

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Бурменский Андрей Дмитриевич

**Построение математической модели концептуального
проектирования контейнеровозов активного ледового плавания**

Направление подготовки

01.04.02 – «Прикладная математика и информатика»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

Гордин Сергей Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедр
«Прикладная математика» ФГБОУ ВО
«Комсомольский-на-Амуре государственный
университет»

Рецензент

Прокудин Александр Николаевич
кандидат технических наук, ведущий науч-
ный сотрудник ФГБУН ХФИЦ ДВО РАН
«Институт машиноведения и металлургии
Дальневосточного отделения Российской
академии наук»

Защита состоится «25» июня 2021 года в 09 часов 50 мин на заседании госу-
дарственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 01.04.02
«Прикладная математика и информатика» в Комсомольском-на-Амуре госу-
дарственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр.
Ленина 27, ауд. 204/5

Автореферат разослан 16 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК



Ю.Г. Егорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в сферу важнейших направлений государственной политики Российской Федерации в Арктике входит интенсификация судоходства по Северному морскому пути (СМП) с созданием соответствующей инфраструктуры и обеспечением каботажных, экспортно-импортных и транзитных перевозок грузов.

В связи с наблюдаемыми изменениями климата в последние годы сокращается площадь Арктического морского льда. Это позволяет создание на базе СМП международного транспортного коридора, который может стать альтернативным дополнением к морскому пути через Суэц. Использование СМП позволяет сократить рейс на тысячи километров по сравнению от рейса через Суэцкий канал.

В последние годы появились публикации посвященные экономическому анализу эффективности контейнерных перевозок по СМП в сравнении с южным путем через Суэцкий канал. Результаты анализа показывают, что транзитные трансы СМП при определенных условиях эксплуатации являются конкурентоспособными традиционным маршрутам через Суэцкий канал.

Однако для эффективной работы на транзитных трассах СМП требуются специализированные контейнеровозы активного ледового плавания (КАЛП), приспособленные к тяжелым условиям эксплуатации.

Процесс проектирования судов является многоэтапным и отличается своей сложностью. Основой для разработки технических проектов служат результаты, получаемые на ранних стадиях проектирования с использованием исследовательских САПР, которые предназначены для обеспечения многовариантного исследования проектной концепции судна с последующим выбором контрактного варианта в виде технического задания или предложения. Использование исследовательских систем позволяет получать оптимальные характеристики вариантов судов.

В нашей стране ощущается пробел в научных и конструкторских исследованиях в области концептуального проектирования контейнеровозов активного ледового плавания, а опыт строительства таких судов в отечественной практике вообще отсутствует.

Это делает актуальным научно-технические исследования, связанные с вопросами разработки математических моделей концептуального проектирования КАЛП.

Целью магистерской диссертации является проработка математических моделей и расчетных алгоритмов определения проектных характеристик, функциональных и эксплуатационных качеств контейнеровозов активного ледового плавания и разработка на их основе математической модели концептуального проектирования (ММП) контейнеровозов рассматриваемого типа.

Для достижения поставленной цели необходимо решение большого круга задач, в том числе носящий междисциплинарный характер.

Основными задачами диссертационной работы являются:

- анализ специальной литературы и другие источники научно-технической информации о научно-технических достижениях по тематике магистерской диссертации;
- проведение анализа объекта исследования, контейнеровоза активного ледового плавания, как сложной технической системы, на основе системного подхода с целью выявления степени влияния внешних и внутренних факторов на техническую систему и формулирования ограничений задачи оптимизационного проектирования;
- разработка на основе системного анализа концептуального расчетного варианта архитектурно-конструктивного типа (АКТ) контейнеровозов активного ледового плавания;
- разработка математической модели оптимизационного проектирования объекта исследования;
- разработка новых и адаптация существующих математических моделей и расчетных алгоритмов определения главных проектных характеристик исследуемого объекта, проверки его функциональных и эксплуатационных качеств;
- программная реализация разработанных математических моделей;
- проведение компьютерных экспериментов по тестированию разработанного программного кода и проверке адекватности математических моделей.

Объектом исследования в данной диссертации является контейнеровозы активного ледового плавания.

