


На правах рукописи



**Андрианов Иван Константинович**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ТЕПЛООТВОДА В ОБОЛОЧКОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ  
ТУРБОМАШИН НА ОСНОВАНИИ УСЛОВИЯ  
ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре — 2017

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

Научный руководитель: **Гринкруг Мирон Соломонович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Общая физика», ФГБОУ  
ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный  
технический университет».

Официальные оппоненты: **Минаев Сергей Сергеевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник, заведующий  
лабораторией перспективных технологий горения,  
Дальневосточный федеральный университет,  
г. Владивосток.

**Севастьянов Георгий Мамиевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ФГБУН Институт  
машиноведения и металлургии ДВО РАН,  
г.Комсомольск-на-Амуре.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт прикладной  
математики ДВО РАН, г. Владивосток.

Защита состоится 19 мая 2017 г. в 9:30 ч. на заседании диссертационного  
совета Д 999.055.04 на базе Комсомольского-на-Амуре государственного  
технического университета по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр.  
Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНАГТУ» и  
на сайте [www.knastu.ru](http://www.knastu.ru).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью,  
просим направлять в адрес диссертационного совета Д 999.055.04, e-mail:  
[diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г .

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук, доцент



А. Ю. Лошманов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования** обусловлена широким развитием методов управления параметрами теплопереноса во внутренних системах охлаждения оболочковых элементов турбомашин ввиду постоянного повышения рабочих температур нагревающих газовых потоков и предъявления более высоких требований к тепловому состоянию элементов. Особенностью этих элементов является то, что они находятся в условиях неравномерного теплового и силового воздействия.

Весьма важными на сегодняшний день являются вопросы минимизации расхода охладителя, снижения нецелесообразных затрат на охлаждение менее нагруженных участков элементов, а также повышение эффективности и экономичности работы систем теплоотвода оболочковых элементов. Решения данных проблем требуют исследования математической стороны задачи оптимального теплоотвода, что связано с построением математических моделей процессов теплопереноса, учитывающих специфические особенности систем подвода и отвода теплоты. Все чаще решения прикладных проблем требуют использования комплексного подхода, ориентированного на методы математического теплового моделирования, теории прочности, газодинамики. Соответственно, управление тепловым состоянием элементов путем изменения геометрических характеристик каналов теплоотвода на основании прочностных условий с целью повышения эффективности охлаждения является весьма перспективным направлением.

Таким образом, в связи с модернизацией систем охлаждения оболочковых элементов турбомашин актуальной является разработка математических моделей течения теплообменного процесса и методов их расчета, позволяющих оптимизировать параметры работы систем теплоотвода.

**Степень разработанности темы исследования.** Непрерывное развитие турбомашиностроения обуславливает широкий интерес многих ученых к вопросам математического моделирования процессов теплопереноса. Значительный вклад в создание теоретических основ, методологии теории теплообмена в турбомашинах внесли следующие ученые: В. Д. Венедиктов, О. Н. Емин, Л. В. Зысин, Л. М. Зысина-Моложен, И. И. Кириллов, В. И. Локай, В. М. Кофман, В. Т. Митрохин, М. П. Поляк, К. В. Холщевников и др. Целостная база методов моделирования тепловой защиты элементов разработана: Б. М. Галицейским, В. Д. Совершенным, В. Ф. Формалевым, М. С. Черным и др. Вопросы термочности в элементах турбомашин подробно изучены учеными: И. А. Биргером, А. Е. Ковалевской, А. Г. Костюковым и др. Вопросы эффективности охлаждения, применения вычислительных методов расчета в элементах турбомашин широко исследованы в работах: В. В. Бирюка, Г. Н. Бурцевой, Е. П. Дыбан,

И. В. Коломина, С. З. Копелева, Г. П. Нагога, А. Ф. Слитенко, В. С. Соколова, В. А. Трушина, И. Т. Швец, С. Du, L. Li, Z. Feng и др.

За последние десятилетия были предложены новые численные методы, математические модели, программные комплексы различными учеными, а именно: в области термогазодинамических расчетов – А. Б. Агульником, В. И. Бакулевым, В. А. Голубевым, И. В. Кравченко, Б. А. Крыловым и др.; в области моделирования теплопереноса в турбомашинах – И. Н. Байбузенко, А. А. Седловым, В.Л. Ивановым, Н. Л. Щеголевым, М. Н. Жорником, Е. Г. Колесовой, С. В. Веретенниковым, С. Н. Бариновым, Ю. Я. Дашевским, С. Д. Севериным, L. D. Dobrowolski, D. G. Bogard, J. Piggush, A. Kohli и др. Методы интенсификации охлаждения рассмотрены А. Гюлайлиа, Д. Л. Жуховицким, Н. Н. Ковальноговым, А. С. Тихоновым, М. К. Хамиду, А. Хорси, А. А. Цынаевой, J. Yao, S. Sian, Y. Yao, T. W. Davis и др. Новые разработки систем охлаждения предложены К. Д. Андреевым, И. И. Борисовым, Ю. Я. Дашевским, А. В. Дмитренко, Д. А. Красавиным, Н. Ю. Самохваловым, С. И. Сендюревым, В. Т. Хайрулиным, А. А. Халатовым, В. Weigand, K. Semmler, J. V. Wolfersdore и др. Различные модели систем подвода и отвода теплоты, а также их оптимизации разработаны Е. Н. Богомоловым, Ю. Г. Гореловым, А. И. Долговым, А. Н. Золотовым, В. Н. Ковальноговым, М. И. Корниловой, В. С. Кузьмичевым, М. Н. Орешкиной, А. И. Тарасовым и др.

Несмотря на значительное количество исследований в области теплообмена, большинство из них связано с расчетом теплового и теплонапряженного состояний при заданных условиях нагружения. Проведено достаточно много исследований теплообменных задач в обратной постановке, преимущественно направленных на расчет причинных характеристик теплопереноса, особенно при оценке экспериментальных данных о тепловом состоянии исследуемого объекта, в то же время математическое моделирование в области оптимизации процессов теплопереноса представлено немногочисленными работами.

