначенная для фиксации рефлектора КА. Конструкция включает 216 титановых втулок диаметром 10 мм с толщиной стенки 2 мм; длина зоны вклеивания каждой втулки в углепластиковую трубку составляет 15 мм. (рисунок 1).

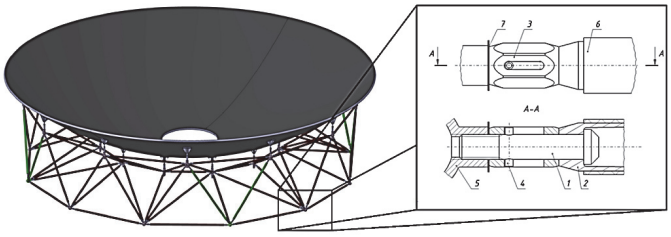


Рис. 1. Ферма с рефлектором в сборе и узел крепления стержня к фитингу, где:
1 – винт, 2 – законцовка, 3 – втулка, 4 – штифт, 5 – фитинг,
6 – углепластиковый стержень, 7 – пакет шайб

Снижение массы конструкции фермы достигается уменьшением длины вклеивания титановой втулки в углепластиковую трубку при условии сохранения требуемого усилия вырыва соединения. В настоящее время нормативный уровень прочности узла клеевого соединения с титановым сплавом ВТ14, подготовленного методом механического рифления и травления в кислотных средах, составляет не менее 13,7 МПа. Вместе с тем, согласно данным исследований [4], применение лазерного текстурирования позволяет обеспечить прочность клеевого соединения на уровне 25–30 МПа, что превышает нормативные требования.

Разработана расчетная методика, позволяющая оценить экономию массы для одной титановой втулки в зависимости от ее диаметра и достигаемого увеличения прочности клеевого соединения. На рисунке 2 представлен график данной зависимости, построенный для диапазона диаметров 10–60 мм и прочностей 20–30 МПа.

Применив данную методику, можно рассчитать экономию массы для одной втулки. При обеспечении прочности клеевого соединения 30 МПа экономия материала на одну втулку составляет 2,01 г. Для представленной фермы, содержащей 216 втулок, суммарная экономия массы составила 0,434 кг. Таким образом, сэкономленная масса составляет 12,7% от общей массы фермы благодаря применению технологии лазерного текстурирования.

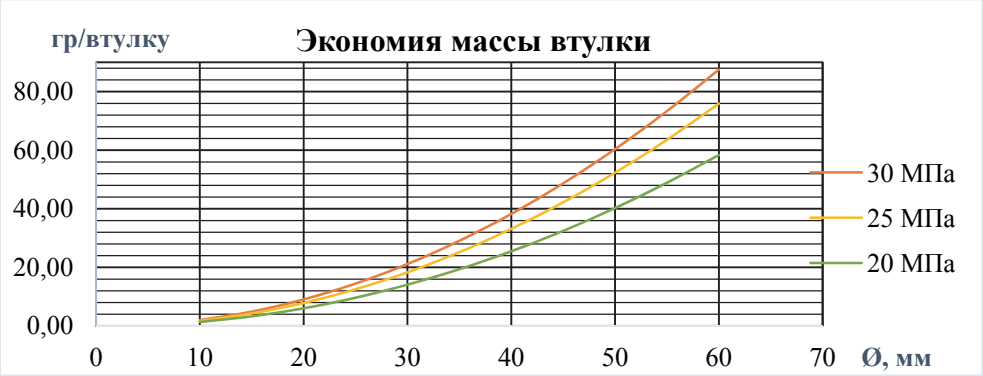


Рис. 2. Зависимость экономии массы титановой втулки от её диаметра

Заключение

В работе показано, что технология лазерного текстурирования поверхности титановых втулок обеспечивает снижение массы ферменной конструкции на 12,7% за счет уменьшения длины вклеивания при сохранении прочности соединения. Данный подход представляется особенно перспективным для крупногабаритных конструкций КА, где суммарный эффект экономии массы от оптимизации каждого соединения становится определяющим фактором при проектировании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. И. Л. Аккуратов, А. И. Алямовский, Д. Я. Давыдов [и др.] Опыт разработки и изготовления корпусных элементов оптико-электронного модуля космического аппарата из композиционных материалов // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1(4). – С. 92-100. – EDN SMYBSV.

2. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. Спецвыпуск. 2/2013. С. 25-35.

3. А. В. Гирн, М. С. Руденко, В. Б. Тайгин [и др.] Влияние лазерной обработки поверхности титановых образцов на адгезионную прочность клеевых соединений // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 2(40). – С. 90-101. – DOI 10.26732/j.st.2022.2.03. – EDN MROAKI.

4. М. С. Руденко, А. В. Гирн, А. Е. Михеев [и др.] Метод лазерного текстурирования тел вращения для повышения адгезионной прочности титанового сплава // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2025. – № 11(167). – EDN KOXCDV.

УДК 539.374, 536.2.02, 519.6, 519.163

Сейн Мо, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sein Moe, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University
Бормотин Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Bormotin Konstantin Sergeevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department «Aircraft engineering and computer-aided design», Komsomolsk-na-Amure State University

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ СВАРКИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНУЮ СРЕДУ MARC/MENTAT
WELDING PATH OPTIMIZATION BASED ON THE ANT COLONY ALGORITHM WITH INTEGRATION INTO THE MARC/MENTAT FINITE ELEMENT ENVIRONMENT

Аннотация. В работе предложена двухуровневая методика оптимизации траектории роботизированной сварки тонкостенных и сложнопрофильных конструкций на основе алгоритма муравьиной колонии (ACO), интегрированная в конечно-элементную среду Marc/Mentat. На первом уровне выполняется локальная оптимизация прохождения каждого шва в постановке

задачи коммивояжёра, а на втором определяется рациональная последовательность выполнения нескольких швов с минимизацией межшовных перемещений инструмента. Вычислительные эксперименты подтвердили устойчивую сходимость метода и снижение непроизводительных перемещений. Существенным преимуществом подхода является его полная интеграция с конечно-элементной моделью, что создаёт основу для дальнейшего развития метода в направлении термомеханически обусловленной оптимизации, включая учёт температурного поля и минимизацию остаточных напряжений.
Abstract. This paper proposes a two-level method for optimizing the path of robotic welding of thin-walled and complex-profile structures based on the ant colony algorithm (ACO), integrated into the Marc/Mentat finite element environment. At the first level, local optimization of each weld is performed in the traveling salesman problem formulation, while at the second, a rational sequence for performing multiple welds is determined while minimizing interweld tool movements. Computational experiments confirmed the stable convergence of the method and the reduction of unproductive movements. A significant advantage of this approach is its full integration with the finite element model, which creates the basis for further development of the method in the direction of thermomechanically driven optimization, including consideration of the temperature field and minimization of residual stresses.
Ключевые слова: оптимизация траектории сварки, алгоритм муравьиной колонии, конечно-элементный метод, роботизированная сварка, остаточные напряжения, температурное поле.
Key words: welding path optimization, ant colony algorithm, finite element method, robotic welding, residual stresses, temperature field.

Введение

Эффективное планирование траектории и последовательности выполнения сварных швов является одной из ключевых задач роботизированной сварки тонкостенных и сложнопрофильных конструкций. Нерациональный порядок наложения швов увеличивает холостые перемещения робота, время производственного цикла и неравномерность тепловложений, что приводит к возникновению температурных градиентов, остаточных напряжений и сварочных деформаций. Для тонкостенных элементов это особенно критично, поскольку даже небольшое коробление снижает точность сборки.

В последние годы задача оптимизации последовательности сварки активно развивается с использованием конечно-элементного моделирования и интеллектуальных алгоритмов. Последующие исследования подтвердили значительное влияние порядка сварки на остаточные напряжения и деформации в пластинчатых и Т-образных соединениях [1], а современные подходы используют методы искусственного интеллекта для минимизации деформаций тонкостенных конструкций [2,3].

Несмотря на достигнутые результаты, недостаточно исследован вопрос прямой интеграции оптимизации геометрической траектории с конечно-элементной сеткой модели, особенно в среде Marc/Mentat, где узлы сетки могут использоваться как базовые элементы сварной траектории. Кроме того, ограниченное число работ посвящено двухуровневой оптимизации, одновременно учитывающей локальный обход узлов внутри шва и глобальную последовательность нескольких швов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания вычислительного комплекса, объединяющего геометрическую оптимизацию роботизированной траектории с возможностью последующего термомеханического расширения для анализа температурных полей, остаточных напряжений и деформаций.

Целью работы является разработка и верификация двухуровневой методики оптимизации траектории сварки на основе алгоритма муравьиной колонии, интегрированной в среду Marc/Mentat.

Для достижения цели решаются задачи формирования математической модели сварных траекторий на основе узлов конечно-элементной сетки, разработки локального и глобального алгоритмов оптимизации, интеграции метода в Python API Mentat, а также прове-

дения вычислительных экспериментов и анализа перспектив дальнейшего термомеханического расширения.

1. Математическая постановка задачи

Рассмотрим сварную конструкцию, содержащую M сварных траекторий, каждая из которых представлена группой узлов конечно-элементной сетки, извлечённых из Marc/Mentat:

$$P_i = \{n_1, n_2, \ldots, n_k\}, \quad i = 1, \ldots, M . \tag{1}$$

Евклидово расстояние между любыми двумя узлами определяется по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} . \tag{2}$$

Целевая функция текущего этапа работы направлена на минимизацию суммарного перемещения сварочного инструмента:

$$L_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{M} L_i^{\text{internal}} + \sum_{i=1}^{M-1} L_i^{travel} . \tag{3}$$

где $L_i^{\text{int}ernal}$ обозначает внутреннюю длину прохождения i-го шва, а L_i^{travel} соответствует межшовному перемещению между последовательными траекториями.

2. Двухуровневая ACO-оптимизация

2.1 Локальная оптимизация сварного шва

Каждый сварной шов рассматривается как задача коммивояжёра с фиксированными начальной и конечной вершинами, выбираемыми как наиболее удалённая пара узлов.

Вероятность перехода муравья k из узла i в узел j определяется выражением:

$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \, \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{s \in \text{allowed}} \tau_{is}^{\alpha} \, \eta_{is}^{\beta}} . \tag{4}$$

где τ_{ij} представляет интенсивность феромона, $\eta_{ij} = 1 / d_{ij}$ является эвристической функцией, а α, β являются весовыми коэффициентами алгоритма [5].

2.2 Глобальная оптимизация последовательности швов

После локальной оптимизации для каждого шва формируются две возможные ориентации: прямое и обратное направления. На втором уровне мета-ACO определяет оптимальный порядок выполнения швов по критерию

$$L_{meta} = \sum_{k=1}^{M-1} d(E_k, S_{k+1}) \tag{5}$$

где L_{meta} – суммарная длина межшовных перемещений сварочного инструмента, M – число сварных швов, E_k – конечная точка k-го шва, S_{k+1} – начальная точка следующего шва, $d(E_k, S_{k+1})$ – евклидово расстояние между ними.

3. Интеграция с Marc/Mentat

Реализация алгоритма выполнена с использованием Python API системы Mentat [4], что позволяет напрямую извлекать координаты узлов конечно-элементной сетки:

x = py_get_float(f"node_x({nid})") = возвращает X-координату узла

y = py_get_float(f"node_y({nid})") = возвращает Y-координату узла

z = py_get_float(f"node_z({nid})") = возвращает Z-координату узла

Данная интеграция обеспечивает точное использование геометрии конечно-элементной модели, автоматическое формирование групп узлов швов, совместимость с нелинейным термомеханическим анализом и подготовку данных для последующего роботизированного исполнения.

4. Результаты вычислительных экспериментов

Для тестовой модели 1 с 20 сварными траекториями получены следующие результаты: суммарная внутренняя длина составила 20,0 м, межшовные перемещения = 2,4 м, а общая длина оптимизированной траектории = 22,4 м (рис.1).

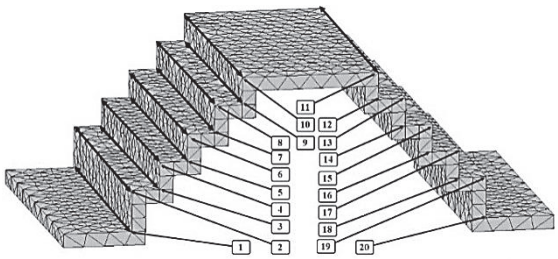


Рис. 1. Расположение групповых узлов для каждого сварного пути (тестовая модель 1)

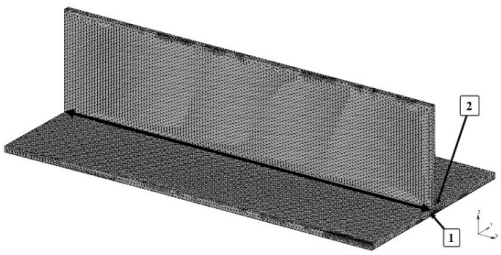


Рис. 2. Трехмерное изображение узлов тестовой модели 2 для сварных швов 1 и 2

Для тонкостенной верификационной модели 2 (рис.2) внутренняя длина швов составила 398,0115 мм, межшовный переход = 2,8778 мм, а суммарная длина = 400,8894 мм.

Полученные результаты подтверждают устойчивую сходимость метода и его применимость к задачам различной размерности, включая как крупногабаритные, так и высокоточные тонкостенные конструкции.

5. Перспективы развития: термомеханически обусловленная оптимизация

Важным направлением дальнейшего развития является включение в целевую функцию ограничений, связанных с нестационарным температурным полем, рассчитываемым в Marc/Mentat по уравнению теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(x,t). \quad (6)$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, а $Q(x,t)$ – тепловая энергия, подводимая от источника сварки. Это позволит формировать последовательности швов, обеспечивающие более равномерное распределение тепловложений и снижение локальных температурных градиентов, что особенно важно для тонкостенных конструкций, чувствительных к короблению.

Вторым перспективным направлением является использование результатов термоупругопластического анализа Marc/Mentat для минимизации остаточных напряжений после сварки. Остаточное напряжённое состояние может быть оценено как:

$$\sigma_{ост} = \mathrm{D}(\varepsilon - \varepsilon^P - \varepsilon^T). \quad (7)$$

Такой подход особенно актуален для тонкостенных конструкций транспортного, авиационного и машиностроительного назначения, где остаточные напряжения существенно влияют на долговечность и точность геометрической формы.