Предметом исследований являются: математическая модель оптимизационного проектирования контейнеровозов активного ледового плавания, математические и компьютерные модели определения главных проектных характеристик, расчета функциональных и эксплуатационных качеств КАЛП.

Методы исследования. Для решения поставленных задач и достижения намеченных целей в исследовании использованы: системный подход анализа концепции объекта исследования; математическое и компьютерное моделирование; математический аппарат нелинейного программирования; современные методы расчета характеристик и функциональных качеств судов.

Научную новизну результатов исследования составляют:

- концептуальный вариант АКТ КАЛП;
- обобщенная математическая модель концептуального проектирования контейнеровозов активного ледового плавания, основанная на принципах нелинейного математического программирования;
- методика определения главных размерений КАЛП, основанная на решении уравнения вместимости с учетом геометрических и конструктивных факторов размещения контейнерного груза;
- модифицированный вид уравнения плавучести, с учетом обеспечения требований к общей прочности и ходкости.

Достоверность и обоснованность результатов исследования. Достоверность полученных результатов основана на использовании классических ме-

тодах теории проектирования, теории и конструкции корпуса корабля, а также на физичности результатов вычислений. Работоспособность расчетных алгоритмов и программных модулей проверялась на тестовых расчетах.

Практическая значимость и ценность работы состоит в использовании результатов работы для целей экономического прогнозирования и перспективного технико-экономического планирования Минтрансом России и компаниями, осуществляющими судоходство в Арктике. Разработанные математические модели, расчетные алгоритмы и программные модули могут использоваться при разработке технических предложений контейнеровозов рассматриваемого типа.

Личный вклад автора заключается в выполнении теоретического и практического исследования, включая сбор информации, анализ, разработку математических моделей, алгоритмов, расчетных методик и проведения расчетов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

– III Всероссийская национальная научной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г.

– IV Всероссийская национальная научной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г.

По теме диссертации автором подготовлено к публикации 3 печатных работы.

Структура и объем магистерской диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Она содержит 107 страниц основного текста (включая 35 рисунков и 7 таблиц) и 2 страницы оглавления. Список использованных источников включает 53 наименований и занимает 3 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы общая цель, задачи, объект и предмет исследования, а указываются научная новизна, практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов исследования.

Первый раздел посвящен обзору и анализу объекта и предмета исследования.

В настоящее время наблюдается постепенное потепление в Арктике. Это приводит к уменьшению ледовитости в летний и толщины ледового покрова в зимний периоды, а также к увеличению продолжительности периода летно-осенней навигации на транспортных линиях СМП. Несмотря на «облегчение» ледовой обстановки в Северном ледовитом океане, трассы СМП

более полугода покрыты сплошным льдом. Поэтому для работы на транзитных линиях должны работать контейнеровозы с высоким ледовым классом.

И хотя в настоящее время арктические контейнеровозы пока не строятся, то верфи и проектные организации разрабатывают на уровне концепций проекты перспективных контейнеровозов данного типа (рисунок 1).

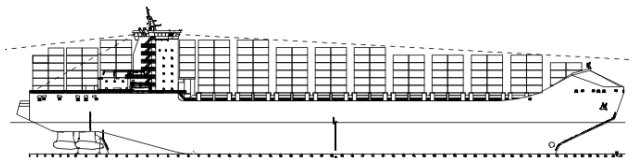


Рисунок 1 – Проект арктического контейнеровоза ICV51 КБ «МИБ»

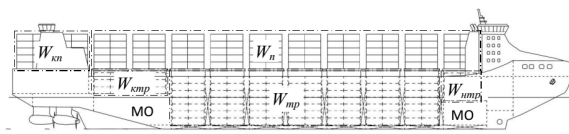


Рисунок 2 – Концептуальный проект КАЛП с носовым расположением надстройки»

Анализируя АКТ современных проектов арктических контейнеровозов можно отметить, что это гладкопалубные суда с кормовым расположением машинного отделения и надстройки с ходовой рубкой, с дизель-электрической энергетической установкой, с классической ледокольной носовой оконечностью, оборудованные винторулевыми комплексами ППВРК Azipod, позволяющим реализовать концепцию судна двойного действия (Double Acting Ship).

Однако в качестве расчетного варианта АКТ КАЛП предлагается использовать новую концепцию АКТ контейнеровоза с повышенной контейнеровместимостью и безопасностью эксплуатации в ледовых условиях Арктики без ледокольного сопровождения (см. рисунок 2).