Достаточно большое количество научных работ направлено на моделирование равномерных температурных полей в элементах турбомашин. Большая часть из них представляет собой практические разработки, а предлагаемые методы управления тепловым состоянием носят экспериментальный характер. Современные методы тепловой защиты элементов турбомашин преимущественно ориентированы на использование теплозащитных покрытий и применение практических средств интенсификации внутренних систем охлаждения. В связи с этим возникает необходимость разработки методов, алгоритмов и комплексов программ, ориентированных на оптимизацию процессов теплоотвода в оболочковых элементах за счет управления геометрией каналов охлаждения.

**Цель научного исследования** заключается в проведении математического моделирования и численного исследования процессов теплоотвода, а также в разработке комплекса программ, обеспечивающих

оптимальную тепловую защиту оболочковых элементов турбомашин на основании условия длительной прочности.

В соответствии с целью научной работы определены **задачи исследования**:

1. Построить математическую модель процесса теплоотвода, удовлетворяющего критерию длительной прочности, для оболочковых элементов, находящихся в условиях неравномерного напряженного состояния и внешнего теплоподвода, при которой будет обеспечен минимальный расход охладителя.
2. Получить численные закономерности между параметрами теплоотвода, геометрическими характеристиками каналов охлаждения и критерием минимизации расхода при одинаковом запасе прочности в точках наиболее термонагруженной поверхности оболочкового элемента.
3. Разработать вычислительный алгоритм расчета минимального массового расхода хладагента при соответствующем изменении ширины поперечного сечения каналов теплоотвода необходимого для реализации теплового состояния, удовлетворяющего требуемому прочностному условию.
4. Предложить программную реализацию численной методики расчета процессов теплоотвода, обеспечивающих равнопрочное состояние оболочковых элементов, для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ.
5. Провести численное исследование процессов теплопереноса в оболочковых лопатках турбин в условиях неравномерного подвода теплоты, различных схем тепловой защиты и времени нагружения.

**Научная новизна** диссертационного исследования обусловлена следующими положениями:

1. Предложен новый подход к минимизации массового расхода охлаждающих газовых сред во внутренних системах охлаждения оболочковых элементов турбомашин за счет управления температурным полем на основании условия равнопрочности.
2. Получены численные зависимости между оптимальным расходом охладителя и изменением ширины поперечного сечения каналов теплоотвода, при которых тепловое состояние оболочковых элементов удовлетворяет одинаковому запасу прочности в условиях неравномерного теплоподвода и напряженного состояния.
3. Разработан новый программный комплекс, реализующий вычислительный алгоритм для расчета нелинейных разностных схем процесса отвода тепла, позволяющий получить оценку требуемого изменения кинематической картины течения, параметров теплоотдачи и геометрии каналов охлаждения, при которых будет реализован минимальный расход хладагента.

4. Представлены новые результаты численного моделирования процессов переноса тепла, обеспечивающих требуемый теплоотвод, на основании рассчитанного изменения ширины сечения каналов охлаждения и массового расхода охладителя.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что предложенная численная методика расчета параметров теплоотвода позволит существенно повысить эффективность охлаждения элементов турбомашин, в частности, рабочих и сопловых лопаток, камер сгорания, корпусов газотурбинного двигателя за счет рационального отвода тепла, а также снизить затраты на нецелесообразное охлаждение менее нагруженных участков элемента путем минимизации расхода хладагента.

Результаты численного расчета позволят обеспечить оптимальный выбор формы дефлекторных вставок за счет варьирования геометрическими характеристиками каналов теплоотвода, учитывая особенности напряженного состояния. Применение предложенной модели может быть успешно использовано на стадии проектирования оболочковых элементов газотурбинных двигателей, ориентированных на повышение рабочей температуры нагреваемых сред, обеспечивая высокий КПД двигателя.

Численные закономерности, установленные в данной работе, могут быть использованы для дальнейшей разработки математических моделей оптимального теплоотвода. Результаты проведенного научного исследования будут полезны при реализации образовательных программ в рамках теплового математического моделирования, при изучении дисциплин: численные методы в задачах теплопереноса, механика оболочечных конструкций, теплотехника, теория прочности.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования теплообменных и газодинамических процессов, методы вычислительной математики для построения численной модели нелинейного процесса теплоотвода на основании теории разностных схем, методы численного интегрирования для расчета массового расхода охладителя в каналах теплоотвода и оценки распределения коэффициентов теплоотдачи на поверхности теплоотвода, итерационные процедуры для численного расчета кинематической картины течения охлаждающего потока, описываемой системой нелинейных уравнений. Для программной реализации предложенных алгоритмов расчета, а также проведения вычислительных экспериментов использовался математический пакет Mathcad.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процесса теплоотвода, обеспечивающего равнопрочное состояние в точках наиболее термонагруженной поверхности оболочкового элемента.
2. Численная методика расчета параметров теплоотвода, минимального массового расхода хладагента, учитывающего

неравномерность подвода тепловой энергии и напряженного состояния оболочковых элементов.

