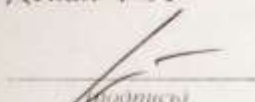


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

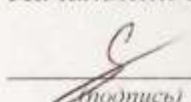
СОГЛАСОВАНО

Декан ФГУ



(подпись) А.С. Гудим
« 16 » 06 20 22 г.

УТВЕРЖДАЮ

Начальник отдела ОНИПРС


(подпись) В.В. Солецкий
« 16 » 06 20 22 г.


Заведующий кафедрой _____


(подпись) М.С. Гринкруг
« 16 » 06 20 22 г.

Разработка программы многокритериальной оптимизации
конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных
элементов турбомашин

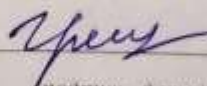
Комплект конструкторской документации

Руководитель проекта


(подпись, дата) 16.06.2022

И.К. Андрианов

Ответственный исполнитель


(подпись, дата) 16.06.2022

Ф.В. Грищенко

Комсомольск-на-Амуре 2022

Карточка проекта

Название	<i>Разработка программы многокритериальной оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов турбомашин</i>
Тип проекта	<i>Тип проекта: учебная работа</i>
Исполнители	<i>Ф.В. Грищенко – 1ЭЛб-1</i>
Срок реализации	<i>ноябрь 2021 – май 2022</i>

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

ЗАДАНИЕ на разработку

Название проекта: Разработка программы многокритериальной оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов турбомашин

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

Назначение: определение оптимальных по Парето значений параметров охлаждения: массового расхода охладителя, температуры хладагента, скорости охлаждающего потока, а также параметров внешней защиты: толщин теплозащитного слоя.

Область использования: оптимизация теплоотвода в системах охлаждения турбинных лопаток оболочечного типа, камерах сгорания

Функциональное описание программы: программа рассчитывает альтернативные сочетания неулучшаемых значений конкурирующих параметров тепловой защиты при заданных ограничениях согласно минимизации обобщенного критерия

Техническое описание устройства: программный код написан с помощью математического пакета MathCad 15, алгоритм расчета строится на основании решения нелинейных систем методом множителей Лагранжа .

Требования: геометрические параметры оболочечного элемента, условия теплоподвода, желаемые значения параметров охлаждения, ограничения на диапазон значений конкурирующих параметров тепловой защиты

План работ:

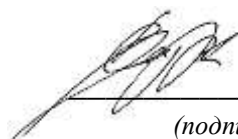
Наименование работ	Срок
Анализ условий нагрева и охлаждения, силового воздействия на оболочечные элементы турбомашин	<i>11.2021</i>
Математическое описание локальных критериев оптимизации на основании изменяемых конкурирующих параметров тепловой защиты, задание ограничений	<i>12.2021</i>
Построение целевой функции оптимизации по Парето согласно обобщенному критерию, учитывающему локальные критерии оптимизации.	<i>02.2022</i>
Разработка математической модели согласно уравнениям теплоотдачи, теплопроводности, течения хладагента в каналах охлаждения.	<i>03.2022</i>
Разработка численной методики расчета нелинейной системы уравнений согласно методу множителей Лагранжа.	<i>04.2022</i>
Разработка алгоритма и программного кода расчета на основании итерационных процедур. Проведение численных экспериментов расчета оптимальных по Парето параметров тепловой защиты турбинной лопатки с дефлектором	<i>05.2022</i>

Комментарии:

Перечень графического материала:

Листинг программы расчета многокритериальной оптимизации параметров тепловой защиты оболочечных элементов турбомашин

Руководитель проекта

 16. 02.2022
(подпись, дата)

И.К. Андрианов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ПАСПОРТ

проекта

«Разработка программы многокритериальной оптимизации
конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных
элементов турбомашин»

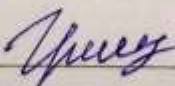
Руководитель проекта


(подпись, дата)

16.06.2022

И.К. Андрианов

Ответственный исполнитель


(подпись, дата)