Основными особенностями новой концепции арктического контейнеровоза, являются: организация двух машинных отделений (носовое и кормовое); размещение блока помещений экипажа и ходовой рубки в районе бака; организация закрытия палубы бака защитным кожухом.

В результате обзора методов проектирования было установлено, что исследовательские системы проектирования судов перспективных типов должны строиться на математическом аппарате нелинейного математического программирования.

Второй раздел посвящен вопросам разработки математической модели концептуального проектирования контейнеровозов активного ледового плавания.

Задача концептуального проектирования КАЛП может быть сформулирована следующим образом:

Для выбранного архитектурно-конструктивного типа судна и вектора параметров задания на проектирование $C(c_1, \dots, c_q)$, определить такой вектор искомых характеристик судна (вектор оптимизируемых переменных) $X(x_1, \dots, x_n)$, при которых функция критерия эффективности Z достигает своего экстремального значения

$$Z = \text{extr}\{Z(X, C)\}.$$

При этом должны выполняться M функциональных требований к проектируемому судну

$$G_j(X, C) \geq A_j(C), j = 1, \dots, m;$$

$$G_j(X, C) = A_j(C), j = m+1, \dots, M;$$

где A_j – требование к j -му показателю качества; $G_j(X, C)$ – значение функционального j -го показателя качества; q – количество элементов вектора задания.

На элементы вектора X накладываются двухсторонние ограничения вида

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, n$$

где $(x_i)_{\min}$, $(x_i)_{\max}$ – пределы изменения оптимизируемой переменной x_i ; n – количество накладываемых ограничений.

Так как в процессе сравнения вариантов судов с одинаковой контейнероёмкостью их фактическая провозоспособность, в результате влияния ограничений к функциональным качествам, может различаться, то предлагается использовать минимизируемый удельный критерий эффективности в виде удельных приведенных затрат $ЗУ$ на единицу эффекта $\mathcal{E}$

$$ЗУ = \frac{ЗП}{\mathcal{E}} = \frac{S + E \cdot K}{ПК}; \quad ЗУ \rightarrow \min,$$

где $ЗП$ – приведенные затраты по транспортной системе; S – текущие затраты (эксплуатационные расходы) за год; K – капитальные вложения (стоимость судна); E – нормативный коэффициент сравнительной эффективности вложений; $ПК$ – эффект от эксплуатации (годовая провозоспособность) КАЛП.

Прямые эксплуатационные расходы S складываются из постоянных и переменных составляющих

$$S = \sum_{i=1}^n S_i^{ном} + \sum_{i=n+1}^N S_i^{пер}.$$

К постоянным составляющим относятся расходы на администрирование, расходы на экипаж, расходы на страхование, расходы на ремонт и техобслуживание, расходы связанные с обслуживанием капиталовложений. К переменным составляющим относятся расходы на бункеровку, портовые сборы и расходы связанные с навигационными условиями эксплуатации.

Уровень годовой провозоспособности контейнеровозов $ПК$ зависит от провозоспособности каждого рейса

$$ПК = \sum_{j=1}^{nr} kz_j \cdot КП_j,$$

где kz_i и $КП_j$ – коэффициент загрузки и контейнерная провозоспособность судна и в j -м рейсе; nr – количество рейсов за год.

Следует отметить, что рейсовая контейнерная провозоспособность $КП_j$ зависит от периода и ледовых условий эксплуатации.

К компонентам вектора оптимизируемых переменных X предъявляются следующие требования: система компонентов вектора оптимизируемых переменных должна быть полной; компоненты вектора оптимизируемых переменных должны быть репрезентативны; число компонентов вектора оптими-

зируемых переменных должно быть минимальным; компоненты вектора оптимизируемых переменных должны быть взаимонезависимы.

Исходя из вышеперечисленных требований к вектору оптимизированных переменных в ММП КАЛП основными оптимизируемыми параметрами (характеристиками) судна могут являться: $n_{яр}$ и $n_{кр}$ – число ярусов и контейнерных рядов по ширине в трюме; k_K – коэффициент распределения контейнеров между трюмной и палубной грузовыми зонами; L , B , H – главные размеры контейнеровоза (длина, ширина и высота борта).