3. Вычислительный алгоритм и комплекс программ для численного исследования процессов теплопереноса, кинематической картины течения охлаждающего потока, а также геометрической конфигурации каналов охлаждения на основании критерия длительной прочности.
4. Оценка результатов численного моделирования геометрии каналов теплоотвода, обеспечивающих реализацию требуемой температурной конфигурации, соответствующей равнопрочному состоянию при заданном времени работы элемента.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается адекватностью математических тепловых моделей, применением и обоснованным комбинированием апробированных методов численного анализа. Реализация численных процедур на ЭВМ проводилась с контролируемой точностью. Результаты диссертационного исследования сравнивались с работами других авторов.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты проведенного диссертационного исследования были представлены на следующих научных конференциях и конкурсах: XIV Международная научная конференция имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование» (г. Томск, 2015 г.), XXV Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2016 г.), XVIII и XIX краевые конкурсы молодых ученых и аспирантов: «Физико-математические науки и информационные технологии» (г. Хабаровск, 2016 г., 2017 г.), XV Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2016 г.), II Научно-практическая конференция с международным участием «Аспекты оперативного управления в технических системах» (г. Москва, 2016 г.), IV научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2016 г.), XX Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти академика М. Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2016 г.), VII Всероссийский конкурс молодых ученых, посвященный 70-летию Победы (г. Миасс, 2015 г.), XI Международная научно-практическая конференция «Наука и цивилизация» (г. Шеффилд, 2015 г.), Международная научно-практическая конференция «Наука сегодня: теория, методология, практика, проблематика» (г. Варшава, 2014 г.). Научная работа докладывалась и обсуждалась на научном семинаре в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН, на кафедрах «Прикладная математика» и «Общая физика» ФГБОУ ВО КнАГТУ (г. Комсомольск-на-Амуре, 2016 г.).

**Благодарность.** Автор выражает благодарность Мирону Соломоновичу Гринкругу и Юлии Ильиничне Ткачевой за помощь и поддержку в работе над диссертационным исследованием.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения, перечня используемых литературных источников, содержащего 138 наименований. Общий объем диссертационного исследования составляет 154 страницы, включающих в себя 40 иллюстраций.

### **Краткое содержание диссертационной работы.**

**Во введении** обоснована актуальность темы, раскрыта проблематика научного исследования, сформулированы цели и задачи, отражена новизна и практическая значимость диссертационного исследования.

**В первой главе** проведен анализ подходов к математическому моделированию теплообменных процессов в системах теплопереноса, исследованы численные методы, применяемые для расчета параметров газодинамических процессов, теплопроводности, конвективного теплообмена. Освещены новые методики оптимизации охлаждения оболочковых элементов турбомашин, особенности моделирования тепловой защиты.

**Вторая глава** посвящена математическому описанию исследуемых процессов, преобразованию основных уравнений с учетом требуемых особенностей исследуемой теплообменной системы. В параграфе 2.1 дана постановка комплексной теплообменной задачи. Предложен подход к минимизации массового расхода охладителя  $G_r$  за счет обеспечения максимальных температурных значений  $T_a$  в точках наиболее термонагруженной поверхности  $\Omega_a$  оболочкового элемента:

$$G_r^{\min} = G_r|_{T_a=T_a^{\max}}.$$

Температурное поле  $T_a$  определяется из условия равнопрочности на основании предела длительной прочности  $\sigma_{дл}^{\tau}$  при заданном времени работы  $\tau = \text{const}$ :

$$T_a^{\max} = T_a|_{\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{дл}^{\tau}/[n]}.$$

где  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентные напряжения,  $[n]$  – заданный коэффициент запаса.

Под равнопрочным в исследовании понимается состояние, при котором обеспечивается одинаковый запас прочности.

В параграфе 2.2 проведено дифференцирование причинных и следственных характеристик теплообменного процесса. Рассмотрены различные схемы расположения ограждающих поверхностей теплоподвода и теплоотвода однослойных оболочковых элементов и оболочек с теплозащитным слоем.



В параграфе 2.3 представлена математическая модель нелинейного теплопереноса в оболочковых элементах турбомашин (рисунок 1), обеспечивающая реализацию температурного поля на наиболее термонагруженной поверхности оболочки, определяющего равнопрочное состояние и удовлетворяющего минимальному расходу охладителя.

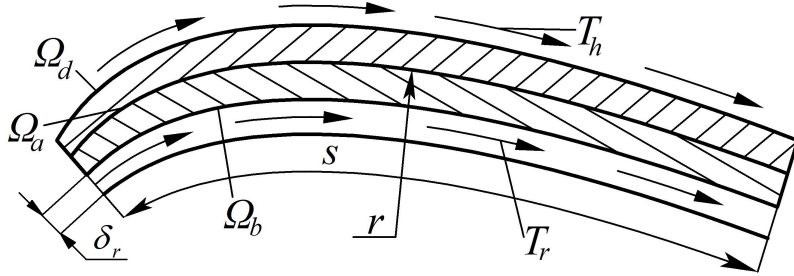


Рис. 1 — Двухслойный оболочковый элемент

$r$  – радиус-кривизны оболочки,  $s$  – криволинейная координата, направленная вдоль контура сечения оболочки,  $T_h$  – температура нагревающего газового потока,  $T_r$  – температура охладителя,  $\delta_r$  – ширина поперечного сечения канала теплоотвода,  $\Omega_b$  – поверхность охлаждения основного оболочкового слоя,  $\Omega_d$  – тепловоспринимающая поверхность теплозащитного слоя.

В параграфе 2.4 дано математическое описание течения охлаждающего потока в каналах охлаждения элемента и кинематической картины движения на основании требуемых условий теплоотвода.

В результате, математическая постановка задачи исследования описывается следующей системой уравнений:

- уравнение нелинейной теплопроводности для основного оболочкового слоя:

$$(\xi_s + \eta_s T_s) \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial s^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial s} \frac{\partial r}{\partial s} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + \eta_s \left[ \left( \frac{\partial T_s}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)^2 \right] = 0, \quad (1)$$

- уравнение нелинейной теплопроводности для теплозащитного слоя:

$$(\xi_p + \eta_p T_p) \left( \frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial s^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial T_p}{\partial s} \frac{\partial r}{\partial s} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} \right) + \eta_p \left[ \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_p}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_p}{\partial z} \right)^2 \right] = 0, \quad (2)$$