Заключение

В работе разработан и верифицирован двухуровневый алгоритм оптимизации траектории сварки на основе АСО, интегрированный в среду Marc/Mentat.

На текущем этапе подтверждена эффективность метода для локальной оптимизации прохождения швов, глобальной оптимизации последовательности, автоматического извлечения данных из конечно-элементной модели и подготовки траекторий для роботизированной сварки.

Дальнейшее развитие метода связано с учётом температурного поля, минимизации остаточных напряжений, снижения сварочных деформаций и создания цифровых двойников сварочного процесса для интеллектуального управления технологией сварки.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00332.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ
1. Guangming F., Marcelo I. L., Menglan D., Segen F. E., Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures // Marine Structures, 2016, Vol. 46 P. 30-55. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.12.001
2. Jigang L., Quanhui H., Fusheng D., Jun S. Optimization of Welding Sequence for Frame Structures Based on Discrete Particle Swarm Optimization to Mitigate Welding Deformation // Metals, 2026, Vol. 16(1), 23. https://doi.org/10.3390/met16010023
3. Chunbiao W., Chao W., Jae-Woong K. Welding sequence optimization to reduce welding distortion based on coupled artificial neural network and swarm intelligence algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, Vol. 114, https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105142
4. Marc and Mentat Documentation: Release 2025 URL: https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/Marc-and-Mentat-Documentation-Release-2025
5. Yan G., Yiwan Z. Path Optimization of Welding Robot Based on Ant Colony and Genetic Algorithm // Journal of Applied Mathematics, 2022, Vol. 2022(1). P. 1-11. https://doi.org/10.1155/2022/3608899

УДК 629.5.023
Серкова Алиса Анатольевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Serkova Alice Anatolyevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

НАДСТРОЙКИ СОВРЕМЕННЫХ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ
SUPERSTRUCTURES OF MODERN LARGE-TONNAGE VESSELS

Аннотация. В данной работе приведен обзор расположения надстроек на крупнотоннажных судах. Рассмотрены варианты размещения надстроек для сухогрузных судов, контейнеровозов и танкеров. Приведены особенности расположения надстроек и их организация в зависимости от различных фактов. Отмечены изменения в расположении надстроек на крупнотоннажных судах по сравнению со среднетоннажными.
Abstract. This paper provides an overview of the layout of superstructures on large-capacity vessels. It discusses the options for arranging superstructures on dry cargo vessels, container ships, and tankers. The paper highlights the specific features of the layout and organization of superstructures, taking into account various factors. It also notes the changes in the layout of superstructures on large-capacity vessels compared to medium-capacity vessels.
Ключевые слова: крупнотоннажное судно, надстройка, архитектурно-конструктивный тип.
Key words: large-tonnage vessel, superstructure, architectural and structural type.

Введение

Создание любого судна начинается с описания его архитектурно-конструктивного типа (АКТ). Совокупность следующих основных признаков характеризует АКТ судна: форма и количество корпусов; количество, размеры и положение надстроек; положение машинно-котельного отделения; высота надводного борта; количество палуб; тип и размеры грузовых отверстий; разделение переборками на отсеки или цистерны; система набора отдельных перекрытий; конструкция отдельных перекрытий; особенности конструкций судна.

Проекты судов отражают непрерывное развитие АКТ – так появились варианты корпусов с поднятой палубой (квартердек), с тентовой палубой (спардек), с шельтердеком, с

удлиненным ютом. Для создания нового проекта судна необходимо не только обладать знаниями по существующим проектам судов, но и учитывать тенденции развития АКТ разрабатываемого типа судна. В работе приводится обзор вариантов компоновок надстроек судов разных типов, построенных в последнее время.

Расположение надстройки по длине судна

Рассмотрим признак, который связан с силуэтом судна – количество и расположение надстроек. Различают следующие варианты компоновки надстроек судов: гладкопалубное (без надстроек); трехостровное; с удлиненным ютом; с удлиненным баком (длина бака $\geq 0{,}25L$); колодезное; со сплошной надстройкой.

Назначение грузового судна – это перевозка большого количества грузов на дальние расстояния. На протяжении долгого времени создавались трехостровные суда с размещением основного блока надстроек в средней части судна над машинно-котельным отделением (МКО), с баком и ютом в оконечностях. Между надстройками в палубе располагались грузовые вырезы (одинарные, парные, строенные и т.д.) для доступа в трюмы и твиндеки. Постепенно судовые энергетические установки изменили свой тип, усовершенствовались, уменьшились в размерах, по форме лучше вписались в ограниченное пространство машинного отделения судна. В результате судовую энергетику смогли разместить в корме, соответственно сместился блок надстроек от средней части судна в корму. Наибольшие объемы корпуса сухогрузных судов в средней части стали отводить под грузовые трюмы и твиндеки, а у танкеров – под грузовые танки. Для судов, перевозящих грузы, перегружаемые с помощью грузоподъемного оборудования, размещение надстроек в средней части судна также оказалось не очень удобным. Хотя в некоторых случаях в современных проектах сухогрузных судов встречается смещенное в корму расположение блока надстройки с размещением после него до юта на палубе контейнерного груза.

Стремление судовладельцев перевезти грузы в большом количестве за один рейс (получить максимальную прибыль) приводит к росту размеров судов. В результате расположение ходовой рубки стремительно отдаляется от носовой оконечности, что увеличивает мертвую зону (зону невидимости) перед судном. Для крупнотоннажных судов проектировщикам пришлось разделить блок надстройки на две части: на блок с ходовой рубкой и блок с устройствами и системами, с кожухом дымовой трубы. Часть блока надстроек с ходовой рубкой смещается от кормы в нос, занимая промежуточное положение (рис. 1, а), или перемещается в носовую часть судна (рис. 1, б). Этот вариант размещения надстроек используется, например, в проектах крупнотоннажных контейнеровозов, он дополнительно нивелирует влияние высокого штабеля палубного груза на видимость из ходовой рубки. Часть блока надстройки с кожухом дымовой трубы остается в корме или занимает промежуточное положение – между серединой судна и кормовой частью (рис. 1, а).

Надстройка в носовой части (бак) присутствует как на среднетоннажных, так и на крупнотоннажных судах, сохраняясь как по конструкции и оснащению, так и по выполняемым функциям. Реализован интересный вариант конструкции козырька бака на крупнотоннажном контейнеровозе для улучшения обтекаемости широкого, многоярусного штабеля контейнеров и защиты от морских волн (рис. 1, а).

Можно отметить несимметричное расположение относительно диаметральной плоскости судна кожуха дымовой трубы у контейнеровоза (рис. 1, б), в результате оптимально организован блок направляющих для контейнерного груза в кормовой части судна.

а)





б)





Рис. 1. Контейнеровозы [1]:
а) «Магистр Сари» – длина 335 м, ширина 45,6 м, вместимость 11360 TEU;
б) «Робби Кокс» – длина 154,97 м, ширина 25 м.

В настоящее время большинство современных грузовых судов проектируют двухостровными: с баком в носовой части судна и с блоком надстроек в корме (с присоединением юта). Данный вариант расположения надстроек оказался оптимальным для балкеров и танкеров. Разделение надстройки на две части можно отметить также у крупнотоннажных танкеров, части соединены переходными мостиками, но весь комплекс надстроек размещается в корме (рис. 2). Из-за большой длины танкера (рис.2, б) рубку пришлось поднять на три яруса над надстройкой на специальной конструкции.

Рассматривая варианты размещения надстроек у танкеров можно отметить еще одну особенность. У ранее построенных танкеров палуба юта обычно была выше главной палубы или на одном уровне с ней (рис. 2, а). Новые крупнотоннажные танкеры имеют заниженную палубу в районе кормовой оконечности на высоту целого яруса, на которой размещается часть блока надстройки с кожухом дымовых труб, системы и устройства, которые обычно располагают на палубе юта (рис.2, б). Как можно увидеть на рис.2, б, бак имеет стандартное исполнение.

а)





б)





Рис. 2. Танкеры:
а) «Верность» – длина 250 м, ширина 44 м, валовой тоннаж 64 714 т [2]
б) «Метрополия Геллеспонта» – длина 380 м, ширина 68 м, DWT 441893 т [3]

В дополнение к описанию АКТ для судов, имеющих двухтопливную энергетическую силовую установку, отличительной чертой во внешнем облике у танкеров, например, стало размещение на верхней палубе цистерн со сжиженным газом перед кормовой надстройкой вдоль судна симметрично от диаметральной плоскости.

Заключение

Описанные изменения в расположении и организации надстроек современных крупнотоннажных судов необходимо принимать во внимание при описании АКТ судна. В дальнейшем для более полного исследования можно дополнительно проанализировать изменения АКТ по судам разного тоннажа и специализации. Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при изучении специальных дисциплин студентами кораблестроительных профилей подготовки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Containerships built 2021-2030 // ShipSpotting.com: World's Central for Ship Photography and Information. URL: https://www.shipspotting.com/photos/gallery?category=294 (дата обращения 15.03.2026)
2. Tankers built 2021 – 2030 // ShipSpotting.com: World's Central for Ship Photography and Information. URL: https://www.shipspotting.com/photos/gallery?category=307 (дата обращения 15.03.2026)
3. Hellespont Metropolis. // Auke Visser's Renewed Historical Tankers Site. URL : https://www.aukevisser.nl/supertankers/id28.htm (дата обращения 15.03.2026)

УДК 621.45.018.2

Сиденко Кирилл Алексеевич, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
Kirill Alekseevich Sidenko, graduate student, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
Бирюк Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
Vladimir Vasilyevich Biryuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Thermal Engineering and Thermal Engines, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТЯГИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ
THE STAND FOR MEASURING THE THRUST OF THE PULSE JET ENGINE

Аннотация. Описывается устройство бесклапанного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, поддерживающих вибрационное (пульсирующее) горение. Анализируются недостатки стендов для измерения силы тяги реактивных двигателей в импульсных и стационарных режимах работы. Описывается устройство и принцип работы стенда для измерения силы тяги пульсирующего двигателя с определением постоянной составляющей силы тяги.

Abstract. This article describes the design of a valveless ejector pulse jet engine supporting vibratory (pulsating) combustion. The shortcomings of stands for measuring the thrust of jet engines in pulsed and stationary operating modes are analyzed. The design and operating principle of a stand for measuring the thrust force of a pulsating engine with the determination of the constant component of the thrust force are described.

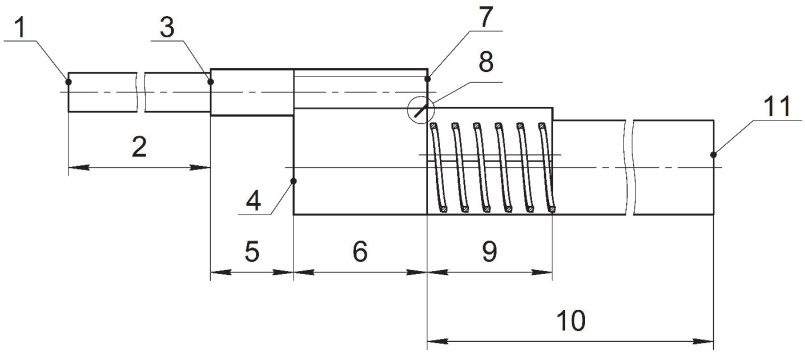
Ключевые слова: эжекторный, пульсирующий двигатель, вибрационное горение, пульсирующие горение, тягоизмерительный стенд.

Key words: ejector, pulse jet engine, vibration combustion, pulsating combustion, thrust measuring stand.

Одним из перспективных направлений развития беспилотной авиации является разработка эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, имеющего простую конструкцию, обусловленную отсутствием подвижных деталей, низкозатратного в производстве. Преимуществом данной конструкции является прогрессивная тяговая характеристика, когда с увеличением скорости набегающего потока увеличивается наполнение воздухом камеры сгорания, и, как следствие, тяга двигателя возрастает.

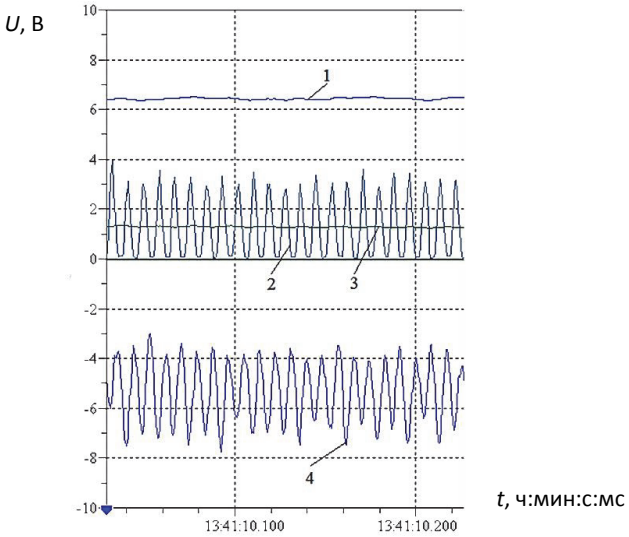
Результаты проведенных к настоящему времени экспериментальных и теоретических исследований рабочих процессов в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе разрознены, что затрудняет разработку критериев оценки эффективности работы эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. Не существует единого мнения о механизме рабочего процесса в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе.

Объектом исследования является бесклапанный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивного двигатель, впускные трубы которого направлены навстречу потоку (рис. 1) [1]. Упрощенное изображение исследуемого эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (продольный разрез) представлено на рис. 1.