Хотя значения $n_{яр}$, $n_{кр}$ и k_K взаимосвязаны с главными размерениями, но они определяют только значения нижней границы диапазона возможного изменения последних. В тоже время небольшие изменения значений главных размерений может сильно повлиять на уровень значений функциональных качеств судна.

В качестве основных ограничений оптимизационной задачи могут быть приняты следующие:

I. Ограничения главных размерений, определяемые навигационными требованиями и условиями постройки: $B \leq B_{\max}$, $T \leq T_{\max}$.

II. Ограничения к соотношениям главных размерений: $l_{b\min} \leq l_b \leq l_{b\max}$.

III. Ограничение по обеспечению плавучести судна: сила плавучести должна быть равна весу судна – $\gamma \delta L B T = D(K, L, B, H, T, K, N, \dots)$.

IV. Ограничения связанные с обеспечением общей продольной прочности судна: расчетные значения момента инерции эквивалентного бруса, моментов инерции палубы и днища должны быть больше требуемых, а нормальные напряжения растяжения и сжатия в продольных связях корпуса должны быть меньше допустимых и критических соответственно

$$I \geq I_{\min}; W^{нал} \geq W_{\min}^{нал}; W^{\partial н} \geq W_{\min}^{\partial н}; \sigma_i^+ \leq [\sigma]; \sigma_i^- \leq \sigma_{кр}.$$

V. Ограничения по обеспечению ходкости: мощность движительной установки должна обеспечивать движение с заданной эксплуатационной скоростью в условиях чистой воды и непрерывность движения с заданной минимальной скоростью в сплошном льду заданной толщины

$$N_{ов} \geq \max\{N_{чв}(v_{экс}), N_{лед}(h_{л}, v_{л})\}.$$

VI. Энергетическое ограничение: суммарная мощность главных дизель-генераторов (ГДГ) должна быть больше мощности судовых потребителей, т.е. должна обеспечивать требуемой мощностью движительную установку, общесудовых источников потребления и работоспособность заданного количества рефрижераторных контейнеров. Мощность вспомогательного ДГ должна обеспечивать общесудовые нужды при стоянке в порту

$$N_{СЭУ} \geq N_{ов} + N_{вн} + N_{реф}; N_{ВДГ} \geq N_{вн}.$$

VII. Ограничение по возможности обеспечения снижения значения z_G : объем балластных цистерн должен быть достаточен для приема балласта обеспечения остойчивости

$$W_{бц} \geq W_{бал}.$$

VIII. Ограничения по статической и динамической остойчивости: значение аппликаты центра тяжести судна должна обеспечивать требуемые параметры остойчивости с учетом возможного обледенения судна

$$z_G \leq z_G^{\max} \text{ (нормативных требований к остойчивости).}$$

IX. Ограничения по качке: период собственных колебаний судна на нерегулярном волнении должен быть больше минимально допустимого из условия снижения негативного влияния качки на экипаж и снижения нагрузок на перевозимый груз

$$\tau \geq \tau_{\min}.$$

X. Ограничение по непотопляемости: высота надводного борта должна обеспечивать требуемый запас плавучести

$$H - T \geq F_{\min}.$$

Кроме указанных ограничений, в математическую модель проектирования могут вводиться и другие (дополнительные) ограничения, в том числе ограничения на характеристики АКТ КАЛП, тип ЭУ и т.п.

Обобщенную математическую модель оптимизационного проектирования можно представить в виде укрупненной блок-схемы (рисунок 3).