16.06.2022

Ф.В. Грищенко

Комсомольск-на-Амуре 2022

Содержание

1	Общие положения	7
2	Назначение и принцип действия	8
2.1	Назначение изделия	8
2.2	Области использования изделия	8
3	Состав изделия и комплектность.....	9
4	Описание и построение математической модели программы.....	10

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		6

1 Общие положения

Проект представляет собой разработку новой математической модели и программного кода для расчета многокритеральной оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения, а именно: переменной толщины термобарьерного покрытия, а также изменение параметров охлаждения: температуры охлаждающей среды и скорости течения охладителя, что весьма важно для повышения эффективной работы элементов в области авиационного и судового турбостроения. Задача проекта решается с позиции математического описания исследуемых процессов, построения целевой функции тепловой защиты и ее варьируемых параметров, математических закономерностей, связывающих исследуемые параметры. Для решения требуется разработка численного метода поиска экстремальных или альтернативных оптимумов решений задачи оптимизации. Новизна исследования обусловлена идеей постановки задачи многокритериальной оптимизации тепловой защиты, новыми являются разработанная методика на основании математического решения и программа для проведения серий численных экспериментов по определению оптимальной конфигурации тепловой защиты элементов, находящихся в условия теплового и силового нагружения. Результаты работы могут найти практическое применение в области авиационного и судового турбиностроения для повышения эффективности защиты высоконагруженных оболочечных элементов с целью минимизации материальных затрат.

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		7

2 Назначение и принцип действия

2.1 Назначение изделия

Внедрение предложенной математической модели многокритеральной оптимизации тепловой защиты оболочечных элементов и разработанной программы позволит существенно оптимизировать работу оболочечных элементов турбомашин за счет прогнозирования эффективной работы в процессе производства оболочечных турбинных лопаток, систем охлаждения камер сгорания, напыления теплозащитных покрытий методом эффективного распределения материала. Результаты решения задачи могут быть использованы для разработки новых типов дефлекторных вставок в оболочечных элементах турбомашин с целью рационального охлаждения.

В состав изделия входят: листинг программы

2.2 Области использования изделия

Изделие может применяться в области турбомашиностроения

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		8

3 Состав изделия и комплектность

В комплект поставки входит:

- Листинг и описание
- Паспорт.

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		9

4 Описание и построение математической модели программы

В рамках проекта рассматривается оболочка, находящаяся в условиях силового воздействия и омываемая с двух сторон нагревающим и охлаждающим газовыми потоками (рис.1). Примером такой оболочки могут являться турбинные лопатки, испытывающие действие растягивающих и центробежных сил. Со стороны воздействия высокотемпературного газового потока, оболочка испытывает тепловое нагружение. Напряженное состояние σ_i оболочки считаем известным. Поскольку напряженное состояние считается заданным, оптимизацию теплового состояния оболочки для обеспечения равномерного распределения теплонапряженного состояния будем строить на основании ограничений согласно условию длительной прочности, которое зависит от уровня напряжений и температур.

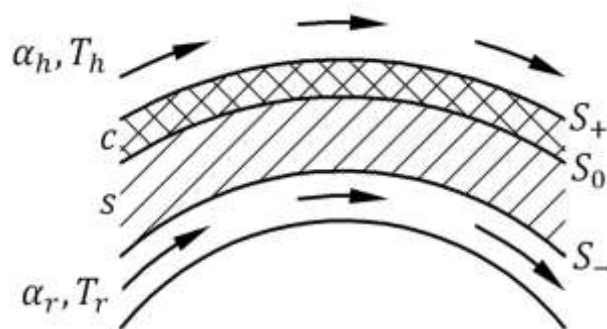


Рисунок 1 – Оболочка с теплозащитным слоем, омываемая охлаждающим и нагревающим газовым потоками

Представленная задача является нелинейной задачей условной оптимизации. В качестве локальных критериев оптимизации предлагается рассмотреть температуру оболочки, расход охладителя, толщину теплоизолирующего слоя, скорость и теплоотдачу в канале. Оптимизация локальных критериев обусловлена практическими целями: снижение расхода и охладителя позволяют уменьшить затраты на охлаждение оболочки, повышение теплоотдачи позволяет снизить тепловую нагрузку на оболочку и уменьшить толщины теплоизолирующего покрытия. Проблема построения обобщенного критерия заключается в том, что некоторые из локальных критериев являются конкурирующими параметрами: при оптимизации одного из локальных критериев, значения некоторых из других параметров ухудшаются. В частности, снижение расхода охладителя может сопровождаться повышением температуры оболочки и необходимым увеличением толщины теплозащитного слоя, чтобы компенсировать данное изменение.