1 – передний срез первой впускной трубы; 2 – первая впускная труба;
3 – задний срез первой впускной трубы и передний срез второй впускной трубы;
4 – передняя стенка камеры сгорания; 5 – вторая впускная труба; 6 – камера сгорания;
7 – задняя стенка камеры сгорания; 8 – козырек; 9 – змеевик и ниша змеевика;
10 – резонаторная труба; 11 – задний срез резонаторной трубы
Рис. 1. Исследуемый ЭПуВРД, упрощенное изображение, продольный разрез

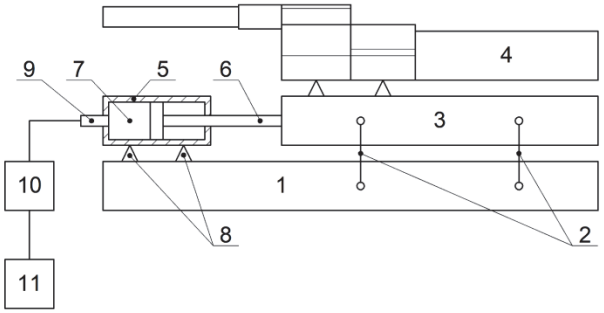
Приведем осциллограммы колебаний давления во второй впускной трубе и силы тяги, значение давления в топливном коллекторе и среднее значение давления во второй впускной трубе.



1 – давление в топливном коллекторе; 2 – давление во второй впускной трубе;
3 – среднее значение давления во второй впускной трубе; 4 – сила тяги
Рис. 2. Осциллограммы колебаний давления и силы тяги

Проблема измерения силы тяги любого пульсирующего воздушно-реактивного двигателя состоит в том, что сила тяги представляет собой переменную величину (рис. 2, кривая *4*) в то время как исследователей и разработчиков интересует постоянная составляющая силы тяги, то есть тягоизмерительный стенд для пульсирующего воздушно-реактивного двигателя должен позволять не только измерять и регистрировать силу тяги, но и выделять постоянную составляющую. Известна конструкция устройства для измерения импульсной реактивной силы тяги жидкостных ракетных двигателей малой тяги [2] существенными недостатками которой является необходимость использования задатчиков калибровочных сил, что усложняет конструкцию стенда и проведение испытаний, а также не решается проблема выделения постоянной составляющей силы тяги. Известны конструкции тягоизмерительных устройств для испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги в импульсных и стационарных режимах работы [3, 4] существенными недостатками которых являются необходимость в градуировочных устройствах и отсутствие механизма выделения постоянной составляющей, узкий диапазон силы тяги испытываемых двигателей.

Предлагаемый стенд [5] для измерения силы тяги пульсирующего воздушно-реактивного двигателя представлен на рисунке 3.



1 – станина; 2 – рычажные шарниры; 3 – подвижная платформа; 4 – двигатель; 5 – пневмоцилиндр; 6 – шток пневмоцилиндра; 7 – бесштоковая полость пневмоцилиндра; 8 – опоры; 9 – датчик давления; 10 – регистратор данных; 11 – персональный компьютер

Рис. 3. Тягомерный стенд для ЭПуВРД, упрощенное изображение

Испытываемый двигатель с помощью шарнирных подвесов закреплен к станине стенда так, что обеспечивается продольное перемещение двигателя с прикрепленным к нему штоком пневмоцилиндра, исключая поперечное перемещение.

Перед проведением измерений силы тяги полости пневмоцилиндра заполняются инертным газом, например аргоном, азотом или гелием. В невозмущенном состоянии давление газа в полостях практически равно, таким образом поршень пневмоцилиндра находится на середине длины пневмоцилиндра. Изменяя значение давления газа в полостях пневмоцилиндра в невозмущенном состоянии, возможно измерение силы тяги двигателей в широком диапазоне значений, что является отличительной возможностью предлагаемого стенда.

Измерение силы тяги пульсирующего воздушно реактивного двигателя осуществляется при установившемся рабочем процессе, при котором поршень пневмоцилиндра смещается на некоторое расстояние, а давления газа в полостях пневмоцилиндра стабилизируются на некоторых значениях. Так как собственная частота колебаний системы, состоящей из пневмоцилиндра, штока, инертного газа, груза и двигателя, не менее чем на порядок ниже частоты колебаний силы тяги, динамическое нагружение системы эквивалентно статической нагрузке. Полученные значения давления газа позволяют определить среднеинтегральные значения силы тяги пульсирующего воздушно реактивного двигателя по соответствующему графику, который строится с использованием численной модели системы, состоящей из пневмоцилиндра, штока, инертного газа, груза и двигателя, и определенных значений параметров системы таких, как общая масса поршня, штока, груза и двигателя, температура, давление, индивидуальная газовая постоянная и показатель адиабаты газа в полостях пневмоцилиндра в невозмущенном состоянии, диаметры цилиндра и штока, объемы полостей пневмоцилиндра в невозмущенном состоянии, сила трения, частота, амплитуда и конечное цикловое значение силы тяги.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сиденко К.А. Источники автоколебаний в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 112–119.
2. Патент № 2478924 C1 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. устройство для измерения импульсной реактивной силы тяги ЖРД МТ : № 2011143957/06 : заявл. 01.11.2011 : опубл. 10.04.2013 / Р. А. Палазьян, В. Ю. Рябых, С. Ю. Теплухин, Б. И. Страхов ; заявитель Федеральное казенное предприятие "Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности".
3. Патент № 2692591 C1 Российская Федерация, МПК F02K 9/96, G01M 15/14, G01L 5/13. Тягоизмерительное устройство для испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги в стационарном режиме работы : № 2018123907 : заявл. 29.06.2018 : опубл. 25.06.2019 / В. В. Рыжков, Р. Н. Гальперин, А. В. Сулинов ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва".
4. Патент № 2711813 C1 Российская Федерация, МПК F02K 9/96, G01L 5/13, G01M 15/14. Тягоизмерительное устройство для испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги в импульсных режимах работы : № 2019101733 : заявл. 22.01.2019 : опубл. 23.01.2020 / В. В. Рыжков, Ю. И. Гуляев ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва".
5. Патент на полезную модель № 237512 U1 Российская Федерация, МПК G01M 15/14, F02K 7/02. Стенд для измерения силы тяги пульсирующего воздушно-реактивного двигателя : заявл. 03.04.2025 : опубл. 25.09.2025 / К. А. Сиденко, В. В. Бирюк.

УДК 656.02

Созинова Дарья Антоновна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sozinova Daria Antonovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Гунькова Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Gunkova Olga Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТАВКИ ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА В ГОРОД КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
ORGANIZATION AND TECHNICAL SUPPORT FOR THE DELIVERY OF INDUSTRIAL OIL TO THE CITY OF KOMSOMOLSK-NA-AMURE

Аннотация. В работе рассмотрен вариант доставки масла гидравлического от завода изготовителя в городе Омске в г. Комсомольск-на-Амуре. Представлено описание процесса формирования грузовой единицы. Указаны используемые транспортные средства и перегрузочное оборудование. Рассмотрен оптимальный путь доставки груза. Целью работы является расчёт стоимости перевозки груза.

Abstract. The paper considers the delivery of hydraulic oil from the manufacturer's factory in Omsk in Komsomolsk-na-Amure. It provides a description of the cargo unit formation process. The paper specifies the vehicles and handling equipment used. The optimal route for cargo delivery is analyzed. The goal of the paper is to calculate the cost of cargo transportation.

Ключевые слова: масло гидравлическое, бочка типа II, контейнер, железнодорожная платформа, стоимость перевозки.

Key words: hydraulic oil, type II barrel, container, railway platform, transportation cost.

Введение

В районах, приравненных к районам Крайнего севера, при эксплуатации гидросистем на газораспределительных станциях и заводах, наиболее частой проблемой является коррозия и отвод тепла. Для обеспечения бесперебойной работы гидросистем активно используются индустриальные масла.

Масло индустриальное – всесезонное гидравлическое масло, разработанное для использования в системах гидравлического оборудования, для которых типичны как низкие, так и высокие температуры эксплуатации. Масло обеспечивает эксплуатацию гидравлических систем мобильной техники в широком интервале температур, защищает насосы от износа и обладает превосходной фильтруемостью, сохраняя фильтры в рабочем состоянии.

В России существуют собственные крупные компании по производству индустриальных масел (Газпромнефть, Роснефть и другие). Изготовление индустриальных масел внутри страны, а так же отсутствие таможенных сборов, позволяет газораспределительным станциям и заводам снизить транспортные расходы и сократить время доставки груза. Так же существует возможность доставки специализированным транспортом до двери, что обеспечивает сохранность качества продукта.

Целью работы является рассмотреть перевозку масла индустриального от завода изготовителя в городе Омске до предприятия в г. Комсомольск-на-Амуре.

Основная часть

Индустриальное масло Gazpromneft Hydraulic HVLP 32 создано на минеральной основе с добавлением ингибиторов коррозии, окисления и пенообразования, а также комплекса противоизносных присадок. Продукт соответствует спецификации DIN 51524-3 HVLP согласно требованиям гидравлических систем высокого давления, насосов и прецизионного гидрооснащения, работающего на открытом воздухе. Смазочный материал имеет класс вязкости ISO VG 32 и температуру застывания -48°C, масло противостоит разложению под действием высоких температур и механических нагрузок, обеспечивает гидролитическую стабильность и стойкость к окислению.

В данной работе перевозка масла Gazpromneft Hydraulic HVLP-32 осуществляется в бочках типа II – предназначены для транспортирования и хранения высоковязких, мазеобразных и сыпучих продуктов (ГОСТ 13950-91).

На рис. 1 представлен общий вид бочки типа II и ее габаритные размеры в соответствии с ГОСТ 13950-91 С.3.

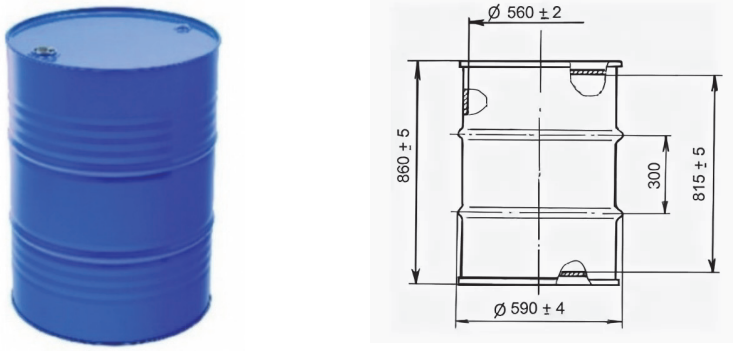


Рис. 1. Общий вид бочки типа II и ее габаритные размеры

Для отправки груза, бочки размещают на стандартный поддон 1200*800 мм, вертикально по 4 шт. Установленные на поддон бочки плотно фиксируются стрейч-пленкой в три слоя. Под стрейч-пленку укладывают картонные уголки, для защиты от повреждений.

Для транспортировки груза, поддоны размещают в стандартный 20-футовый контейнер. По 8 поддонов в 2 яруса (всего 64 бочки). Бочки фиксируются крепежными лентами с пряжками. На рис. 2 приведена схема размещения бочек в 20-футовом контейнере: вид сверху и вид сбоку [1].

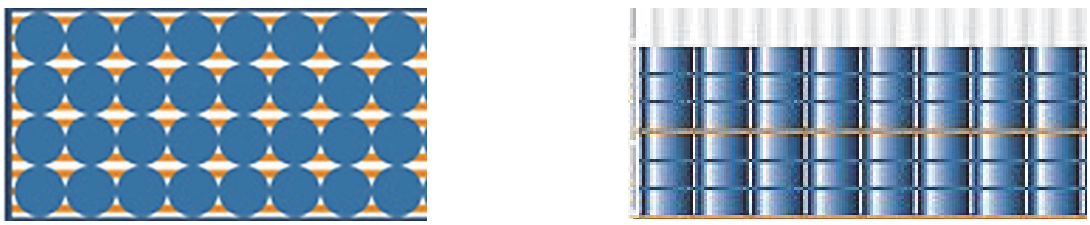


Рис. 2. Схема размещения бочек в 20-футовом контейнере, вид сверху и вид сбоку

Вес груза в бочке (брутто) 186,10 кг. Общий вес контейнера с грузом 14110,4 кг.

В работе перевозка груза осуществляется по следующему маршруту: завод изготовитель ООО «Газпромнефть-СМ» г. Омск – станция Омск-Восточный (Западно-Сибирская Железная дорога) – станция Комсомольск-на-Амуре – Амурское ЛПУМГ ООО «Газпром Трансгаз Томск».



Перевозка груза будет осуществляться двумя видами транспорта: автомобильным и железнодорожным. На рис. 3 приведена схема перевозки из начальной точки в г. Омске в пункт назначения г. Комсомольск-на-Амуре.

Рис. 3. Схема перевозки из начальной точки г. Омск в пункт назначения г. Комсомольск-на-Амуре

Автомобильная перевозка от завода изготовителя ООО «Газпромнефть-СМ» г. Омск до станции Омск-Восточный (Западно-Сибирская ЖД) осуществляется по автомобильному шоссе. Время в пути 34 минуты. Расстояние составит 23,20 км.

По прибытию на станцию Омск-Восточный контейнер перегружают на железнодорожную платформу и принимают к отправлению по железнодорожному маршруту. Груз следует по Транссибирской магистрали прямым сообщением до пункта назначения в г. Комсомольск-на-Амуре. Расстояние железнодорожной перевозки г. Омск – г. Комсомольск-на-Амуре составит 4952,20 км.

В городе назначения груз принимается к автомобильной перевозке до конечной остановки ООО «Газпром Трансгаз Томск». Время в пути 9 минут. Расстояние составит 4,1 км.

Для погрузки европаллет в контейнер используется вилочный автопогрузчик HELI CPCD35.

Для перевозки 20-футового контейнера автомобильным транспортом используется универсальный контейнеровоз BONUM 914295-05, представленный на рис.4.



Рис. 4. Универсальный автомобильный контейнеровоз BONUM 914295-05

Перевозка 20 футового контейнера железнодорожным транспортом осуществляется на вагон-платформе Sgmmns 40.

Для обработки контейнеров на терминале применяется контейнерный перегружатель-ричстакер SANY SRSC45H1.

Заключение

В ходе работы получен расчет стоимости перевозки 20-футового контейнера на железнодорожном транспорте по основному пути следования г. Омск – станция Омск-Восточный (Западно-Сибирская ЖД) – станция Комсомольск-на-Амуре.

Стоимость перевозки одного контейнера составляет 380383,80 руб. Из них: погрузочные работы 6392,80 руб., страхование груза 1218,78 руб [2].

Общее расстояние маршрута 4979,50 км.