- уравнение движения охлаждающего потока в каналах теплоотвода:

$$\begin{aligned} \rho w_s \frac{\partial w_s}{\partial s} &= -\frac{\partial p}{\partial s} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_s}{\partial s^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial w_s}{\partial s} \frac{\partial r}{\partial s} - \frac{w_s}{r^2} \right) + \\ &+ \left( \zeta + \frac{\mu}{3} \right) \left( \frac{\partial^2 w_s}{\partial s^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial w_s}{\partial s} \frac{\partial r}{\partial s} \right) - \rho \frac{\lambda_f w_s^2}{\delta_r 4}, \end{aligned} \quad (3)$$

– уравнение теплопереноса в каналах охлаждения:

$$\frac{2\alpha_r \delta_r}{\lambda_r} = k_1 \left( \frac{2w_s \delta_r \rho}{\mu} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu c_p}{\lambda_r} \right)^{k_3} \left( \frac{T_b}{T_r} \right)^{k_4} \varepsilon_l, \quad (4)$$

– уравнение состояния охлаждающего газа:

$$p = \rho R T_r, \quad (5)$$

– уравнение неразрывности охлаждающего потока в канале:

$$\frac{\partial (\rho w_s)}{\partial s} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия стационарного теплообменного процесса:

– на наиболее термонагруженной поверхности  $\Omega_a$  основного оболочкового слоя:

$$T_a = \begin{cases} \left( \frac{a}{[n] \sigma_{\text{ЭКВ}}} \right)^{\frac{1}{b}}, & \text{при} \left( \frac{a}{[n] \sigma_{\text{ЭКВ}}} \right)^{\frac{1}{b}} < T_{\text{max}}, \\ T_{\text{max}}, & \text{при} \left( \frac{a}{[n] \sigma_{\text{ЭКВ}}} \right)^{\frac{1}{b}} \geq T_{\text{max}} \vee \sigma_{\text{ЭКВ}} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

– на поверхности теплоподвода оболочкового элемента:

$$\begin{cases} \alpha_h (T_h - T_a) = (\xi_s + \eta_s T_a) \left| \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{\Omega_a}, & \text{при} \delta_p = 0 \\ \alpha_h (T_h - T_d) = (\xi_p + \eta_p T_d) \left| \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{\Omega_d}, & \text{при} \delta_p \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

– на поверхности охлаждения оболочкового элемента:

$$\alpha_r (T_b - T_r) = (\xi_s + \eta_s T_b) \left| \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{\Omega_b}, \quad (9)$$

– на поверхности контакта оболочковых слоев:

$$T_s|_{\Omega_a} = T_p|_{\Omega_a}, \quad (10)$$

$$(\xi_s + \eta_s T_a) \left( \frac{\partial T_s}{\partial r} \right)_{\Omega_a} = (\xi_p + \eta_p T_a) \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)_{\Omega_a}, \quad (11)$$

– во внутренних каналах охлаждения:

$$T_r(0, \tilde{z}) = T_r^{0, \tilde{j}}, p(0, \tilde{z}) = p^{0, \tilde{j}}, \quad (12)$$

$$w_s(0, \tilde{z}) = w_s^{0, \tilde{j}}, w'_s(0, \tilde{z}) = \left( \frac{\partial w_s}{\partial s} \right)^{0, \tilde{j}}, \quad (13)$$

где  $T_s$  – температура основного оболочкового слоя,  $\xi_s, \eta_s$  – константы коэффициента теплопроводности  $\lambda_s = \xi_s + \eta_s T_s$  основного оболочкового слоя,  $T_p$  – температура теплозащитного слоя,  $\xi_p, \eta_p$  – константы коэффициента теплопроводности  $\lambda_p = \xi_p + \eta_p T_p$  теплозащитного слоя,  $z$  – координата направленная вдоль образующей оболочки,  $T_d$  – температурное поле на поверхности  $\Omega_d$ ,  $T_b$  – температурное поле на поверхности  $\Omega_b$ ,  $a, b$  – константы предела длительной прочности  $\sigma_{дл}^\tau$  при  $\tau = \text{const}$ ,  $T_{\max}$  – максимально допустимая температура оболочкового элемента,  $w_s$  – средняя скорость охлаждающего потока вдоль контура  $s$  в канале теплоотвода,  $p$  – давление в канале охлаждения,  $\lambda_f$  – коэффициент гидравлического сопротивления,  $\rho$  – плотность охлаждающего потока,  $c_p$  – изобарная теплоемкость охлаждающего газа,  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности охлаждающего газового потока,  $G_r$  – массовый расход охладителя,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\zeta$  – объемная вязкость,  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – константы, определяемые опытным путем,  $R$  – газовая постоянная,  $\varepsilon_l$  – поправочный коэффициент,  $\alpha_h$  – коэффициент теплоотдачи от нагревающего газа к тепловоспринимающей поверхности оболочкового элемента,  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой поверхности оболочки к теплоотводящему газовому потоку,  $\tilde{j}$  – номер канала теплоотвода,  $\tilde{z} = z_j$  – координата расположения  $\tilde{j}$ -го канала теплоотвода,  $T_r^{0, \tilde{j}}$  – температура охладителя на входе в канал теплоотвода,  $\delta_p$  – толщина теплозащитного слоя.