Поскольку локальные критерии, определяющие тепловую защиту с помощью теплозащитного покрытия и охлаждения, являются конфликтующими, задача оптимизации может

					СКБФЭУ.2.ИП.010000ЭЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		10

не иметь единственного решения, поэтому построенная модель может удовлетворять множеству альтернативных решений. Соответственно, обозначим k – текущую альтернативу, при которой достигается оптимальное по Парето значение локального критерия, улучшение которого невозможно без ухудшения хотя бы одного из оставшихся критериев. При этом каждый из параметров имеет априорные границы:

$$T_{s0}^{(k)} = \min_{T_{s0*} < T_{s0} < T_{s0}^*} T_{s0},$$

$$G^{(k)} = \min_{0 < G < G^*} G,$$

$$\delta_c^{(k)} = \min_{0 < \delta_c < \delta_c^*} \delta_c,$$

$$v^{(k)} = \min_{0 < v < v^*} v,$$

$$(\alpha_r^{-1})^{(k)} = \min_{0 < \alpha_r < \alpha_r^*} (\alpha_r^{-1}),$$

Определим обобщенный критерий оптимизации тепловой защиты Δ как функцию локальных критериев: теплового состояния оболочки на контактной поверхности T_{s0} , массового расхода охладителя G , толщины теплозащитного слоя δ_c , скорости хладагента v и коэффициента теплоотдачи α_r в канале

$$\Delta = \Delta(T_{s0}, G, \delta_c, v, \alpha_r) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Постановка задачи теплообменного процесса (1) описывается системой ограничений, определяющих теплопроводность процесса, газодинамику и теплонапряженное состояние:

- дифференциальные уравнения теплопроводности для теплозащитного слоя и оболочки:

$$\text{div}(\lambda_c \text{grad} T_c) = 0, \quad (2)$$

$$\text{div}(\lambda_s \text{grad} T_s) = 0, \quad (3)$$

- граничные условия на поверхности нагрева и охлаждения:

$$\alpha_h (T_h - T_c|_{s_+}) = \lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_{s_+}, \quad (4)$$

$$\alpha_r (T_s|_{s_-} - T_r) = \lambda_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial n} \right)_{s_-}, \quad (5)$$

- граничные условия на поверхности контакта слоев:

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
						11
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

$$\lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_{S_0} = \lambda_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial n} \right)_{S_0}, \quad (6)$$

$$T_c|_{S_0} = T_s|_{S_0}, \quad (7)$$

-уравнение теплообмена в канале, учитывающее режим течения, теплоотдачу в канале, скорость и температуру охладителя, диаметр канала:

$$f(\alpha_r, v, T_r, \delta_r) = 0, \quad (8)$$

-уравнение постоянства расхода охладителя в канале:

$$G = \text{const}, \quad (9)$$

-уравнение состояния в канале:

$$p = \rho R T_r. \quad (10)$$

- условие длительной прочности при тепловом и напряженном состоянии:

$$f_{\text{дл}}(T_s, \sigma_i) \leq 0 \quad (11)$$

где λ_s – теплопроводность слоя оболочки, λ_c – теплопроводность теплоизоляционного керметного слоя, p – давление в канале, T_r – температура хладагента, R – газовая постоянная, T_s – тепловое состояние оболочки, T_c – тепловое состояние теплоизоляционного слоя, δ_r – ширина канала охлаждения, α_r – коэффициент теплоотдачи на поверхности нагрева.