Ориентировочное время в пути составит 18 суток, включая простои на железнодорожных станциях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Троицкая Н.А. Транспортно-технологические схемы перевозок отдельных видов грузов: учебное пособие для вузов. М.: КноРус, 2010. 231 с.
2. Расчет железнодорожного тарифа. // R-TARIFF.com. URL: http://r-tariff.com (дата обращения 17.02.2026).

УДК 533.6.04

Тарасов Владислав Николаевич, студент, Воронежский государственный технический университет
Tarasov Vladislav Nikolaevich, student, Voronezh State Technical University
Кириакиди Сергей Константинович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет
Kiriakidi Sergey Konstantinovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕХЩЕЛЕВОГО ЗАКРЫЛКА КРЫЛА СКВП С ПОВОРОТНЫМИ ПАНЕЛЯМИ ДЕФЛЕКТОРА И ОСНОВНОГО ЗВЕНА
DESIGN AND TECHNOLOGY FEATURES OF A THREE-SLIDING WING SLAPPER WITH TURNING DEFLECTOR PANELS AND MAIN LINK

Аннотация. Рассмотрены аэродинамические и конструктивные особенности крыла СКВП с трехщелевым закрылком посадочной конфигурации при различных углах установки поворотной панели основного звена закрылка для разных положений поворотной панели дефлектора относительно нейтрального положения крейсерского режима полета.
The aerodynamic and design features of the SKVP angle with a three-slot landing flap in various angles of installation of the main flap link swivel panel for different positions of the deflector swivel panel relative to the neutral position of the cruising flight mode are considered.
Ключевые слова: крыло самолета, трехщелевой закрылок, поворотная панель дефлектора, поворотная панель основного звена, коэффициент сопротивления, коэффициент подъемной силы.
Key words: aircraft wing, three-slot flap, deflector rotary panel, main link rotary panel, drag coefficient, lift coefficient.

Введение

Достаточно возможным этапом разработки нового воздушного судна является отработка эффективной механизации, а для самолета короткого взлета и посадки это один из главных этапов.

Эффективная механизация обеспечивает возможность получения небольших по величине скоростей отрыва ЛА при взлете и посадке на этапе приземления. Это важно с точки зрения простоты и безопасности выполнения взлета-посадки, а также для обеспечения минимальной дины взлетно-посадочной полосы, необходимой для эксплуатации ЛА.

Цель работы – изучение аэродинамических и конструктивных особенностей трехщелевого закрылка крыла самолета посадочной конфигурации с поворотными панелями дефлектора и основного звена, а также подвижной панелью, установленной по нижней поверхности данного закрылка.

Основная часть

Рассмотрен трехщелевой закрылок, состоящий из основного звена и жестко соединенного с ним дефлектора, между которыми на режимах взлета и посадки сформирован второй аэродинамический канал, а первый аэродинамический канал на данных режимах получен между хвостовой частью крыла и дефлектора. На крейсерском режиме полета второй аэродинамический канал сверху перекрыт поворотной панелью дефлектора, установленной

шарнирно по верхней задней его кромке, а снизу — передней частью подвижной панели **закрылка**, установленной по направляющим, на нижней поверхности его основного звена. Причем, основное звено закрылка разделено третьим аэродинамическим каналом на две, жестко соединенные между собой, части — носовую и хвостовую. Данный аэродинамический канал на крейсерском режиме полета сверху перекрыт поворотной панелью основного звена закрылка, установленной шарнирно по верхней задней кромке носовой части основного звена, а снизу – средней частью подвижной панели закрылка.

Поворотная панель дефлектора, на режимах взлета и посадки установленная в определенное положение, способствует дополнительному увеличению скорости потока, проходящего через второй аэродинамический канал на верхнюю поверхность механизированного крыла, увеличивая соответственно, циркуляцию скорости вокруг крыла и его подъемную силу. Таким же образом поворотная панель основного звена закрылка на рассматриваемых режимах, с установкой в определенное положение, обеспечивает дополнительное увеличение циркуляции скорости вокруг крыла и подъемной силы. Причем, при выходе подвижной панели закрылка, во взлетно-посадочное положение и одновременном смещении ее хвостовой части за заднюю кромку закрылка, увеличена общая площадь и кривизна крыла.

Постановка задачи.

Необходимо определить влияние угла установки поворотной панели дефлектора на коэффициент подъемной силы и коэффициент сопротивления механизированного крыла самолета короткого взлета и посадки посадочной конфигурации при различных положениях поворотной панели основного звена трехщелевого закрылка относительно нейтрального (крейсерского) положения.

Исходные данные:

$v = 40$ м/с – скорость ЛА при посадке;

$\alpha_{пос} = 11^{o}$ – посадочный угол атаки крыла;

$\delta_{з} = 43^{o}$ – угол установки закрылка в посадочном положении;

$\overline{b_{п}} = 0{,}314$ – относительная длина подвижной панели закрылка;

$\delta_{пд} = 6^{o};\ 10^{o};\ 15^{o}$ – угол установки поворотной панели дефлектора относительно нейтрального положения;

$\delta_{поз} = 6^{o};\ 8^{o};\ 10^{o};\ 12^{o}$ – угол установки поворотной панели основного звена закрылка относительно нейтрального положения.

Определение коэффициента подъемной силы и коэффициента сопротивления крыла СКВП посадочной конфигурации выполнено экспериментально с использованием расчетного пакета.

В результате получены следующие аэродинамические параметры (таблица 1, 2).

Таблица 1

Коэффициент подъемной силы механизированного крыла самолета короткого взлета и посадки режима “посадка”

	C_y			
$\delta_{пд}$	$\delta_{поз} = 6^{o}$	$\delta_{поз} = 8^{o}$	$\delta_{поз} = 10^{o}$	$\delta_{поз} = 12^{o}$
6^{o}	2,53	2,52	2,51	2,50
10^{o}	2,54	2,53	2,52	2,50
15^{o}	2,52	2,51	2,50	2,48

Таблица 2

Коэффициент сопротивления крыла СКВП при посадке

	C_x			
$\delta_{пд}$	$\delta_{поз} = 6^{o}$	$\delta_{поз} = 8^{o}$	$\delta_{поз} = 10^{o}$	$\delta_{поз} = 12^{o}$
6^{o}	0,752	0,748	0,742	0,738
10^{o}	0,750	0,746	0,740	0,735
15^{o}	0,741	0,737	0,732	0,727

На рисунке 1 показан график зависимости коэффициента подъемной силы от угла установки поворотной панели основного звена трехщелевого закрылка крыла СКВП при различных положениях поворотной панели дефлектора.

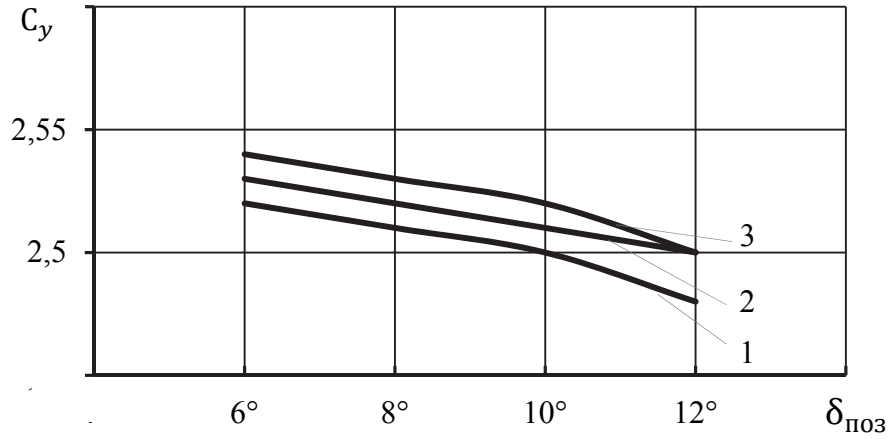


Рис. 1. График зависимости коэффициента подъемной силы от угла установки поворотной панели основного звена трехщелевого закрылка крыла СКВП при различных положениях поворотной панели дефлектора

На рисунке 2 дан график зависимости коэффициента сопротивления механизированного крыла СКВП посадочной конфигурации от угла установки поворотной панели основного звена закрылка при различных положениях поворотной панели дефлектора.

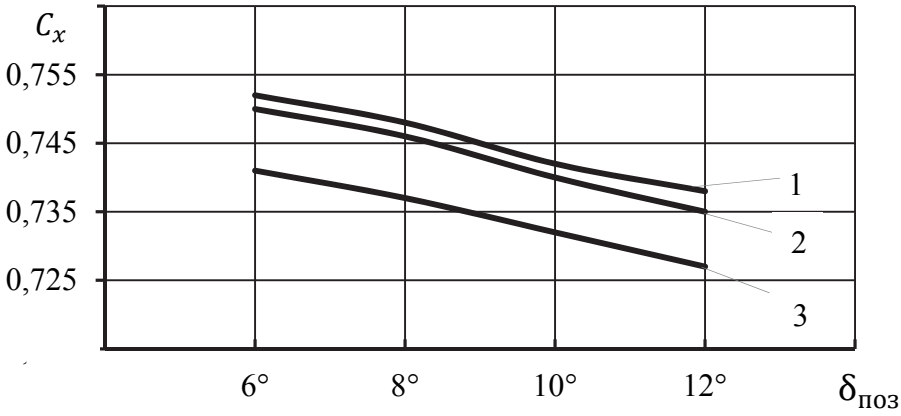


Рис. 2. График зависимости коэффициента сопротивления механизированного крыла СКВП посадочной конфигурации от угла установки поворотной панели основного звена закрылка при различных положениях поворотной панели дефлектора

На рисунке 3 показана структура распределения давления вокруг механизированного крыла самолета короткого взлета и посадки на режиме “посадка” при $\delta_{пд} = 6^o$, $\delta_{поз} = 8^o$.

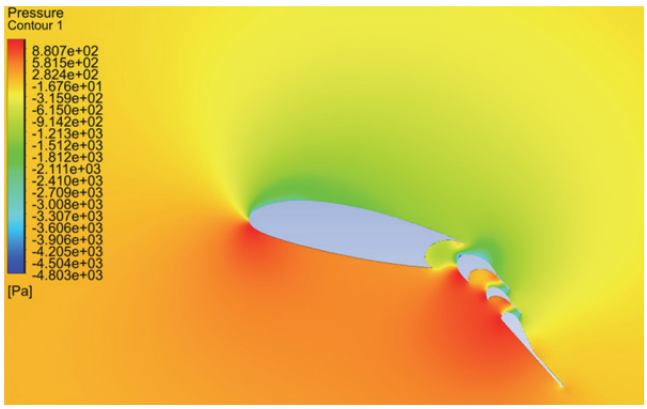


Рис. 3. Распределение давления вокруг механизированного крыла СКВП посадочной конфигурации при $\delta_{пд} = 6^o$, $\delta_{поз} = 8^o$

Заключение

Полученные расчетные аэродинамические параметры крыла СКВП с трехщелевым закрылком позволяют сделать вывод.

В соответствии с указанными в работе исходными данными, при уменьшении угла установки поворотной панели основного звена закрылка от $\delta_{поз} = 12^{o}$ до $\delta_{поз} = 6^{o}$ коэффициент подъемной силы крыла СКВП с трехщелевым закрылком посадочной конфигурации и коэффициент сопротивления увеличиваются для:

$\delta_{пд} = 6^{o}$ от $C_y = 2{,}50$ до $C_y = 2{,}53$ и от $C_x = 0{,}738$ до $C_x = 0{,}752$
$\delta_{пд} = 10^{o}$ от $C_y = 2{,}50$ до $C_y = 2{,}54$ и от $C_x = 0{,}735$ до $C_x = 0{,}750$
$\delta_{пд} = 15^{o}$ от $C_y = 2{,}48$ до $C_y = 2{,}52$ и от $C_x = 0{,}727$ до $C_x = 0{,}741$

Максимальное значение коэффициента подъемной силы крыла СКВП при посадке $C_y = 2{,}54$ соответствует углу установки поворотной панели основного звена закрылка $\delta_{поз} = 6^{o}$ и положению поворотной панели дефлектора относительно нейтрального положения $\delta_{пд}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мхитарян, А. М. Аэродинамика: учебник / А. М. Мхитарян – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 448 с.

2. Остославский, И. В. Аэродинамика самолета: учебник / И. В. Остославский – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1957. – 561 с.

3. Мартынов, А. К. Экспериментальная аэродинамика: учебник / А. К. Мартынов – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Оборонгиз, 1958. – 346 с.

УДК 533.6.04

Тарасов Владислав Николаевич, студент, Воронежский государственный технический университет

Tarasov Vladislav Nikolaevich, student, Voronezh State Technical University

Кириакиди Сергей Константинович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет

Kiriakidi Sergey Konstantinovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕРЕКРЫВНОЙ СТВОРКИ ОСНОВНОГО ЗВЕНА ТРЕХЩЕЛЕВОГО ЗАКРЫЛКА НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ КРЫЛА САМОЛЕТА КОРОТКОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ ПРИ ВЗЛЕТЕ
EFFECT OF THE POSITION OF THE MAIN LINK OF THE THREE-SLOT FLAP ON THE LIFTING FORCE OF THE SHORT TAKEOFF AND LANDING AIRCRAFT WING DURING TAKEOFF

Аннотация. Представлены данные исследования по оценке зависимости коэффициента подъемной силы крыла СКВП с трехщелевым закрылком от положения перекрывной створки основного звена закрылка при различных углах установки поворотной хвостовой части его нижней подвижной панели.

Abstract. The article presents research data on the dependence of the lift coefficient of a three-slot flap wing on the position of the flap's main link's overlapping flap at various angles of the lower movable panel's rotary tail section.

Ключевые слова: крыло самолета, трехщелевой закрылок, перекрывная створка, подвижная панель, поворотная хвостовая часть панели, коэффициент подъемной силы.

Key words: aircraft wing, three-slotted flap, overlapping flap, movable panel, rotating tail section of the panel, lift coefficient.

Введение

Одним из направлений совершенствования нового воздушного судна является обеспечение высокого уровня его взлетно-посадочных характеристик (ВПХ). Такие параметры как посадочная скорость, скорость отрыва при взлете, минимальная посадочная в посадочной конфигурации, минимальная скорость взлета при взлетной конфигурации существенно влияют на безопасность и простоту пилотирования на данных режимах полета. Кроме того, посадочная скорость и скорость отрыва ЛА при взлете напрямую влияют на длину потребной для эксплуатации взлетно-посадочной полосы. Обеспечение необходимого уровня ВПХ, в свою очередь, напрямую связано с эффективной механизацией данного воздушного судна.