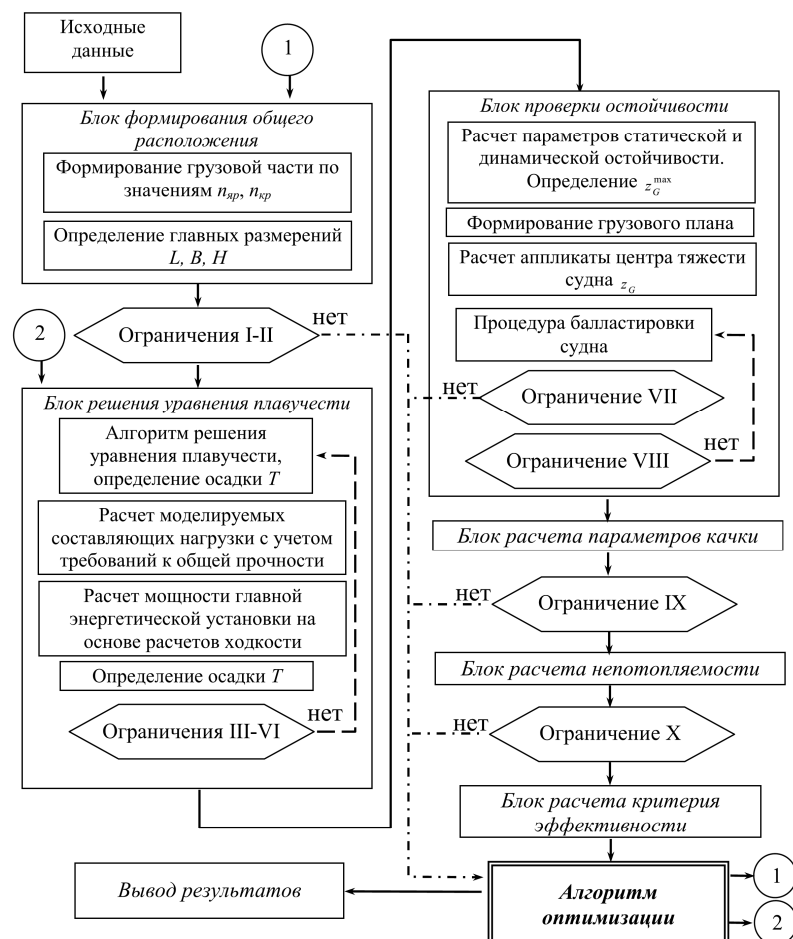
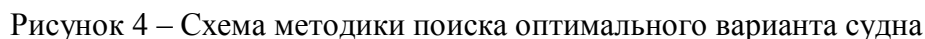


Рисунок 3 – Функциональная блок-схема ММП КАЛП

Оптимизационную задачу проектирования КАЛП предлагается разделить на два уровня (внешний и внутренний), что позволяет для каждого типа оптимизационных параметров применить наиболее эффективные для них

Формально методика оптимизационного проектирования КАЛП разбивается на два этапа (рисунок 4). Первым этапом решения в ММП КАЛП является выявление области допустимых вариантов по условиям выполнения ограничений I-II в результате определения главных размерений судна в зависимости от геометрических параметров контейнерного груза.



Следует отметить, что использование сеточного алгоритма оптимизации позволяет организовать процедуру параллельных вычислений по вариантам «внешних» оптимизируемых переменных.

Блок формирования общего расположения. Процедура определения главных размерений в ММП производится на результатах расчета параметров размещения перевозимых контейнеров по грузовым зонам.

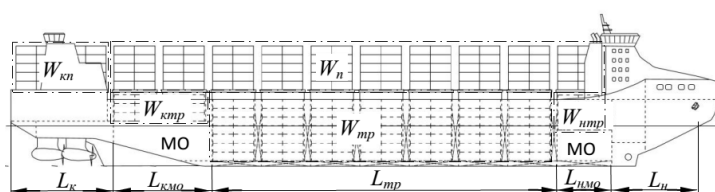


Рисунок 6 – Составляющие длины контейнеровоза

10

модели взаимосвязям между параметрами отдельных грузовых зон определяются такие неизвестные параметры, как количество рядов контейнеров по длине трюмной зоны $n_{рк}$ и ярусность палубного груза $n_{ярп}$.

На втором этапе, в зависимости от рассчитанных параметров контейнерного груза, а также характерных для расчетного АКТ конструктивных зазоров и размеров ячеистых конструкций, производится определение главных размерений (см. рисунок 6)

$$L = L_k + L_{кмо} + L_{тр}(n_{рк}) + L_{нмо} + L_n(L); B = B(n_{кр}); H = H(n_{яр}) ,$$

причем рассчитанные значения L , B , H являются нижними границами диапазона их изменения в процессе решения задачи оптимизации. Верхняя граница диапазона задается из условия возможности перераспределения контейнерного груза.