**В третьей главе** проведено численное моделирование процессов теплопереноса на основании предложенной математической формулировки задачи исследования (1) – (13). Параграф 3.1 посвящен расчету удельных тепловых потоков  $q_{sb}$  в однослойных и двухслойных оболочковых элементах на граничной поверхности теплоотвода, при котором обеспечивается требуемое температурное поле  $T_a$ . Для проведения численного расчета задачи строилась равномерная сетка с системой узлов  $s_i = i\Delta s, i = 0, 1, \dots, n$ ,  $z_j = j\Delta z, j = 0, 1, \dots, m$ . Изменение температуры по толщинам слоев оболочкового элемента аппроксимировалось параболической зависимостью

$$T_s(r, s_i, z_j) = A_s^{i, j} r^2 + B_s^{i, j} r + C_s^{i, j}, T_p(r, s_i, z_j) = A_p^{i, j} r^2 + B_p^{i, j} r + C_p^{i, j}.$$

Решение нелинейной системы уравнений сводилось к расчету температурного поля  $T_d^{i,j}$  на граничной поверхности теплозащитного слоя на основании решения нелинейного уравнения:

$$\begin{aligned} & \eta_p r_a^i (\theta_\xi + \theta_\eta)^2 + (2\theta_\xi + \theta_\eta) (\xi_p + \eta_p T_a^{i,j})^2 \delta_p^2 + \left[ \eta_p \left[ \left( \frac{T_a^{i+1,j} - T_a^{i-1,j}}{2\Delta s} \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left( \frac{T_a^{i,j+1} - T_a^{i,j-1}}{2\Delta z} \right)^2 \right] + (\xi_p + \eta_p T_a^{i,j}) \left( \frac{T_a^{i+1,j} - 2T_a^{i,j} + T_a^{i-1,j}}{(\Delta s)^2} + \frac{T_a^{i,j+1} - 2T_a^{i,j} + T_a^{i,j-1}}{(\Delta z)^2} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{T_a^{i,j-1}}{(\Delta z)^2} \right) - \frac{T_a^{i+1,j} - T_a^{i-1,j}}{2r_a^i \Delta s} \left( \frac{\partial r_a}{\partial s} \right)^i \right] (\xi_p + \eta_p T_d^{i,j})^2 (r_a^i - r_d^i)^4 r_a^i = 0, \quad (14) \end{aligned}$$

где  $\theta_\xi = 2 \left( \xi_p (T_a^{i,j} - T_d^{i,j}) - (T_d^{i,j} + T_a^{i,j}) T_d^{i,j} \eta_p - \alpha_h^{i,j} \delta_p (T_d^{i,j} + T_h^{i,j}) \right) r_a^i$ ,

$$\theta_\eta = 2r_a^i \left( \eta_p T_d^{i,j} + \xi_p \right) (T_a^{i,j} - T_d^{i,j}) - \alpha_h^{i,j} \left( (r_d^i)^2 + (r_a^i)^2 \right) (T_h^{i,j} - T_d^{i,j}),$$

$r_a^i$  – радиус-кривизны в точке на поверхности  $\Omega_a$ .

На основании численных данных о температурном распределении  $T_d^{i,j}$  в двухслойных оболочковых элементах определяются интерполяционные коэффициенты  $A_p^{i,j}$ ,  $B_p^{i,j}$ ,  $C_p^{i,j}$  и температурное поле  $T_b^{i,j}$  на граничной поверхности теплоотвода:

$$\begin{aligned} T_b^{i,j} = & T_a^{i,j} - \frac{\left( 4r_a^i r_b^i - 3(r_a^i)^2 - (r_b^i)^2 \right) q_{p_a}}{r_a (\xi_s + \eta_s T_a^{i,j})} - \frac{\theta_c \eta_s q_{p_a}^2}{2 (\xi_s + \eta_s T_a^{i,j})^3} - \\ & - \frac{1}{2} \left[ (\xi_s + \eta_s T_a^{i,j}) \left( \frac{T_a^{i+1,j} - 2T_a^{i,j} + T_a^{i-1,j}}{(\Delta s)^2} + \frac{T_a^{i,j+1} - 2T_a^{i,j} + T_a^{i,j-1}}{(\Delta z)^2} \right) + \right. \\ & \left. + \eta_s \left[ \left( \frac{T_a^{i+1,j} - T_a^{i-1,j}}{2\Delta s} \right)^2 + \left( \frac{T_a^{i,j+1} - T_a^{i,j-1}}{2\Delta z} \right)^2 \right] - \right. \\ & \left. - \frac{(\xi_s + \eta_s T_a^{i+1,j})}{r_a^i} \left( \frac{T_a^{i+1,j} - T_a^{i-1,j}}{2\Delta s} \right) \left( \frac{\partial r_a}{\partial s} \right)^i \right] \frac{(r_a^i - r_b^i)^2}{(\xi_s + \eta_s T_a^{i,j})}, \quad (15) \end{aligned}$$

где  $\theta_c = r_a^i \left[ (r_a^i)^4 + (r_b^i)^4 \right] - 4(r_a^i)^2 r_b^i \left( (r_a^i)^2 + (r_b^i)^2 + \frac{3}{2} r_a^i r_b^i \right) \left[ (r_a^i - r_b^i)^2 r_a^i \right]^{-1}$ ,  
 $q_{p_a} = -(\xi_s + \eta_s T_a^{i,j}) (2A_p^{i,j} r_a^i + B_p^{i,j})$ .

Используя температурные значения  $T_b^{i,j}$  на поверхности теплоотвода, вычисляются интерполяционные коэффициенты  $A_s^{i,j}$ ,  $B_s^{i,j}$ ,  $C_s^{i,j}$  для основного оболочкового слоя.

Параграф 3.2 посвящен численному исследованию параметров теплоотвода в системе каналов охлаждения  $\tilde{j} = 0, \dots, \tilde{m}$  шириной  $\Delta\tilde{z} = H/\tilde{m}$  вдоль контура  $s$ , где  $H$  – высота оболочкового элемента. Массовый расход определяется из условия равенства количества подведенного и отведенного тепла при реализации температурного поля на граничной поверхности в случае однослойной оболочки и на поверхности контакта теплозащитного и основного слоев для двухслойного оболочкового элемента.