Цель работы – изучение конструктивных и аэродинамических особенностей эффективного закрылка самолета короткого взлета и посадки.

Основная часть

Рассмотрен трехщелевой закрылок крыла ЛА, включающий основное звено и жестко соединенный с ним дефлектор. При выходе закрылка во взлетнно-посадочное положение между хвостовой частью крыла и дефлектором сформирован первый аэродинамический канал. Между дефлектором и основным звеном образован второй аэродинамический канал, который на крейсерском режиме полета сверху перекрыт хвостовой частью крыла, а снизу — подвижной панелью, установленной по направляющим по нижней поверхности закрылка и имеющей возможность перемещения за заднюю кромку закрылка за счет соответствующего привода. Основное звено закрылка представляет собой конструкцию, состоящую из носовой части и хвостовой, между которыми расположен третий аэродинамический канал, в свободном положении, на режимах взлета и посадки, способствующий дополнительному увеличению циркуляции скорости вокруг крыла и, соответственно, увеличению его подъемной силы. Входное сечение данного канала на крейсерском режиме полета перекрыто нижней подвижной панелью закрылка, а выходное сечение — поворотной перекрывной створкой, установленной шарнирно по верхней задней кромке носовой части основного звена закрылка. Причем нижняя подвижная панель закрылка включает поворотную хвостовую часть, которая на режимах взлета и посадки смещена за заднюю кромку закрылка и развернута на необходимый угол относительно нейтрального положения, увеличивая площадь и кривизну профиля крыла на данных режимах.

Постановка задачи.

Необходимо оценить влияние угла установки перекрывной створки основного звена рассматриваемого закрылка на коэффициент подъемной силы крыла СКВП взлетной конфигурации при различных углах отклонения поворотной хвостовой части нижней подвижной панели закрылка.

Исходные данные:

$v = 40$ м/с – скорость ЛА при взлете;

$\alpha_{отр} = 7^o$ – угол атаки крыла при отрыве;

$\delta_з = 36^o$ – угол установки закрылка во взлетном положении;

$\overline{b_{хв}} = 0{,}186$ – относительная длина поворотной хвостовой части подвижной панели;

$\delta_{ств} = 8^o;\ 10^o;\ 12^o;\ 15^o$– угол установки перекрывающей створки относительно нейтрального положения;

$\delta_{хв} = 20^o;\ 27^o;\ 30^o$ – угол отклонения поворотной хвостовой части нижней подвижной панели от нейтрального положения.

Расчет коэффициента подъемной силы механизированного крыла выполнен экспериментально с использованием аэродинамического расчетного пакета.

При этом получены следующие данные (таблица 1).

Таблица 1

Коэффициент подъемной силы крыла СКВП взлетной конфигурации

	Cy		
$\delta_{ств}$	$\delta_{хв} = 20^o$	$\delta_{хв} = 27^o$	$\delta_{хв} = 30^o$
8^o	2,62	2,59	2,55
10^o	2,59	2,51	2,51
12^o	2,49	2,45	2,46
15^o	2,31	2,35	2,37

На рисунке 1 представлен график зависимости коэффициента подъемной силы крыла СКВП от положения перекрывной створки основного звена и угла установки поворотной хвостовой части нижней подвижной панели трехщелевого закрылка при взлете.

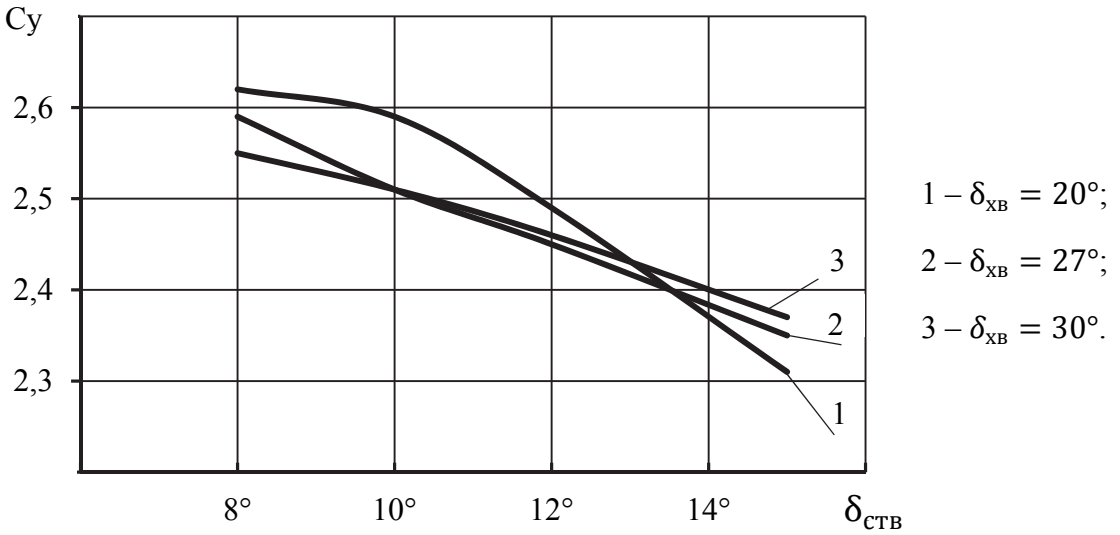


Рис. 1. Зависимость коэффициента подъемной силы крыла СКВП от положения перекрывной створки основного звена трехщелевого закрылка при различных углах установки поворотной хвостовой части нижней подвижной панели

На рисунке 2 дано распределение давления вокруг профиля крыла при взлете для $\delta_{ств} = 8°$, $\delta_{хв} = 27°$.



Рис. 2. Распределение давления вокруг профиля крыла при взлете для $\delta_{ств} = 8°$, $\delta_{хв} = 27°$

Заключение

Полученные расчетные данные позволяют сделать следующий вывод. Наиболее эффективным, определяющим максимальное значение коэффициента подъемной силы крыла СКВП с трехщелевым закрылком при взлете, является угол установки створки $\delta_{ств} = 8^o$.

При изменении угла установки перекрывной створки основного звена трехщелевого закрылка крыла самолета при взлете от $\delta_{ств} = 15^o$ до $\delta_{ств} = 8^o$ коэффициент подъемной силы возрастает от $C_y = 2{,}31$ до $C_y = 2{,}62$.

Максимальное значение коэффициента подъемной силы крыла СКВП взлетной конфигурации $C_y = 2{,}62$ при сформулированных в работе исходных данных соответствует положению перекрывной створки основного звена закрылка $\delta_{ств} = 8^o$ и углу установки поворотной хвостовой части подвижной панели закрылка $\delta_{хв} = 20°$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мхитарян, А. М. Аэродинамика: учебник / А. М. Мхитарян – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 448 с.

2. Остославский, И. В. Аэродинамика самолета: учебник / И. В. Остославский – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1957. – 561 с.

3. Мартынов, А. К. Экспериментальная аэродинамика: учебник / А. К. Мартынов – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Оборонгиз, 1958. – 346 с.

УДК 539.3

Чепурнова Елена Константиновна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Chepurnova Elena Konstantinovna, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

Андрианов Иван Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Andrianov Ivan Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, docent, Department of Aircraft Engineering and Computer Design,Komsomolsk-na-Amure State University

РОТАЦИОННОЕ АВТОФРЕТИРОВАНИЕ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ
ROTATIONAL AUTOFRETTAGE OF THICK-WALLED CYLINDERS WITH NON-LINEAR HARDENING

Аннотация. В исследовании рассмотрен процесс ротационного автофретирования толстостенных цилиндров из несжимаемого материала в условиях плоского деформированного состояния при нелинейном упрочнении. Получено условие возникновения пластических деформаций на внутренней поверхности цилиндра, условие перехода всей стенки цилиндра в область пластического деформирования при вращении, а также условие зарождения вторичных пластических деформаций при разгрузке для кинематической модели упрочнения.

Abstract. The study considers the process of rotational autofretting of thick-walled cylinders made of incompressible material under conditions of a plane deformed state. The condition for the occurrence of plastic deformations on the inner surface of the cylinder, the transition of the entire cylinder wall into the region of plastic deformation during rotation, and the condition for the initiation of secondary plastic deformations during unloading for a nonlinear kinematic model of hardening are obtained.

Ключевые слова: ротационное автофретирование, вращение, толстостенный цилиндр, деформационное упрочнение, плоская деформация.

Key words: rotational autofrettage, rotation, thick-walled cylinder, strain hardening, flat deformation.

Введение. Современное развитие производственной сферы связано с исследованием вопросов повышения надежности и долговечности изделий. Одним из эффективных методов повышения упругой прочности является поверхностное упрочнение за счет создания поля остаточных напряжений путем технологии автофретирования. В частности, широкое распространение получило ротационное автофретирование, которое представляет собой пластическое деформирование слоя стенки цилиндра в процессе вращения. Актуальность исследования обусловлено потребностью производства в повышении прочности изделий при цикличе-

ском и знакопеременном нагружении. Одним из отличий процедуры автофретирования от традиционных методов поверхностного упрочнения является то, что автофретирование позволяет обеспечить более равномерное распределение остаточных напряжений на заданной глубине. В случае традиционных методов упрочнения имеет место ограниченный ресурс упрочненного слоя. Вопросы ротационного автофретирования неразрывно связаны с проблемой исследования напряженно-деформированного состояния деталей при знакопеременном нагружении, что отражено в трудах [1-3].

Основная часть. В рамках данного исследования требовалось рассмотреть условия возникновения пластических деформаций при ротационном автофретировании толстостенных цилиндров в условиях плоской деформации и нелинейного закона деформационного упрочнения. При проведении математической постановки задачи принималось, что на внутренней поверхности цилиндра радиальные перемещения отсутствуют. Цилиндр находится в условиях плоской деформации: осевая деформация $\varepsilon_z = 0$ принималась равной нулю. Дифференциальное уравнение равновесия при ротационном автофретировании цилиндра в безразмерных параметрах в цилиндрической системе координат принимает следующий вид:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\beta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\beta} + \Omega\beta = 0. \qquad (1)$$

где $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ – радиальное и окружное напряжения, деленные на предел текучести материала σ_Y, $\beta = \rho/R$, ρ – радиальная координата, R – внешний радиус цилиндра, $\Omega = DR^2\omega^2/\sigma_Y$ – параметр, учитывающий действие инерционных сил, D – плотность, ω – угловая скорость.

Диаграмма деформирования материала описывалась упругопластической моделью со степенным деформационным упрочнением $\sigma_i = A\varepsilon_i^{\,n}$ при $\varepsilon_i > \varepsilon_{iY}$, где σ_i – интенсивность напряжений, деленная на предел текучести материала, ε_i – интенсивность деформаций, A, n – безразмерные параметры упрочнения; ε_{iY} – интенсивность деформаций, соответствующая переходу упругих деформаций в пластические; материал цилиндра принимался несжимаемым. В пределах упругих деформаций выполнялся обобщенный закон Гука. При упругопластической разгрузке поведение материала описывалось кинематической моделью упрочнения.

Согласно результатам исследования определено значение параметра Ω, при котором на внутренней поверхности цилиндра зарождаются пластические деформации:

$$\Omega_{cr} = 2/\sqrt{3},$$

а также соответствующее значение угловой скорости:

$$\omega_{cr} = \left(2\sigma_Y/\left(\sqrt{3}DR^2\right)\right)^{1/2}.$$

Также были определены значения параметра Ω и угловой скорости, при которых вся стенка цилиндра переходит в пластическое состояние:

$$\Omega_{pr} = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{A}{nE^n}\frac{(1-\delta^{2n})}{\delta^{2n}(1-\delta^2)}, \qquad \omega_{pr} = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\sigma_Y}{DR^2}\frac{A}{nE^n}\frac{(1-\delta^{2n})}{\delta^{2n}(1-\delta^2)}}.$$

где E – модуль упругости, деленный на предел текучести материала, $\delta = r/R$, r – внутренний радиус цилиндра.

Получены соотношения для определения значений параметра Ω и угловой скорости, которые необходимы для достижения заданного уровня автофретирования, определяемого толщиной пластической области в стенке цилиндра:

$$\Omega = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\left(1-\delta_{pl}^2\right)}{(1-\delta^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{A}{nE^n}\frac{\left(\delta_{pl}^{2n}-\delta^{2n}\right)}{\delta^{2n}(1-\delta^2)}, \qquad \omega = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\sigma_Y}{DR^2}\left[\frac{\left(1-\delta_{pl}^2\right)}{(1-\delta^2)} + \frac{A}{nE^n}\frac{\left(\delta_{pl}^{2n}-\delta^{2n}\right)}{\delta^{2n}(1-\delta^2)}\right]}.$$

где $\delta_{pl} = \rho_{pl}/R$ – относительный радиус стенки цилиндра, где упругая область деформирования переходит в пластическую, $\delta = r/R$.

Получено условие появления пластической деформации на внутренней поверхности цилиндра при разгрузке:

$$\Omega_{af} = 4/\sqrt{3},$$

а также соответствующее значение угловой скорости

$$\omega_{af} = \left(4\sigma_Y/\left(\sqrt{3}DR^2\right)\right)^{1/2}.$$

На рис. 1 представлены результаты расчета параметра Ω, учитывающего действие инерционных сил, в зависимости от параметра упрочнения n для $\delta = 0{,}2$. Согласно результатам расчета с увеличением параметра упрочнения n отмечается рост параметра Ω. Соответственно, для перевода большей части стенки цилиндра в область пластического деформирование требует увеличение угловой скорости. Наименьшие значения параметра Ω, при котором обеспечивается заданный уровень автофретирования, достигаются при $n = 0$, что соответствует модели идеального упругопластического тела.