Параметры оптимизации тепловой защиты представляют собой точку в 5-мерном пространстве $x = \{T_{s0}, G, \delta_c, v, \alpha_r^{-1}\}$. В качестве начальных приближений будем рассматривать желаемые значения частных критериев $x^{(0)} = \{T_{s0}^{(0)}, G^{(0)}, \delta_c^{(0)}, v^{(0)}, (\alpha_r^{-1})^{(0)}\}$, которые могут не удовлетворять системе ограничений (2) - (11). Для минимизации отклонений локальных критериев $x = \{T_{s0}, G, \delta_c, v, \alpha_r\}$ от начальных приближений, модель обобщенного критерия будет строить на основании минимизации суммы квадратов разностей частных критериев $(x_i - x_i^{(0)})/x_i^{(0)}$. Каждый из локальных критериев имеет ограничения, обусловленные условиями работы теплообменной системы, прочностными характеристиками оболочки, а именно:

$$x_* < x_i < x^* \quad (12)$$

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
						12
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

где $x_* < x < x^*$ – минимальное и максимальное граничные значения локальных критериев.

Тогда составляющие обобщенного целевого критерия $\Delta = \beta_i \sum \Delta_i$ представим в виде:

$$\Delta_i = \theta(x_i - x_*) \left(\frac{x_i - x_i^{(0)}}{x_i^{(0)}} \right)^{2[1+\theta(x_i-x^*)p]} \quad (13)$$

где $\theta(x)$ – функция Хевисайда, p – штрафной коэффициент.

Вид локального критерия (13) выбран с целью минимизации отклонения от начального приближения при ограничениях (2). Минимизируемые локальные критерии имеют ограничения сверху, однако в процессе поиска эффективного решения текущие приближения критериев могут превысить максимально допустимые значения. С этой целью в локальный критерий введены штрафной коэффициент p , где p – положительное целое число, и функция Хевисайда $\theta(x)$:

$$\theta(x - x^*) = \begin{cases} 1, & x \geq x^* \\ 0, & x < x^* \end{cases} \quad (14)$$

При нарушении верхнего ограничения локальный критерий штрафуются возведением в степень $(1 + p)$, что увеличивает значение целевой функции. Если один из минимизируемых критериев меньше начального приближения, то вводится коэффициент поощрения, обращающий в ноль локальный критерий с помощью функции Хевисайда

$$\theta(x - x_*) = \begin{cases} 1, & x \geq x_* \\ 0, & x < x_* \end{cases} \quad (15)$$

Для определения значимости частных критериев и исключения нулевого решения задачи введем весовые коэффициенты β_i для каждого из критериев и с учетом (14), (15) обобщенный критерий примет вид:

$$\Delta(x_i) = \sum_{i=1}^5 \beta_i \theta(x_i - x_i^{(0)}) \left(\frac{x_i - x_i^{(0)}}{x_i^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(x_i-x^*)]} \quad (16)$$

$$0 < \beta_i < 1, \quad i = \overline{1,5}$$

В качестве нормировки используется условие:

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
						13
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 = 1.$$

Учитывая ограничения частных критериев, математическая модель обобщенного критерия тепловой защиты оболочки в условиях теплового и силового нагружения (26) будет определяться соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta = & \beta_1 \theta (T_{s0} - T_{s0}^{(0)}) \left(\frac{T_{s0} - T_{s0}^{(0)}}{T_{s0}^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(T_{s0}-T_{s0}^*)]} + \beta_2 \theta (G - G^{(0)}) \left(\frac{G - G^{(0)}}{G^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(G-G^*)]} + \\ & + \beta_3 \theta (\delta_c - \delta_c^{(0)}) \left(\frac{\delta_c - \delta_c^{(0)}}{\delta_c^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(\delta_c-\delta_c^*)p]} + \beta_4 \theta (v - v^{(0)}) \left(\frac{v - v^{(0)}}{v^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(v-v^*)]} \\ & + \beta_5 \left(\frac{\alpha_r^{(0)}}{\alpha_r - \alpha_r^{(0)}} \right)^2 \rightarrow \min \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, построенная модель (17) позволяет найти оптимальные по Парето значения параметров тепловой защиты оболочки в зависимости от выбранной значимости каждого критерия. Практическая значимость исследования обусловлена возможностью поиска оптимального сочетания внешней тепловой защиты с помощью покрытия и внутреннего теплоотвода при течении охлаждающего агента. Представленная модель позволяет ранжировать частные критерии: температуру оболочки, расход охладителя, толщину покрытия, скорость и теплоотдачу охладителя - и найти при заданных ограничениях множество эффективных значений. Применение модели позволит исключить нецелесообразное охлаждение оболочек, учесть в процессе тепловой защиты напряженное и тепловое состояние.