С помощью метода численного интегрирования по всему контуру течения хладагента для каждого  $\tilde{j}$ -го канала теплоотвода получены соотношения для минимального массового расхода хладагента:

$$G_r^{\tilde{j}} = \begin{cases} \left( \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_h^{i,\tilde{j}} (T_h^{i,\tilde{j}} - T_a^{i,\tilde{j}}) \Delta\tilde{z}\Delta s + \theta_a \right) [c_p (T_r^{n,\tilde{j}} - T_r^{0,\tilde{j}})]^{-1}, & \text{при } \delta_p = 0, \\ \left( \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_h^{i,\tilde{j}} (T_h^{i,\tilde{j}} - T_d^{i,\tilde{j}}) \Delta\tilde{z}\Delta s + \theta_d \right) [c_p (T_r^{n,\tilde{j}} - T_r^{0,\tilde{j}})]^{-1}, & \text{при } \delta_p \neq 0, \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{где } \theta_a = \left[ \alpha_h^{0,\tilde{j}} (T_h^{0,\tilde{j}} - T_a^{0,\tilde{j}}) + \alpha_h^{n,\tilde{j}} (T_h^{n,\tilde{j}} - T_a^{n,\tilde{j}}) \right] \frac{\Delta\tilde{z}\Delta s}{2},$$

$$\theta_d = \left[ \alpha_h^{0,\tilde{j}} (T_h^{0,\tilde{j}} - T_d^{0,\tilde{j}}) + \alpha_h^{n,\tilde{j}} (T_h^{n,\tilde{j}} - T_d^{n,\tilde{j}}) \right] \frac{\Delta\tilde{z}\Delta s}{2}.$$

Для определения условий теплоотвода, обеспечивающих требуемый массовый расход  $G_r^{\tilde{j}}$ , используется условие теплового баланса на малом участке расчетного контура поверхности охлаждения  $s_i \leq s \leq s_{i+1}$ . Используя граничные условия на поверхности теплоотвода  $\Omega_b$ , получено разностное уравнение для расчета коэффициентов теплоотдачи в каналах охлаждения:

$$\alpha_r^{i+1,\tilde{j}} \alpha_r^{i,\tilde{j}} \left[ 2c_p G_r^{\tilde{j}} (T_b^{i+1,\tilde{j}} - T_b^{i,\tilde{j}}) - \left( |q_{s_b}^{i+1,\tilde{j}}| + |q_{s_b}^{i,\tilde{j}}| \right) \Delta\tilde{z}\Delta s \right] +$$

$$+ 2c_p G_r^{\tilde{j}} \left( \alpha_r^{i+1,\tilde{j}} |q_{s_b}^{i,\tilde{j}}| - \alpha_r^{i,\tilde{j}} |q_{s_b}^{i+1,\tilde{j}}| \right) = 0, \quad (17)$$

$$\text{где } q_{s_b}^{i,\tilde{j}} = - \left( 2A_s^{i,\tilde{j}} r_b^i + B_s^{i,\tilde{j}} \right) \left( \xi_s + \eta_s T_b^{i,\tilde{j}} \right).$$

На основании расчетных данных о распределении коэффициентов теплоотдачи определяется изменение теплового состояния охлаждающего

газового потока в каналах теплоотвода:

$$T_r^{i+1,\tilde{j}} = T_b^{i+1,\tilde{j}} - \left(\alpha_r^{i+1,\tilde{j}}\right)^{-1} \left| 2A_s^{i+1,\tilde{j}} r_b^{i+1,\tilde{j}} + B_s^{i+1,\tilde{j}} \right| \left( \xi_s + \eta_s T_b^{i+1,\tilde{j}} \right). \quad (18)$$

В параграфе 3.3 на основании численно установленных закономерностей конвективного теплообмена рассматриваются параметры течения хладагента и необходимая геометрия каналов теплоотвода. В разделе строится дискретная модель кинематической картины течения, обеспечивающая реализацию требуемых параметров теплоотвода. Дифференциальное уравнение, описывающее движение газового потока в каналах теплоотвода (3), представляется в конечно-разностной форме при  $i = 1, \dots, (n - 1)$ ,  $\tilde{j} = 0, 1, \dots, \tilde{m}$ :

$$\begin{aligned} & \left( \zeta + \frac{4\mu^{i,\tilde{j}}}{3} \right) \left[ \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} - 2w_s^{i,\tilde{j}} + w_s^{i-1,\tilde{j}}}{(\Delta s)^2} - \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} - w_s^{i-1,\tilde{j}}}{2r_b^i \Delta s} \right) \left( \frac{\partial r_b}{\partial s} \right)^i \right] - \mu^{i,\tilde{j}} \frac{w_s^{i,\tilde{j}}}{(r_b^i)^2} - \\ & - \left( \frac{2G_r^{\tilde{j}}}{\mu^{i,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right)^{k_9} \left( \frac{w_s^{i,\tilde{j}} p^{i,j}}{RT_r^{i,j}} \right)^2 \frac{k_8 w_s^{i,j} \Delta \tilde{z}}{4G_r^{\tilde{j}}} - \frac{w_s^{i,\tilde{j}} p^{i,j}}{RT_r^{i,j}} \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} - w_s^{i-1,\tilde{j}}}{2\Delta s} \right) - \frac{p^{i+1,\tilde{j}} - p^{i-1,\tilde{j}}}{2\Delta s} = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $k_8, k_9$  – константы, определяемые опытным путем.

Уравнение теплопереноса в дискретной форме при  $i = 0, 1, \dots, (n - 1)$ ,  $\tilde{j} = 0, 1, \dots, \tilde{m}$  примет следующий вид

$$\begin{aligned} & - \text{при} \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z} \Delta s (i + 1)}{2G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}} \right) < k_7 : \\ & \left( \frac{2G_r^{\tilde{j}}}{\mu^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu^{i+1,\tilde{j}} c_p}{\lambda_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_3} \left( \frac{T_b^{i+1,\tilde{j}}}{T_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_4} \left( \frac{2G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}}{w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z} \Delta s (i + 1)} \right)^{k_6} - \\ & - \frac{1}{k_1 k_5} \left( \frac{2\alpha_r^{i+1,\tilde{j}} G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}}{\lambda_r^{i+1,\tilde{j}} w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right) = 0, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & - \text{при} \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z} \Delta s (i + 1)}{2G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}} \right) \geq k_7 : \\ & \left( \frac{2G_r^{\tilde{j}}}{\mu^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu^{i+1,\tilde{j}} c_p}{\lambda_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_3} \left( \frac{T_b^{i+1,\tilde{j}}}{T_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_4} - \frac{1}{k_1} \left( \frac{2\alpha_r^{i+1,\tilde{j}} G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}}{\lambda_r^{i+1,\tilde{j}} w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Получено нелинейное разностное уравнение для определения изменения средней скорости потока вдоль контура  $s$ , при котором обеспечивается требуемый теплоотвод:

$$\begin{aligned}
& \left( \zeta + \frac{4\mu^{i+1,\tilde{j}}}{3} \right) \left[ \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} - 2w_s^{i,\tilde{j}} + w_s^{i-1,\tilde{j}}}{(\Delta s)^2} - \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} - w_s^{i-1,\tilde{j}}}{2\Delta s r_b^i} \right) \left( \frac{\partial r_b}{\partial s} \right)^i \right] \left( w_s^{i+1,\tilde{j}} \right)^2 - \\
& - \left( \frac{\psi^{i+1,\tilde{j}} + w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i-1,\tilde{j}}}{2RT_r^{i,\tilde{j}}} \right)^2 \frac{\left( w_s^{i+1,\tilde{j}} + w_s^{i-1,\tilde{j}} \right)^3 k_8}{32G_r^{\tilde{j}}} \Delta \tilde{z} \left( \frac{2G_r^{\tilde{j}}}{\mu^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right)^{k_9} - \\
& - \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} + w_s^{i-1,\tilde{j}}}{2} \right) \left( \frac{w_s^{i+1,\tilde{j}} - w_s^{i-1,\tilde{j}}}{2\Delta s} \right) \frac{\left( \psi^{i+1,\tilde{j}} + w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i-1,\tilde{j}} \right) w_s^{i+1,\tilde{j}}}{2RT_r^{i,\tilde{j}}} - \\
& - \mu^{i+1,\tilde{j}} \frac{\left( w_s^{i+1,\tilde{j}} + w_s^{i-1,\tilde{j}} \right)}{2 \left( r_b^i \right)^2} \left( w_s^{i+1,\tilde{j}} \right)^2 - \frac{\left( \psi^{i+1,\tilde{j}} - w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i-1,\tilde{j}} \right) w_s^{i+1,\tilde{j}}}{2\Delta s} = 0. \quad (22)
\end{aligned}$$

Функция  $\psi^{i+1,\tilde{j}}$  характеризуется теплофизическими параметрами, определяющими требуемые условия теплоотвода согласно соотношениям:

$$\psi^{i+1,\tilde{j}} = \begin{cases} \psi_1^{i+1,\tilde{j}}, & \text{при } \left( \frac{\psi_1^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z} \Delta s (i+1)}{2G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}} \right) < k_7 \\ \psi_2^{i+1,\tilde{j}}, & \text{при } \left( \frac{\psi_2^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z} \Delta s (i+1)}{2G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}} \right) \geq k_7 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
\psi_1^{i+1,\tilde{j}} = & \left[ \left( \frac{2G_r^{\tilde{j}}}{\mu^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu^{i+1,\tilde{j}} c_p}{\lambda_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_3} \left( \frac{T_b^{i+1,\tilde{j}}}{T_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_4} \left[ \frac{2}{\Delta s (i+1)} \right]^{k_6} \right. \\
& \left. \cdot \left( \frac{k_1 k_5 \lambda_r^{i+1,\tilde{j}}}{2\alpha_r^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{1/(k_6-1)} \left( \frac{G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}}{\Delta \tilde{z}} \right) \right], \quad (24)
\end{aligned}$$

$$\psi_2^{i+1,\tilde{j}} = \left( \frac{2\alpha_r^{i+1,\tilde{j}} G_r^{\tilde{j}} RT_r^{i+1,\tilde{j}}}{k_1 \lambda_r^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}} \right) \left( \frac{\mu^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}}{2G_r^{\tilde{j}}} \right)^{k_2} \left( \frac{\lambda_r^{i+1,\tilde{j}}}{\mu^{i+1,\tilde{j}} c_p} \right)^{k_3} \left( \frac{T_r^{i+1,\tilde{j}}}{T_b^{i+1,\tilde{j}}} \right)^{k_4}. \quad (25)$$

Численный расчет скорости потока  $w_s^{i+1,\tilde{j}}$  на каждом шаге  $s_{i+1}$  расчетной сетки проводится в последовательных приближениях с

последующим определением давления  $p^{i+1,\tilde{j}}$  в текущем узле

$$p^{i+1,\tilde{j}} = \psi^{i+1,\tilde{j}} \left( w_s^{i+1,\tilde{j}} \right)^{-1}. \quad (26)$$

Из условия постоянства массового расхода определяется изменение ширины поперечного сечения каналов теплоотвода по численно определенным полям скоростей и давлений, при которых реализуется требуемый отвод тепла:

$$\delta_r^{i+1,\tilde{j}} = \frac{G_r^{\tilde{j}} R T_r^{i+1,\tilde{j}}}{w_s^{i+1,\tilde{j}} p^{i+1,\tilde{j}} \Delta \tilde{z}}. \quad (27)$$

**В четвертой главе** на основании соотношений (14) – (27) построены пошаговые алгоритмы численного расчета параметров теплоотвода, обеспечивающих равнопрочное состояние элементов и минимальный массовый расход охладителя, а также представлена схема комплексного решения задачи отвода тепла.

**В пятой главе** отражены результаты численного исследования теплоотвода для однослойных оболочковых элементов и оболочек с теплозащитным слоем, проведена оценка изменения теплофизических характеристик для различных каналов теплоотвода оболочки, проведена оценка течения теплообменного процесса для наиболее опасной области оболочкового элемента при различных временных условиях нагружения.