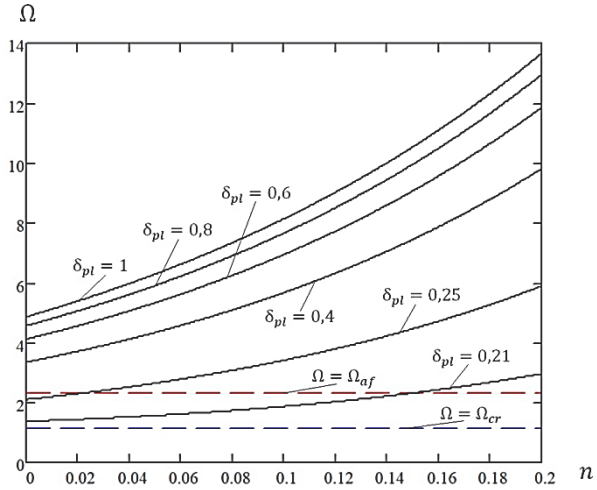


Рис. 1. Зависимость параметра Ω, учитывающего действие инерционных сил, от параметра упрочнения n

Заключение. Таким образом, в рамках проведенного исследования получены условия возникновения пластических деформаций в стенке цилиндра при вращении и разгрузке. Отмечается, что в случае кинематического упрочнения при ротационном автофретировании толстостенного несжимаемого цилиндра с жестко закрепленными торцами угловая скорость, при которой в процессе разгрузки возникают вторичные пластические деформации, в два раза превышает критическую скорость, которая соответствует зарождению пластических деформаций на внутренней поверхности при нагружении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. 3–е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2023. 402 с.

2. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях. Москва : Изд–во МГУ, 1965. 263 с.

3. Прокудин А.Н., Буренин А.А. Аналитическое исследование ротационного автофретирования полых цилиндров на основе общего кусочно–линейного условия пластичности // Прикладная математика и механика. 2025. Т. 89. № 6. С. 1028–1045. – DOI: 10.7868/S3034575825060118.

УДК 656.02
Шаравьева Наталья Геннадьевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Sharaveva natalia gennadevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Гунькова Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и механика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Gunkova Olga Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department “Shipbuilding and Mechanics”, Komsomolsk-na-Amure State University

ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТАВКИ ЛИТЬЯ СТАЛЬНОГО И ЧУГУННОГО ИЗ ООО «АМУРМЕТАЛЛ-ЛИТЬЕ» В ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ
ORGANIZATION AND TECHNICAL SUPPORT FOR THE DELIVERY OF STEEL AND IRON CASTINGS FROM LLC "AMURMETALL-LITYO" TO THE ZABAIKALSKY KRAI

Аннотация. В данной работе рассматривается логистический процесс транспортировки литейной продукции, погруженной навалом в 24-тонный контейнер, по маршруту: г. Комсомольск-на-Амуре (ООО «Амурметалл-литье») → железнодорожная станция Комсомольск-на-Амуре → железнодорожная станция Тында → с. Соловьевск Тындинского муниципального округа Амурской области. Доказано, что комбинирование автомобильного и железнодорожного транспорта с двумя перевалочными пунктами и использованием 24-тонного контейнера позволяет минимизировать транспортные издержки, снизить риски повреждения продукции при погрузке навалом и гарантировать сохранность груза даже при доставке в труднодоступные населенные пункты, такие как село Соловьевск.
Abstract. This paper examines the logistics process of transporting foundry products loaded in bulk into a 24-ton container along the route: Komsomolsk-on-Amur (LLC Amurmetall-Litve) → Komsomolsk-on-Amur railway station → Tynda railway station → Solovyovsk village, Tynda Municipal District, Amur Region. It is demonstrated that combining road and rail transport with two transshipment points and using a 24-ton container minimizes transport costs, reduces the risks of product damage during bulk loading, and guarantees cargo safety even when delivering to remote locations such as Solovyovsk.
Ключевые слова: смешанная перевозка, литейная продукция, контейнерные перевозки, погрузка навалом, перевалочный пункт.
Key words: multimodal transportation, foundry products, container shipping, bulk loading, transshipment point.

Введение

Эффективная организация доставки литейной продукции является важной задачей для промышленных предприятий, особенно когда речь идет о перевозках в удаленные и труднодоступные регионы. Литейные изделия (стальное и чугунное литье) обладают значительным весом и, как правило, устойчивы к механическим повреждениям, что допускает применение навалочной погрузки. Однако при выборе способа транспортировки необходимо учитывать не только физико-механические свойства груза, но и экономические факторы, а также логистические ограничения, связанные с инфраструктурой.

Основная часть

Литейная продукция – это изделия, полученные методом литья, который включает в себя отливку расплавленного металла или другого материала в форму для создания различных деталей и компонентов.

На рис. 1 предоставлен чертеж литейного изделия производства ООО «Амурметалл-Литье» [1].

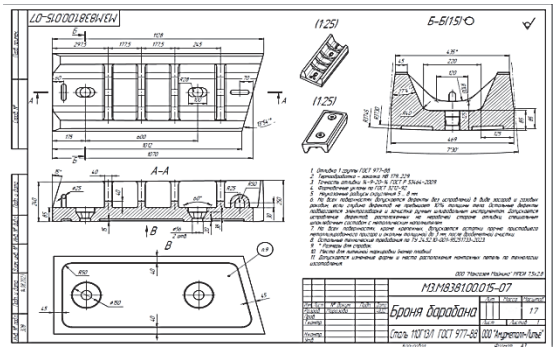


Рис. 1. Литейное изделие (броня барабана)



Рис. 2. Крупнотоннажный контейнер 1СС

В данной работе принимается изделие, габаритными размерами согласно рис. 1, вес одной единицы составляет 530 кг.

Литейные изделия допускается перевозить с использованием погрузки навалочным методом, так как изделия (например, чушки, отливки, крупные детали) устойчивы к механическим повреждениям при падении или соприкосновении друг с другом.

Для транспортировки литья стального и чугунного не поименованного в алфавите, укрупненной грузовой единицей, принимаем контейнер 20-ти футовый, 24т (рис. 2).

На рис. 3 приведен эскиз размещения и крепления груза в контейнере.

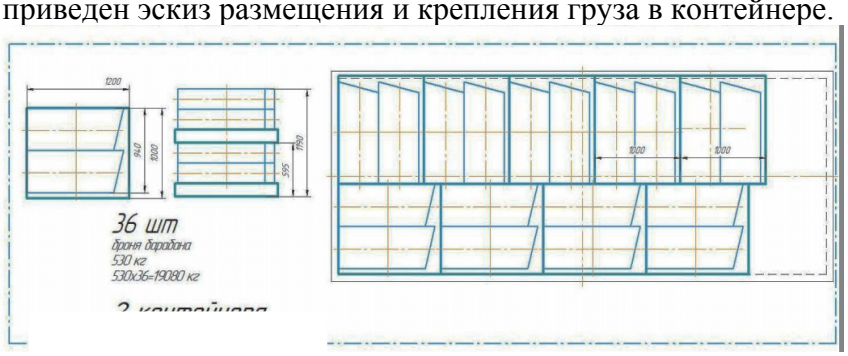


Рис. 3. Эскиз размещения и крепления груза

Полная загруженность контейнера составит 19,08 т. Вместе с деревянной обрешеткой и контейнером вес составит 21,57 т.

Маршрут перевозки следующий: Завод-изготовитель ООО «Амурметалл-Литье» г. Комсомольск-на-Амуре → железнодорожная станция Комсомольск-на-Амуре → железнодорожная станция Тында → с. Соловьевск Тындинского муниципального округа Амурской области Забайкальского края.

Расстояние автомобильной перевозки от завода-изготовителя ООО «Амурметалл-Литье» г. Комсомольск-на-Амуре до железнодорожной станции Комсомольск-на-Амуре составляет – 10-12 км. Железнодорожный путь от железнодорожной станции Комсомольск-на-Амуре до железнодорожной станции Тында составляет – 1469 км, от железнодорожной станции Тында до с. Соловьевск составляет – 125-127 км.

Для перевозки литейной продукции в контейнере железнодорожным транспортом используют железнодорожные платформы типа 13-9751-01, специализированная платформа, рассчитанная на высокие нагрузки и длительный срок службы.

Для перевозки контейнеров автотранспортом используют автомобиль-контейнеровоз SITRAK, предназначенный для перевозки различных грузов в стандартных ISO-контейнерах по дорогам общего пользования.

Для загрузки укрупненных грузовых единиц в 20 футовый контейнер используется вилочный погрузчик модель 62-8FD25 грузоподъемностью 2500 кг.

Для погрузки и разгрузки контейнеров на автомобиль-контейнеровоз используется мостовой кран № 12 грузоподъемностью – 20,5т, на железнодорожные платформы на железнодорожных станциях применяют козловые краны КК-32.

Заключение

Время доставки контейнера по железной дороге – это не только движение поезда, но и сумма технологических операций, связанные с отправлением и прибытием груза, перемещением его по участкам, и норм времени на дополнительные операции.

Время железнодорожного пути от станции Комсомольск-на-Амуре до станции Тында составляет 5 суток.

Продолжительность автомобильной перевозки на всем участке пути (Завод-изготовитель ООО «Амурметалл-Литье» г. Комсомольск-на-Амуре → железнодорожная станция Комсомольск-на-Амуре; железнодорожная станция Тында → с. Соловьевск) 3 часа.

Стоимость перевозки 20 футового 24 тонного контейнера по маршруту составляет:

- стоимость перевозки одного контейнера автомобильным транспортом от Завод-изготовитель ООО «Амурметалл-Литье» г. Комсомольск-на-Амуре → жд станция Комсомольск-на-Амуре 8 500,00 руб.;
- стоимость погрузочно-разгрузочных работ на станции Комсомольск-на-Амуре (11 000,00 руб.);
- стоимость железнодорожной перевозки от станции Комсомольск-на-Амуре до станции Тында 199 618,84 руб.;
- стоимость погрузочно-разгрузочных работ на станции Тында 17 000,00 руб.;
- стоимость перевозки одного контейнера автомобильным транспортом от жд станции Тында до с. Соловьевск (25 000,00 руб.) [2].

Общая стоимость перевозки контейнера составит 261118,84 руб.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Продукция: Производство литейной продукции. // Амурметалл-литье. URL: https://amurmetall-lityo.ru/ (дата обращения 10.03.2026).
2. Расчет железнодорожного тарифа. // R-TARIFF.com. URL: http://r-tariff.com (дата обращения 17.02.2026).

УДК 338.27

Щербина Юрий Вячеславович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Shcherbina Yuri Vyacheslavovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University
Марьин Сергей Борисович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Maryin Sergey Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Aircraft Engineering and Computer Engineering, Komsomolsk-on-Amur State University

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ СВЕРЛИЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ
ANALYSIS OF THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURE OF TECHNOLOGY EQUIPMENT FOR DRILLING OPERATIONS

Аннотация. В статье приводится экономический анализ применения аддитивных технологий в производстве технологической оснастки, а именно кондукторов.

Даны описания конструкции кондуктора, изготавливаемого традиционным методом и изготавливаемого при помощи аддитивных технологий, их назначение, материалы из которых они изготовлены, общий вид кондукторов. Кратко указана информация технологического процесса изготовления деталей и сборки кондукторов. Описан процесс анализа, дана сводная таблица и сравнительная диаграмма.

Результаты анализа показали, что аддитивные технологии являются экономически выгодным при изготовлении корпуса кондуктора.

Abstract. The article provides an economic analysis of the application of additive technologies in the production of auxiliary tooling, namely jigs.
Descriptions of the design of jigs made by traditional methods and those made by additive technologies are given, as well as their purpose, materials from which they are made, and the general appearance of the jigs. The article provides brief information about the manufacturing process of parts and the assembly of jigs. The analysis process is described, and a summary table and a comparative diagram are provided.
The results show that additive technologies are cost-effective for the production of this jig.

Введение

Сверлильные работы в авиастроении широко применяются при изготовлении деталей, сборке узлов и агрегатов планера самолета, при выполнении монтажей, на этапе общей сборки. В настоящее время при выполнении этих работ используются сверлильные станки с числовым программным управлением (ЧПУ). При сборке агрегатов самолета применение станков с ЧПУ находит ограниченное применение, это связано со сложностью формы, размерами, наличием труднодоступных мест в конструкции, поэтому сверление осуществляется с помощью ручного механизированного инструмента. Применение ручного механизированного инструмента увеличивает трудоемкость выполнения операций, приводит к повышению уровня брака, связанного с нарушением разметки, позиционирования инструмента, обеспечением точности отверстий. Для повышения качества выполнения отверстий и увеличения производительности труда в производстве широко используется технологическая оснастка в виде кондукторов и шаблонов, имеющих различные размеры и форму [1].

Применение кондукторов позволяет:

- обеспечить точное позиционирование инструмента;
- исключить непроизвольное смещение инструмента в процессе сверления;
- выполнять с достаточно высокой точностью повторяющиеся операции;
- исключить разметку и сократить количество подготовительных мероприятий.

Основная часть

Кондуктор, который является объектом нашего исследования, предназначен для сверления отверстий под заклепки крепления анкерных гаек к элементу конструкции планера самолета. Кондуктор состоит из корпуса, в который устанавливаться две кондукторные втулки и штырь. К корпусу приваривается державка, на неё устанавливается деревянная ручка и стальное кольцо.

Корпус кондуктора изготавливается из материала Ст.3 на фрезерном станке. Втулка изготавливается из материала 9ХС на токарном станке. Штырь изготавливается из материала Ст.45 на токарном станке. Державка изготавливается из материала Ст.3 методом гибки. Кольцо изготавливается из материала Тр1 методом гибки. Ручка изготавливается из бруска сосны, на токарном станке. Общий вид кондуктора из металла показан на рисунке 1.

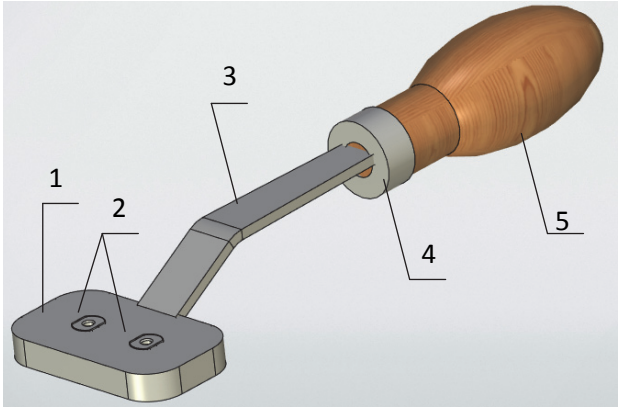


Рис. 1. Общий вид кондуктора из металла
1 – корпус, 2 – втулки, 3 – державка, 4 – кольцо, 5 – ручка

Вследствие того, что на предприятиях авиационной промышленности внедряются аддитивные технологии, в данной статье рассматривается возможность печати корпуса кондуктора на 3D-принтере и проводится анализ между металлорежущим и аддитивным методом изготовления кондуктора.