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		14

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг

$$m := M - 1$$

$$j := 0..2 \cdot (m + 1)$$

$$\Delta z := \frac{H}{2M}$$

$$z_j := \Delta z \cdot j$$

$$dr := \frac{d}{ds} ra(s)$$

$$n := N - 1$$

$$i := 0..n$$

$$\Delta s := \frac{Ls}{n}$$

$$s_i := \Delta s \cdot i$$

$$\sigma_{i,j} := \sigma(s_i, z_j)$$

$$Ta_{i,j} := \begin{cases} \left(\frac{a}{ns \cdot \sigma_{i,j}} \right)^{\frac{1}{-b}} & \text{if } \left(\frac{a}{ns \cdot \sigma_{i,j}} \right)^{\frac{1}{-b}} < T_{\max} \\ T_{\max} & \text{if } \left(\frac{a}{ns \cdot \sigma_{i,j}} \right)^{\frac{1}{-b}} \geq T_{\max} \end{cases}$$

$$dTa_{1s} := dTa_{i,j} \leftarrow \begin{array}{l} \text{for } j \in 0..2m+2 \\ \text{for } i \in 1..n-1 \\ \left| \begin{array}{l} dTa_{0,j} \leftarrow \frac{Ta_{1,j} - Ta_{0,j}}{\Delta s} \\ dTa_{n,j} \leftarrow \frac{Ta_{n,j} - Ta_{n-1,j}}{\Delta s} \\ dTa_{i,j} \leftarrow \frac{Ta_{i+1,j} - Ta_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta s} \end{array} \right. \\ dTa_{i,j} \end{array}$$