Блок решения уравнения плавучести. В данном блоке проводится определение осадки T на основе решения уравнения плавучести (нагрузки)

$$\gamma \delta L B T - P(\delta, L, B, T, H, v, r \dots) - P_{рм} - P_{нз} = 0.$$

Особенностью данного уравнения является то, что часть составляющих уравнения $P_{рм}$ определяется на основе структурного и расчетного моделирования. Так как уравнение плавучести решается численными методами, то на каждой итерации процесса решения известно текущее расчетное значение осадки T . Это позволяет рассчитывать значения масс продольных связей корпуса с учетом требований к общей прочности на основе типовой конструкции корпуса, а такие составляющие, как масса судовой энергетической установки и масса судовых энергетических запасов определять методами расчетного моделирования мощности судового энергетического комплекса на основе расчетов ходкости контейнеровоза для различных условий эксплуатации.

Блок формирования грузового плана. В данном блоке проводится окончательная расстановка контейнеров в грузовых зонах и определяются координаты их центров тяжести. Также в этом блоке рассчитываются геометрические параметры балластных цистерн.

Блок расчета остойчивости. В данном блоке рассчитываются параметры статической и динамической остойчивости, в том числе с учетом обледенения судна. При невыполнении требований к параметрам остойчивости, производится расчет аппликаты центра тяжести судна, необходимой для их выполнения. Требуемое снижение аппликаты центра тяжести обеспечивается методом баллаستировки судна при постоянной осадке за счет снятия верхних ярусов контейнерного груза. Данная процедура выполняется циклически до тех пор, пока не будут полностью выполнены требования к остойчивости судна. Если же при обеспечении остойчивости будет превышен требуемый объем балластных цистерн, то производится переход на процедуру обеспечения остойчивости за счет изменения главных размерений, и в первую очередь за счет изменения ширины судна.

Блок расчета непотопляемости. Проверка непотопляемости проводится на основе расчета минимального значения надводного борта на основе

Правил о грузовой марке. В случае если рассматриваемый расчетный вариант будет иметь избыточный надводный борт, то для него пересчитывается провозоспособность для режима эксплуатации в условиях чистой воды.

Четвертый раздел посвящен описанию разработанного программного комплекса.

Так как в данной работе не стояла задача разработки математической модели транспортной системы, то программно была реализована только математическая модель расчета проектных характеристик и функциональных качеств.

Программный комплекс разработан на языке *Object Pascal* в объектно-ориентированной визуальной интегрированной среде разработки программ *Delphi 10* (рисунок 7).

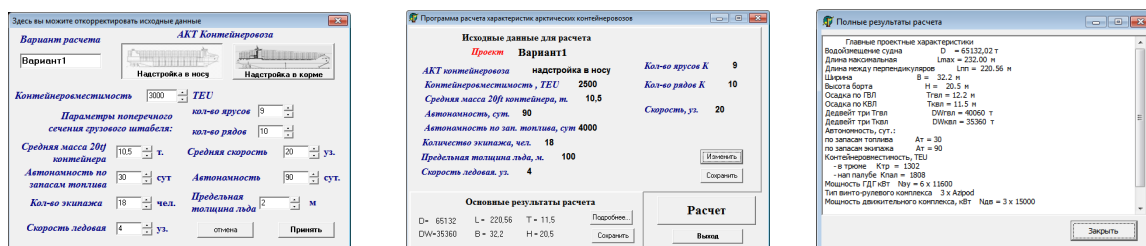


Рисунок 7 – Основные окна программы

Работоспособность и адекватность алгоритмов определялась на проведении тестовых расчетов.

В заключении приведены основные результаты и выводы по выполненному научному исследованию.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1 Бурменский, А. Д. Применение методов математического программирования в задачах проектирования судов / А. Д. Бурменский, С. А. Гордин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. : в 3 ч. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – Ч. 2. – С. 230-233.

2 Бурменский, А. Д. Обобщенная математическая модель оптимизационного проектирования контейнеровозов активного ледового плавания / А. Д. Бурменский, С. А. Гордин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. : в 4 ч. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – Ч. 1. – С. 210-213.

3 Бурменский, А. Д. Моделирование процесса формирования грузового плана контейнеровоза / А. Д. Бурменский, Н. И. Цыганкова // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. : в 4 ч. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – Ч. 1. – С. 343-346.