Кондуктор напечатанный на 3D-принтере будет состоять из же деталей. Корпус и штырь можно напечатать как единое целое. Проектируя державку можно задать ей эргономичную форму, чтобы позволит не изготавливать кольцо и деревянную ручку, как на уже применяющемся кондукторе. Для фиксации державки в корпусе кондуктора используется соединение «ласточкин хвост».

Было принято решение, что корпус, штырь и державка кондуктора будут печататься из ASA-пластик WR-9100. Кондукторные втулки, необходимо изготавливать, как и прежде из 9ХС. Общий вид пластикового корпуса кондуктора со стальными втулками на рисунке 2 [2,3].

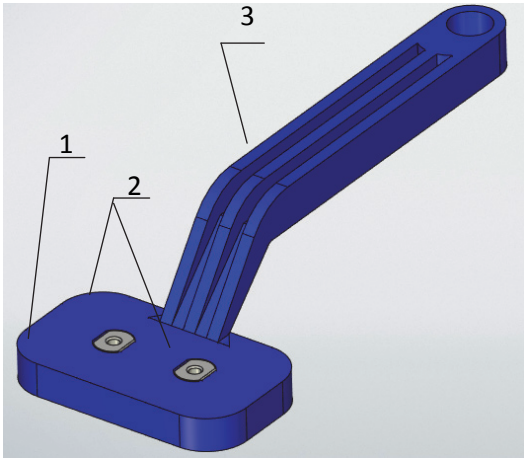


Рис. 2. Общий вид пластикового корпуса кондуктора со стальными втулками
1 – корпус, 2 – втулки, 3 – державка

Стоимость материалов на изготовление одного корпуса кондуктора методом металлорежущей обработки составила по данным из техпроцесса 9,83 рублей, тогда как материалы на печать кондуктора обойдутся в 37,16 рублей. Причем для 3D-печати в расчете была взята самая дорогая катушка пластика 2186 рублей.

Затраты на электроэнергию традиционным методом были взяты усреднено 9 Квт/ч, тогда как для 3D печати было взято максимальное значение промышленного 3D-принтера – 5 кВ/ч. Стоимость 1 кВ/ч равняется 6,89 рублей, тогда Значения для изготовления с помощью металлорежущей обработки и 3D-печати будут равняться, 62,01 и 34,45 соответственно.

Значение трудоемкости по металлорежущей обработке было взято из данных технологического процесса, составило – 5,775 ч, трудоемкость печати замерена экспериментально и составляет 3 ч. Причем в обоих вариантах необходимо изготавливать стальные втулки их трудоемкость составила 2,3 ч.

Стоимость нормо-часа также взята из данных технологического процесса, в котором учитывается, что разные операции будут выполнять рабочие с разными разрядами. В итоге стоимость одного нормо-часа равна 390,82 рублей. Стоимость нормо-часа печати считаем от оклада инженера-конструктора второй категории (по указанию начальника отдела 3D-печати). В этом случае стоимость одного часа работы, тогда будет зависеть от количества рабочих дней в месяце и рабочих часов, принимаем количество дней равным 22, а в каждом дне - 8 рабочих часов. Тогда, разделив оклад на произведение этих двух значений, получим, что 1 час печати стоит 247,95 рублей.

Масса изделия была вычислена при помощи измерительного блока программы T-flex 17 CAD. Для металлорежущей обработки составила 67 грамм, а для напечатанного корпуса кондуктора 19 грамм. Стоит учесть, что коэффициент использованного материала при изготовлении на 3D-принтере будет выше, т. к. изготовление проходит методом добавления материала, а не его срезанием.

Значения технико-экономических показателей для сравнения процессов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения технико-экономических показателей

Показатель	Ед. измерения	Металлорежущая обработка	3D-печать
Масса изделия	г	67	19
Стоимость нормочаса	р	390,82	247,95
Трудоемкость	ч	5,775	3
Стоимость материалов, на массу изделия	р	9,83	37,16
Затраты на электроэнергию	р	62,01	34,45

По данным таблицы выполним диаграмму сравнения методов производства кондукторов с помощью металлорежущей обработки и 3D-печати. Диаграмма изображена на рисунке 3.

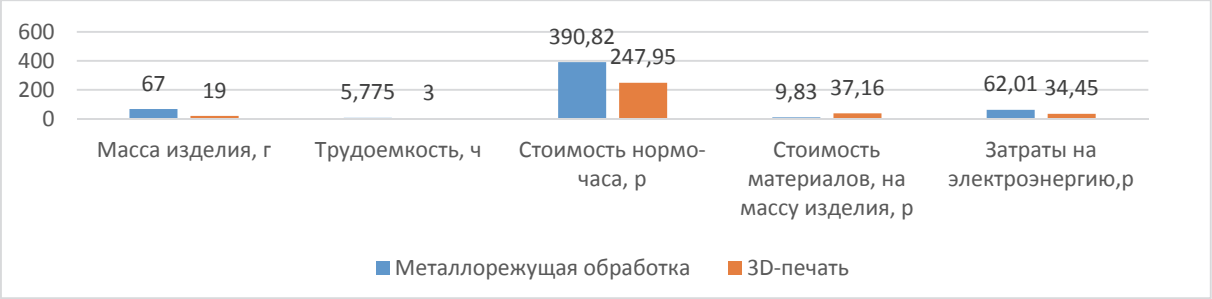


Рис. 3. Сравнение методов производства кондукторов с помощью металлорежущей обработки и 3D-печати

На диаграмме видно, что стоимость пластика для печати одного кондуктора в 3,78 раза выше стоимости металлов для изготовления кондуктора традиционным методом, но 3D-печать позволила снизить сумму затрат на одно изделие с 462,66 р. до 319,56 р. (на 31%), уменьшить трудоёмкость с 5,775 ч. до 3 ч. (на 48%).

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что применение аддитивных технологий при изготовлении технологической оснастки, например, шаблонов и кондукторов для сверления отверстий, является перспективным направлением. Анализ технико-экономических показателей изготовления кондуктора для сверления отверстий показал, что, несмотря на высокую стоимость применяемого для печати материала, другие затраты на изготовление кондуктора на 3D-принтере, ниже затрат на изготовление кондуктора на металлорежущем оборудовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лозовский, И. В. Применение аддитивных технологий при сборке авиационных конструкций / И. В. Лозовский, С. Б. Марьин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 367-369. – EDN CVJWPK.

2. Волков, Р. В. Проектирование и изготовление оснастки для штамповки деталей типа «тройник» методом аддитивных технологий / Р. В. Волков, И. В. Лозовский // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 184-186.

3. Лопатин, А. Н. Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей / А. Н. Лопатин, И. Д. Зверков // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 2(55). – 53- 59 с.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ……. 3

Барановский С. Р., Григорьев В. В.
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ФРЕЗЕРОВАНИЯ
К СЕЛЕКТИВНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПЛАВЛЕНИЮ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95…….. 4

Булыгин А. А., Кравченко Е. Г.
АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ ТОПЛИВНОГО ГАЗА ОТ СЕРОВОДОРОДА…….. 7

Великанов В. А., Иванюта Я. С., Солецкий В. В.
АНАЛИЗ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУЗА……. 11

Гнатив Д. М., Комаров А. С., Арестов О. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРОВ И ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ В ГРАЖДАНСКОМ СУДОСТРОЕНИИ……... 14

Джумаева Ш. Д., Белова И. В.
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ…… 18

Дмитриев П. С., Сараев Ю. Н.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ
ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ…… 21

Долгова Е. С., Ракутина И. С., Лосев Н. В., Трифонова И. П., Бурмистров В. А.
ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА РАСТВОРОВ КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА…….. 25

Драпиковский А. П., Кравченко Е. Г.
АНАЛИЗ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ……. 28

Зайцев Е. Н., Отряскина Т. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ТЕПЛООБМЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ…… 31

Зиновьев И. С., Плетнев Н. О.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА
ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ
ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ……... 34

Зиновьев О. А., Суртаева К. Р., Башков О. В.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ОБРАЗЦА
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ……... 38

Золотов А. В., Отряскина Т. А.
РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ СБОРА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НЕФТЕРАЗЛИВОВ
В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ…… 42

Золотовский В. Ю., Отряскина Т. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ТЕПЛООБМЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ…… 45

Зуева В. М., Кравченко Е. Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ
В ОБОРУДОВАНИИ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ……. 48

И А. С., Проценко А. Е.
ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРА ИЗОМЕРИЗАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
НА ОСНОВЕ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ…… 52

Капранчук Э. В., Отряскина Т. А.
РЕКОНСТРУКЦИЯ КОЛОННЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ НЕФТИ…… 55

Киценко В. Д., Кравченко Е. Г.
СИСТЕМЫ КАЛИБРОВКИ РЕЗЕРВУАРОВ В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ
НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ…….. 58

Кобрусев Л. Ю., Бахматов П. В.
УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЧИН ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ФЛАНЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ АВТОКЛАВА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА……. 62
Костецкая Е. С., Проценко А. Е.
ОЧИСТКА ТОПЛИВНОГО ГАЗА МЕТИЛДИЭТАНОЛАМИНОМ ОТ СЕРОВОДОРОДА….. 67
Кравченко В. В., Серебренникова А. Г. 65
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ 10ХН3МФА (АК25ПК) ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА……. 70
Липатов И. С., Бахматов П. В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАТУННОГО ОБРАЗЦА ПО ЕГО СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАМ…… 74
Мамадалиев М. А., Отряскина Т. А.
ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРАКТИКУ РЕМОНТНЫХ РАБОТ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ……. 78
Марцелев К. Д., Бахматов П. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ОТПУСКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ…….. 81
Миргородская А. Н., Калугина А. А.
ВИДЫ И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ПРИВОДА МЕХАНИЗМА УБОРКИ ШАССИ САМОЛЁТА……. 85
Михайлов А. Ю., Сидоров М. М.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ В СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 10ХСНД…….. 89
Морозова Т. Д., Шакирова О. Г.
АНАЛИЗ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ WSC 207 ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ…… 92
Назаренко С. А., Проценко А. Н.
БРОМИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОБАЛЬТА(II) С ИЗОМЕРНЫМИ 2-АМИНО-5(3)-БРОМ-3(5)-МЕТИЛПИРИДИНАМИ: СИНТЕЗ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ……... 96
Ненашев Г. В., Алешин А. Н.
ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ БАРИЕМ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК ОРГАНИЧЕСКО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ……. 99
Никитин Д. Е., Отряскина Т. А.
ПРИМЕНЕНИЕ DATA-DRIVEN ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ…… 104
Павлов А. А., Акимова М. П., Шарин П. П.
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ Cu-Sn С НАНОАЛМАЗНЫМИ ДОБАВКАМИ…… 106
Пасюта А. С., Калугина А. А.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ АБС–ПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ……... 111
Першикова В. А., Катунцева Н. Л.
ИСТОРИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ…….. 115
Попкова А. А., Щелкунов Е. Б.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КРОНШТЕЙН» ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПЕЧАТИ…… 118
Потапенко Б. И., Яворский Д. О., Исаев С. П.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ФАЗ, ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ…….. 121
Пухов А. А., Ткачёва Ю. И.
О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ КОНДУКТОМЕТРИИ…… 125
Рубан Е. А., Попкова А. А., Щелкунов Е. Б.
АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ, В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ОБРАБОТКИ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ... 128

Рыштаков Н. Е., Григорьев В. В.
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА ПОРООБРАЗОВАНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23……. 131
Салова В. В., Калугина А. А.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЛА-ПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ…… 135
Семёнов С. В., Голиков Н. И.
ПОВЫШЕНИЕ УДАРНО-АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЁВ ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ МЕТОДОВ НАПЛАВКИ……... 138
Сергеев В. А., Шакирова О. Г.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМОВОСТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ БИТУМНЫХ ПОКРЫТИЙ……. 142
Старцев Е. А., Бахматов П. В.
СТРОЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА……. 145
Старцев Е. А., Бахматов П. В.
МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА……. 149
Страдалов С. А., Отряскина Т. А.
УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ……. 153
Сырков С. Е., Белова И. В.
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС…….. 155
Сырков С. Е., Белова И. В.
ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ИЗ СТАЛИ 45…… 158
Сырков С. Е., Калугина А. А.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЭТГ-ПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ…… 160
Табаков Е. В., Серебренникова А. Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ КРИОГЕННОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА……. 163
Тырышкин С. И., Шакирова О. Г.
ПРОЕКТ УСТАНОВКИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ДЕАСФАЛЬТИЗАЦИИ…….. 167
Федорова Т. Е., Шакирова О. Г.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ОБОРОТНЫХ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ БЛОКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ……... 171
Федулов Е. А., Шакирова О. Г.
НЕЙТРАЛИЗАТОРЫ НА УСТАНОВКАХ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ…….. 174
Фью С. А., Башков О. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 15-5 РН С РАЗЛИЧНЫМ СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ…… 178
Хисамиев Р. Р., Отряскина Т. А.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОДЕТАНДЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ…….. 181
Челомбитько М. А., Проценко А. Н.
ИСТОРИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА……. 184
Челомбитько М. А., Проценко А. Н.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БЕНЗИНА ПРОЦЕССА ИЗОМЕРИЗАЦИИ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ……. 187

Чжао Цзыдун, Люй Лань, Башкова Т. И., Башков О. В.
ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ НА ХАРАКТЕР ФОРМИРОВАНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА……. 191
Шарифзода Х. Х., Отряскина Т. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ…….. 194
Шукюров Т. Ш., Шакирова О. Г.
ОСОБЕННОСТИ АБСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НИЗКОНАПОРНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МДЭА…… 196
Щербов А. С., Шакирова О. Г.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩЕГО РЕАГЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В КИСЛОЙ СРЕДЕ ВМЕСТО ЦИАНИДА НАТРИЯ, В ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ПО МЕТОДУ АВТОКЛАВНОГО ОКИСЛЕНИЯ…… 200
Ясинская С. В., Шакирова О. Г.
ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА ПРИ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИИ УПОРНЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ……... 203