$$dTa_{2z} := dTa_{i,j} \leftarrow \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..2m+1 \\ \text{for } i \in 0..n \\ \left| \begin{array}{l} dTa_{i,0} \leftarrow \frac{Ta_{i,1} - Ta_{i,0}}{\Delta z} \\ dTa_{i,2m+2} \leftarrow \frac{Ta_{i,m} - Ta_{i,m-1}}{\Delta z} \\ dTa_{i,j} \leftarrow \frac{Ta_{i,j+1} - Ta_{i,j-1}}{2 \cdot \Delta z} \end{array} \right. \\ dTa_{i,j} \end{array}$$


```

w ≥ wi+1,j ← for i ∈ 0..n
                for j ∈ 0..m
                    λri,j ← aλ · (Tri,j)bλ
                    μi,j ← aμ · (Tri,j)bμ
                    λfi,j ← (k8 ·  $\frac{2G_{0,j}}{\mu_{i,j} \cdot \Delta z}$ )k9
                for i ∈ 0
                    for j ∈ 0..m
                        w0,j ← w0,0,j
                        w1,0,j ← w0,0,j
                        P0,j ← P0,0,j
                        A ← (  $\frac{Tb_{i+1,j}}{Tr_{i+1,j}}$  )k4 · [  $\frac{2}{\Delta s \cdot (i+1)}$  ]k6 · (  $\frac{k1 \cdot k5 \cdot \lambda_{r_{i+1,j}}}{2 \cdot \alpha_{r_{i+1,j}}}$  )
                        ψ1i+1,j ← [ (  $\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z}$  )k2 · (  $\frac{\mu_{i+1,j} \cdot cp}{\lambda_{r_{i+1,j}}}$  )k3 · A ] $\frac{1}{k6-1}$  · (  $\frac{G_{0,j} \cdot R \cdot Tr_{i+1,j}}{\Delta z}$  )
                        ψ2i+1,j ← (  $\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z}$  )-k2 · (  $\frac{\mu_{i+1,j} \cdot cp}{\lambda_{r_{i+1,j}}}$  )-k3 · (  $\frac{Tb_{i+1,j}}{Tr_{i+1,j}}$  )-k4 · [  $\frac{k1 \cdot \lambda_{r_{i+1,j}} \cdot \Delta z}{2 \cdot \alpha_{r_{i+1,j}} \cdot (G_{0,j} \cdot R \cdot Tr_{i+1,j})}$  ]-1
                        ψi+1,j ← ψ1i+1,j if  $\frac{\psi^1_{i+1,j} \cdot \Delta z \cdot \Delta s \cdot (i+1)}{2(G_{0,j} \cdot R \cdot Tr_{i+1,j})} < k7$ 
                               ψ2i+1,j otherwise
                        df(x) ←  $\frac{d}{dx}$  [ (  $\zeta + 4 \cdot \frac{\mu_{i+1,j}}{3}$  ) · [ (  $\frac{x - w_{i,j}}{\Delta s}$  ) · (  $\frac{dr_{i+1}}{rb_{i+1}}$  ) · x2 ...
                               + [ (  $\frac{(\psi_{i+1,j} + xP_{i,j})^2}{2R \cdot Tr_{i+1,j}}$  ) · (  $\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z}$  )k9 · (  $\frac{(x + w_{i,j})^3 \cdot k8 \cdot \Delta z}{32G_{0,j}}$  ) ] ...
                               + [  $\frac{(x + w_{i,j})}{2} \cdot [ \frac{(x - w_{i,j})}{\Delta s} ] \cdot \frac{(\psi_{i+1,j} + xP_{i,j}) \cdot x}{2R \cdot Tr_{i+1,j}}$  ] ...
                               + [  $-\mu_{i+1,j} \cdot \frac{x + w_{i,j}}{2 \cdot (rb_{i+1})^2} \cdot x^2 - \frac{(\psi_{i+1,j} - xP_{i,j})}{\Delta s} \cdot x$  ] ]

```

$$w_{i+1,j} \leftarrow w_{i+1,j} \dots + \frac{\gamma}{df(w_{i+1,j})} \left[\left(\zeta + 4 \frac{\mu_{i+1,j}}{3} \right) \left[\frac{w_{i+1,j} - 2w_{i,j} + w_{i-1,j}}{\Delta s^2} \dots + \left(\frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2\Delta s} \cdot \frac{dr_{i+1}}{rb_{i+1}} \right) \right] \cdot (w_{i+1,j})^2 \dots + \left[\frac{\left(\frac{\psi_{i+1,j} + xP_{i-1,j}}{2R \cdot Tr_{i+1,j}} \right)^2 \left(\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z} \right)^{k9} \frac{(w_{i+1,j} + w_{i-1,j})^3 \cdot k8 \cdot \Delta z}{32 G_{0,j}} \right] \dots + \frac{(w_{i+1,j} + w_{i-1,j})}{2} \left[\frac{(w_{i+1,j} - w_{i-1,j})}{2 \cdot \Delta s} \right] \cdot \frac{(\psi_{i+1,j} + xP_{i-1,j}) \cdot w_{i+1,j}}{2R \cdot Tr_{i+1,j}} \dots + \left[-\mu_{i+1,j} \cdot \frac{w_{i+1,j} + w_{i-1,j}}{2 \cdot (rb_{i+1})^2} \cdot (w_{i+1,j})^2 - \frac{(\psi_{i+1,j} - w_{i+1,j} \cdot P_{i-1,j})}{2 \cdot \Delta s} \cdot w_{i+1,j} \right] \right]$$

$$\text{while } \frac{|w_{i+1,j} - w_{i+1,j}|}{w_{i+1,j}} > \varepsilon w$$

$$w_{i-1,j} \leftarrow w_{i-1,j}$$

$$w_{i,j} \leftarrow w_{i,j}$$

$$w_{i+1,j} \leftarrow w_{i+1,j}$$

$$df(x) \leftarrow \frac{d}{dx} \left[\left(\zeta + 4 \frac{\mu_{i+1,j}}{3} \right) \left[\frac{x - 2w_{i,j} + w_{i-1,j}}{\Delta s^2} - \left(\frac{x - w_{i-1,j}}{2\Delta s} \right) \cdot \frac{dr_{i+1}}{rb_{i+1}} \right] \cdot x^2 \dots + \left[\frac{\left(\frac{\psi_{i+1,j} + xP_{i-1,j}}{2R \cdot Tr_{i+1,j}} \right)^2 \left(\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z} \right)^{k9} \frac{(x + w_{i-1,j})^3 \cdot k8 \cdot \Delta z}{32 G_{0,j}} \right] \dots + \frac{(x + w_{i-1,j})}{2} \left[\frac{(x - w_{i-1,j})}{2 \cdot \Delta s} \right] \cdot \frac{(\psi_{i+1,j} + xP_{i-1,j}) \cdot x}{2R \cdot Tr_{i+1,j}} \dots + \left[-\mu_{i+1,j} \cdot \frac{x + w_{i-1,j}}{2 \cdot (rb_{i+1})^2} \cdot x^2 - \frac{(\psi_{i+1,j} - xP_{i-1,j})}{2 \cdot \Delta s} \cdot x \right] \right]$$

$$w_{i+1,j} \leftarrow w_{i+1,j} \dots$$

$$+ \frac{\gamma}{df(w_{i+1,j})} \left[\left(\zeta + 4 \frac{\mu_{i+1,j}}{3} \right) \left[\frac{w_{i+1,j} - 2w_{i,j} + w_{i-1,j}}{\Delta s^2} \dots + \left(\frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2\Delta s} \cdot \frac{dr_{i+1}}{rb_{i+1}} \right) \right] \cdot (w_{i+1,j})^2 \dots + \left[\frac{\left(\frac{\psi_{i+1,j} + xP_{i-1,j}}{2R \cdot Tr_{i+1,j}} \right)^2 \left(\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z} \right)^{k9} \frac{(w_{i+1,j} + w_{i-1,j})^3 \cdot k8 \cdot \Delta z}{32 G_{0,j}} \right] \dots + \frac{(w_{i+1,j} + w_{i-1,j})}{2} \left[\frac{(w_{i+1,j} - w_{i-1,j})}{2 \cdot \Delta s} \right] \cdot \frac{(\psi_{i+1,j} + xP_{i-1,j}) \cdot w_{i+1,j}}{2R \cdot Tr_{i+1,j}} \dots + \left[-\mu_{i+1,j} \cdot \frac{w_{i+1,j} + w_{i-1,j}}{2 \cdot (rb_{i+1})^2} \cdot (w_{i+1,j})^2 - \frac{(\psi_{i+1,j} - w_{i+1,j} \cdot P_{i-1,j})}{2 \cdot \Delta s} \cdot w_{i+1,j} \right] \right]$$

$\tilde{\alpha} := \tilde{\alpha}_{i+1,j} \leftarrow$ for $i \in 0..n$
 for $j \in 0..m$

$$w_{0,j} \leftarrow w_{0,j}^0$$

$$P_{0,j} \leftarrow P_{0,j}^0$$

$$\lambda_{r_{i,j}} \leftarrow a\lambda \cdot (\text{Tr}_{i,j})^{b\lambda}$$

$$\mu_{i,j} \leftarrow a\mu \cdot (\text{Tr}_{i,j})^{b\mu}$$

$$\lambda f_{i,j} \leftarrow \left(k8 \cdot \frac{2G_{0,j}}{\mu_{i,j} \cdot \Delta z} \right)^{k9}$$