СЕКЦИЯ ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ……. 207

Ашрафджонзода Ш., Сухоруков С. И.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ…….. 208
Бабушкин В. П., Марущенко С. Г.
МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ РАДИОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА В СРЕДЕ MULTISIM…. 210
Барников В. В., Фролов А. В.
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА…….. 213
Бедина П. В., Рубашова В. А., Козлович В. Д., Катунцева Н. Л.
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ: МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ……. 215
Борисова О. К., Скрипилев А. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА ПОСРЕДСТВОМ АСКУЭ…… 218
Борисова О. К., Скрипилев А. А.
СНИЖЕНИЕ КОММЕРЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ МОДЕРНИЗАЦИИ УЧЁТА В С. ХУРБА КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА…… 220
Бородин М. А., Сериков А. В.
РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО АССИСТЕНТА……. 223
Бутко В. П., Кузьмин Р. В.
УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКОЙ МИКРОГЭС НА ОСНОВЕ ДУГОСТАТОРНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ…….. 226
Винтоняк В. М., Бузикаева А. В.
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ МОНТАЖНОГО КРАНА НА БАЗЕ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ……... 229
Винтоняк В. М., Бузикаева А. В.
РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА МОНТАЖНОГО КРАНА…… 232
Ворощенко В. Д.
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА……... 235
Грабарь Д. М., Иванов Ю. С.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ…… 239
Деркач И. Ю., Сухоруков С. И.
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА RRT В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ СРЕДСТВАМИ MATLAB…... 242

Дулепина О. А., Любушкина Н. Н.
РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА…….. 245
Дунешенко Д. Ю.
РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАЖДЕННОЙ ВОДЫ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ……... 248
Дунешенко Д. Ю.
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОХЛАЖДЕННОЙ ВОДЫ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ…….. 252
Едич М. А., Горькавый А. И.
СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ…… 256
Залицкий Н. Н., Янченко А. В.
РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАНЦИИ СКОРОЙ ПОМОЩИ……..... 259
Золотарев Р. И., Айрих Р. И., Иванов С. Н.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ЯЧЕЙКАХ 10 КВ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА КАТУШКИ РОГОВСКОГО……. 262
Иванов В. В., Сериков А. В.
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СВОЙСТВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА……... 265
Иванюта Я. С., Сухоруков С. И.
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДРАЙВЕР ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK SIMULINK……... 267
Казанцев А. Р., Кузьмин Р. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ…….. 270
Клушина Е. А., Любушкина Н. Н.
РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ШУМА……. 272
Кодирова Х. В., Копытов С. М.
СХЕМОТЕХНИКА ВХОДНОГО КАСКАДА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОПОТЕНЦИАЛОВ…… 275
Королев Д. И., Сериков А. В.
СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ…….. 278
Кужель А. А., Марущенко С. Г.
КОНФИГУРИРОВАНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ «ANADIGM» В СРЕДЕ LABVIEW MAKERHUB……. 282
Кукин Д. В., Фролов А. В.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ…….. 285
Кустов В. Е., Фролов А. В.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НИВЕЛИРОВКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА…….. 288
Кучерова А. И.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОКРАШИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ…….. 290
Лакеев И. Ю., Стельмащук С. В.
КАСКАДНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МОМЕНТА УПРУГОСТИ…… 294
Локтионов Г. А., Копытов С. М.
РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ……. 297
Локтионов Г. А., Копытов С. М.
КОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УМНОЖАЮЩИМ ЦАП MAX532 С ИНТЕРФЕЙСОМ SPI С ПОМОЩЬЮ DAQ УСТРОЙСТВА В СРЕДЕ LABVIEW……. 301

Маньков А. В., Фролов А. В.
МОДУЛЬ ИНТЕГРАЦИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
В НАСТОЛЬНУЮ ИГРОВУЮ СРЕДУ……. 304
Минеева К. В., Любушкина Н. Н.
РАЗРАБОТКА ДИММИРУЕМОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ…….. 307
Монастырский Д. Я., Ким К. К.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА
В КАЧЕТВЕ ТОПЛИВА И ИСТОЧНИКА ХОЛОДА В АВТОНОМНЫХ
РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ВАГОНАХ……... 310
Недоедко А. О., Сухоруков С. И.
АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ВАРИАНТОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК, ВОЗНИКАЮЩИХ
В ПРОЦЕССЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ……... 314
Никеенко Е. М., Фролов А. В.
НАСТОЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ГОНЧАРНОМУ ДЕЛУ С СИСТЕМОЙ
ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ 3D- СКАНИРОВАНИЯ…… 316
Ничипорчук И. В., Ковалев В. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 25 КВ
В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ…….. 319
Павлова М. Н., Марущенко С. Г.
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕТЕРОДИНА С КВАРЦЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ
ЧАСТОТЫ…….. 322
Павлова М. Н., Фролов А. В.
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО СЛИП-КОРРЕКТОРА…… 326
Павлова М. Н., Фролов А. В.
УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАСТОЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ
РАБОТНИКОВ НА ОСНОВЕ RFID МЕТОК…… 329
Петровский К. П., Савельев Д. О., Сбитнев Н. Р.
ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ
СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ…… 331
Подоляк Е. В., Любушкина Н. Н.
РАЗРАБОТКА РЕФЛЕКТОМЕТРА…… 334
Пукас А. Ю., Фролов А. В.
СТЕНД ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ……. 337
Романова М. К., Скрипилев А. А.
МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (АИИС КУЭ)…… 339
Саъдуллоев К. А., Черный С. П.
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С ГЕТЕРОГЕННЫМ ВНУТРЕННИМ КАСКАДОМ…… 342
Саяпина П. О., Сухоруков С. И.
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ И РАСКРОЯ ЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ…….. 345
Сбитнев Н. Р., Савельев Д. О., Соловьев В. А.
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДИНАМИКУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ…… 348
Соколова В. С.
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ UML-КЛАССОВ…… 351
Солодов К. А., Табаров Б. Д.
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ…… 355

Сомин В. И., Копытов С. М.
УПРАВЛЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМ АЦП HX711 ДЛЯ ВВОДА ДАННЫХ
С ТЕНЗОМОСТОВ В LABVIEW С ПОМОЩЬЮ DAQ УСТРОЙСТВА…… 358
Султанова Т. А., Любушкина Н. Н.
РАЗРАБОТКА ГИГРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОКЛИМАТА… 362
Султонов М. Н., Дерюжкова Н. Е.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПРИВОДОВ СТАЛЕВОЗА…….. 365
Фатахова К. С., Копытов С. М.
СРАВНЕНИЕ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ АНАЛОГОВОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРАХ…….. 367
Цербицова В. В., Фролов А. В.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНИЕЙ РОЗЛИВА ВОДЫ……. 371
Ян Цинпэн, Копытов С. М.
АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ БАССЕЙНА
ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РЫБЫ……... 373
Цыкунова А. А., Сериков А. В.
ОСОБЕННОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА…… 377
Шадрин А. В., Толонов К. Б.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110–220 КВ……. 381
Шапараев Ф. А., Дерюжкова Н. Е.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ
ДУГОВОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ…….. 384
Шинкорук М. Д., Фролов А. В.
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО ОБЕЗБОЛИВАЮЩЕГО СРЕДСТВА……. 388

СЕКЦИЯ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС, АВИАЦИОННАЯ
И МОРСКАЯ ТЕХНИКА…….. 391

Аверкиева К. С., Красильникова О. А.
ВЛИЯНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ…… 392
Айрих И. И., Потянихин Д. А.
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРАВКИ
СУДОВЫХ СВАРНЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ…….. 394
Аксёнова О. С., Бурменский А. Д.
ЕДИНАЯ ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА МОНИТОРИНГА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ
КООПЕРАЦИЕЙ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ…... 398
Алферьева О. В., Каменских И. В.
ОСОБЕННОСТИ ДОСТАВКИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА
ДО НИКОЛАЕВСКА-НА-АМУРЕ……. 402
Андрианов И. К., Пухов А. А.
ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ УПРОЧНЕНИИ…… 405
Андрианов И. К., Феоктистов С. И., Буренин А. А.
О ПРИМЕНЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ К РЕШЕНИЮ
ЗАДАЧ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АВТОФРЕТИРОВАНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК… 408
Андросов А. С., Каменских И. В.
АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ ОВОЩНОЙ
ПРОДУКЦИИ В ГОРОД КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ……... 411
Богатырёв А. В., Хвостиков А. С.
ВНЕДРЕНИЕ ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА
В КОТЛОАГРЕГАТЕ БКЗ-210-140Ф…….. 414

Бондаренко Ю. В., Бондаренко С. В., Бугаев В. Г.
МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СУДОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРАБОЛОВНОГО СУДНА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ФОРМЫ БУЛЬБОВОЙ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ…….. 417
Бурский С. С., Бурменский А. Д.
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НОСОВОГО БЛОКА СУДНА В CAD-СИСТЕМЕ КОМПАС-3D…… 420
Бурский С. С., Каменских И. В.
ОБЗОР ПРОЕКТОВ СУДОВ ДЛЯ РЕКИ АМУР……... 424
Воронков И. О., Каменских И. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В KOMPASFLOW…… 427
Гаврин И. А., Потянихин Д. А.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ САМОЛЁТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ……... 430
Гнатив Д. М., Комаров А. С.
СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ: DED, EBM, WAAM…….. 433
Гнатив Д. М., Комаров А. С.
СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДВОДНОГО РЕМОНТА КОРПУСОВ СУДОВ В ЕВРОСОЮЗЕ, КОРЕЕ И ЯПОНИИ…… 436
Дворецкий Р. А., Баранов Е. В.
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВОГО НАСОСА, РАБОТАЮЩЕГО ОТ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ……... 440
Елпанов И. И., Марьин С. Б.
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПОСТИ ВИНТА ВЕРТОЛЁТА…… 443
Жестков А. В., Красильникова О. А.
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАВКИ ИЗВЕСТИ ИЗ КИТАЯ В РОССИЮ…… 446
Журбина Е. Н., Аксёнова О. С., Бурменский А. Д.
ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ КОРПУСНЫХ СЕКЦИЙ В CAD-СИСТЕМЕ КОМПАС-3D…….. 450
Кравченко А. К., Марьин С. Б.
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТРОЙНИК»…… 454
Купрещенко П. Л., Баранов Е. В.
АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ТЭЦ ДО ПОТРЕБИТЕЛЯ……... 458
Куртанов В. С., Попов А. Ю.
ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА……. 461
Лаврентьева А. А., Каменских И. В.
ОРГАНИЗАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ЭКИПАЖА ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ……. 464
Левченко В. С., Бормотин К. С., Кривенок А. А.
АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ФОРМООБРАЗОВАНИЮ ДЕТАЛИ ТИПА «ЛОБОВИК» НА ПРЕССЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБТЯЖКИ FET-1500…… 467
Леонова В. А., Серкова А. А., Каменских И. В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ НАДСТРОЙКИ СУДНА В KOMPASFLOW……. 470
Лозовский И. В.
ОБЗОР ВИДОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРОГАЗОВЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ…….. 473
Максимова Т. В., Хвостиков А. С.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОНДЕНСАТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ КОМСОМОЛЬСКОЙ ТЭЦ-2……. 475
Мельничук В. К., Нестеренко-Савинова В. В., Слепцов В. В., Потянихин Д. А.
ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА КРУЧЕНИЕ…….. 478
Морозова О. А., Журбина Е. Н., Журбина И. Н.
САПР КОМПАС-3D В СУДОСТРОЕНИИ: ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРПУСНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ…… 481

Обухова В. И., Хвостиков А. С.
ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
ЗА СЧЕТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ КОНДЕНСАТОРОВ……. 484
Попов Н. Д., Попов А. Ю.
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ
С ДВУСТУПЕНЧАТЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ……. 488
Попова А. А., Смирнов А. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ STIG-ТЕХНОЛОГИИ…… 490
Руденко М. С., Орешкин Д. И.
СНИЖЕНИЕ МАССЫ КЛЕЕВЫХ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ФЕРМЫ НА ОСНОВЕ
ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ ТИТАНА…… 494
Сейн Мо, Бормотин К. С.
ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ СВАРКИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ
КОЛОНИИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНУЮ СРЕДУ MARC/MENTAT……. 496
Серкова А. А., Каменских И. В.
НАДСТРОЙКИ СОВРЕМЕННЫХ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ…….. 500
Сиденко К. А., Бирюк В. В.
СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТЯГИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО
ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ…….. 503
Созинова Д. А., Гунькова О. В.
ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТАВКИ
ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА В ГОРОД КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ…… 506
Тарасов В. Н., Кириакиди С. К.
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕХЩЕЛЕВОГО
ЗАКРЫЛКА КРЫЛА СКВП С ПОВОРОТНЫМИ ПАНЕЛЯМИ ДЕФЛЕКТОРА
И ОСНОВНОГО ЗВЕНА…….. 509
Тарасов В. Н., Кириакиди С. К.
ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕРЕКРЫВНОЙ СТВОРКИ ОСНОВНОГО ЗВЕНА
ТРЕХЩЕЛЕВОГО ЗАКРЫЛКА НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ КРЫЛА
САМОЛЕТА КОРОТКОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ ПРИ ВЗЛЕТЕ…… 512
Чепурнова Е. К., Андрианов И. К.
РОТАЦИОННОЕ АВТОФРЕТИРОВАНИЕ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ
ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ…… 515
Шаравьева Н. Г., Гунькова О. В.
ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТАВКИ ЛИТЬЯ СТАЛЬНОГО
И ЧУГУННОГО ИЗ ООО «АМУРМЕТАЛЛ-ЛИТЬЕ» В ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ……... 518
Щербина Ю. В., Марьин С. Б.
АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ СВЕРЛИЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ…….. 520

Научное издание

МОЛОДЕЖЬ И НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Часть 1

Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции
молодых учёных
Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2026 г.

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 08.06.26.
Формат 60×84 1/8. Бумага 65 г/м2. Ризограф EZ 570E.
Усл. печ. л. 30,90. Уч.-изд. л. 30,00. Тираж 100 экз. Заказ 31440.

Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.