$$\Lambda \leftarrow \left(\frac{\text{Tb}_{i+1,j}}{\text{Tr}_{i+1,j}} \right)^{k4} \cdot \left[\frac{2}{\Delta s \cdot (i+1)} \right]^{k6} \cdot \left(\frac{k1 k5 \cdot \lambda_{r_{i+1,j}}}{2 \cdot \alpha_{r_{i+1,j}}} \right)^{\frac{1}{k6-1}}$$

$$\psi^1_{i+1,j} \leftarrow \left[\left(\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z} \right)^{k2} \cdot \left(\frac{\mu_{i+1,j} \cdot \text{cp}}{\lambda_{r_{i+1,j}}} \right)^{k3} \cdot \Lambda \right]^{\frac{1}{k6-1}} \cdot \left(\frac{G_{0,j} \cdot R \cdot \text{Tr}_{i+1,j}}{\Delta z} \right)$$

$$\psi^2_{i+1,j} \leftarrow \left(\frac{2 \cdot G_{0,j}}{\mu_{i+1,j} \cdot \Delta z} \right)^{-k2} \cdot \left(\frac{\mu_{i+1,j} \cdot \text{cp}}{\lambda_{r_{i+1,j}}} \right)^{-k3} \cdot \left(\frac{\text{Tb}_{i+1,j}}{\text{Tr}_{i+1,j}} \right)^{-k4} \cdot \left[\frac{k1 \cdot \lambda_{r_{i+1,j}} \cdot \Delta z}{2 \cdot \alpha_{r_{i+1,j}} \cdot (G_{0,j} \cdot R \cdot \text{Tr}_{i+1,j})} \right]^{-1}$$

$$\psi_{i+1,j} \leftarrow \begin{cases} \psi^1_{i+1,j} & \text{if } \frac{\psi^1_{i+1,j} \cdot \Delta z \cdot \Delta s \cdot (i+1)}{2(G_{0,j} \cdot R \cdot \text{Tr}_{i+1,j})} < k7 \\ \psi^2_{i+1,j} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{i+1,j} \leftarrow \frac{\psi_{i+1,j}}{w_{i+1,j}}$$


$$\tilde{\alpha}_{0,j} \leftarrow G_{0,j} \cdot R \cdot \frac{\text{Tr}_{0,j}}{\Delta z \cdot w_{0,j} \cdot P_{0,j}}$$

$$\tilde{\alpha}_{i+1,j} \leftarrow G_{0,j} \cdot R \cdot \frac{\text{Tr}_{i,j}}{\Delta z \cdot w_{i+1,j} \cdot P_{i+1,j}}$$

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

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФЭУ

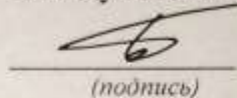


А.С. Гудим

« 16 » 06 20 22 г.

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой _____



М.С. Гринкруг

« 16 » 06 20 22 г.

АКТ

о приемке в эксплуатацию проекта

*«Разработка программы многокритериальной оптимизации
конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов
турбомашин»*

г. Комсомольск-на-Амуре

«16» 06 2022 г.

Комиссия в составе представителей:

заказчика

- *И.К. Андрианов – руководитель проекта,*
- *М.С. Гринкруг – Заведующий кафедрой «Общая физика»,*
- *А.С. Гудим – декана ФЭУ*

исполнителя

- *Ф.В. Грищенко – ГЭЛб-1,*

составила акт о нижеследующем:

«Исполнитель» передает аппаратно-программный комплекс «Разработка программы многокритериальной оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов турбомашин», в составе:

Оборудование, в составе:

- Листинг и описание программы


Эксплуатационная документация:

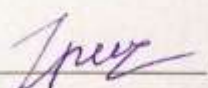
- Паспорт изделия

Аппаратно-программный комплекс «Разработка программы многокритериальной оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов турбомашин» прошел опытную эксплуатацию с « 16 » 05 2022 по « 30 » 05 20 22 г. и признан годным к эксплуатации. Были протестированы все режимы функционирования, отказы системы, а также аварийные отключения по вине системы не наблюдались.

Руководитель проекта

Ответственный исполнитель

 / И.К. Андрианов /

 / Ф.В. Грищенко /