На рисунке 2 представлено температурное поле  $T_a$  на наиболее термонагруженной поверхности оболочкового элемента, при котором выполняется условие 100-часовой прочности. Верхние слои элемента менее нагружены, соответственно в данной области достигаются максимальные температурные значения. Неравномерность температурной конфигурации обусловлена неравномерностью теплоподвода и напряженного состояния. На рисунке 3 изображено распределение требуемых коэффициентов теплоотдачи, обеспечивающих необходимый отвод тепла на граничной поверхности оболочки при 100-часовой работе. На рисунке 4 показано, как изменяется температура охладителя в каналах теплоотвода оболочки при  $\tau = 100$  часов. На рисунке 5 представлено изменение скорости потока охладителя в каналах охлаждения, удовлетворяющее требуемому изменению параметров теплоотвода при 100-часовой работе. На рисунке 6 представлено изменение минимального массового расхода хладагента в каналах охлаждения при реализации максимального температурного потенциала элементов при различном времени работы. Изменение геометрических характеристик каналов теплоотвода, обеспечивающих реализацию равнопрочного состояния элемента и минимизацию массового расхода хладагента при  $\tau = 100$  часов, удовлетворяет расчетным данным на рисунке 7.



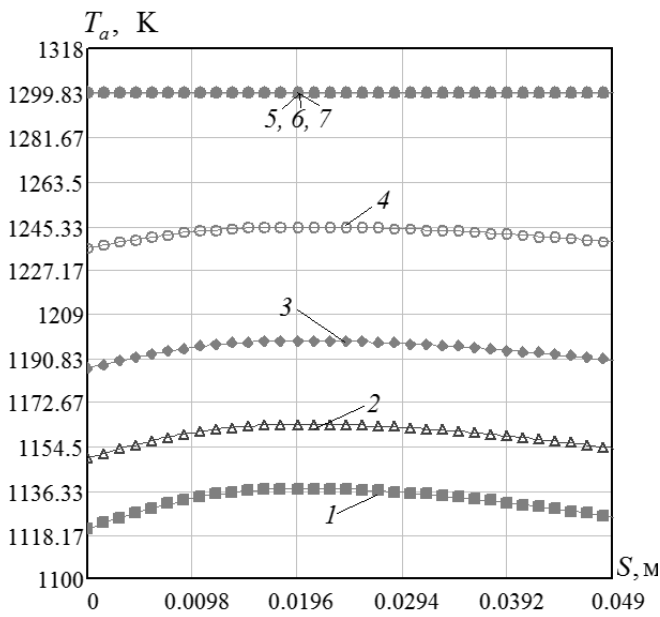


Рис. 2 — Изменение температуры на наиболее термонагруженной поверхности оболочкового элемента

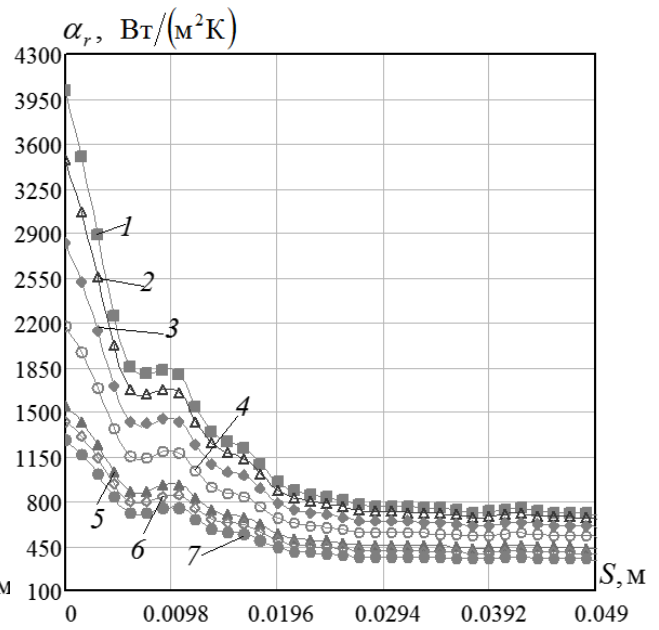


Рис. 3 — Изменение теплоотдачи охлаждающего газового потока в каналах теплоотвода оболочки

1 -  $z_0 = 0.0016$  м, 2 -  $z_5 = 0.018$  м, 3 -  $z_{10} = 0.034$  м, 4 -  $z_{15} = 0.05$  м,  
5 -  $z_{20} = 0.066$  м, 6 -  $z_{25} = 0.082$  м, 7 -  $z_{30} = 0.098$  м

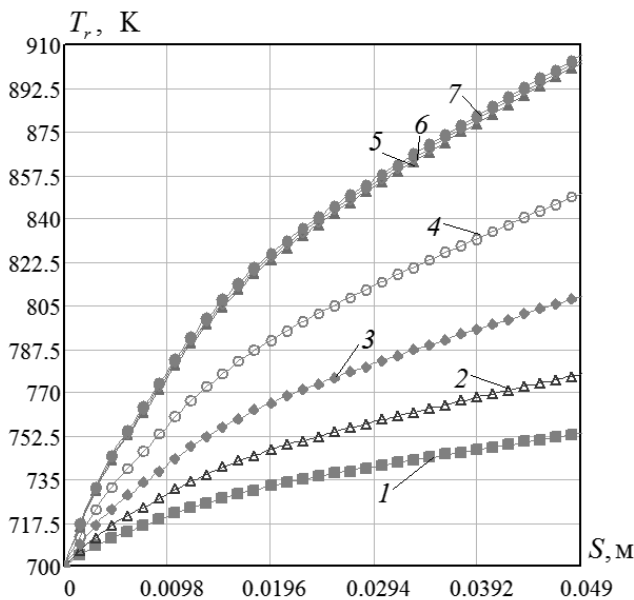


Рис. 4 — Изменение температуры охладителя в каналах теплоотвода

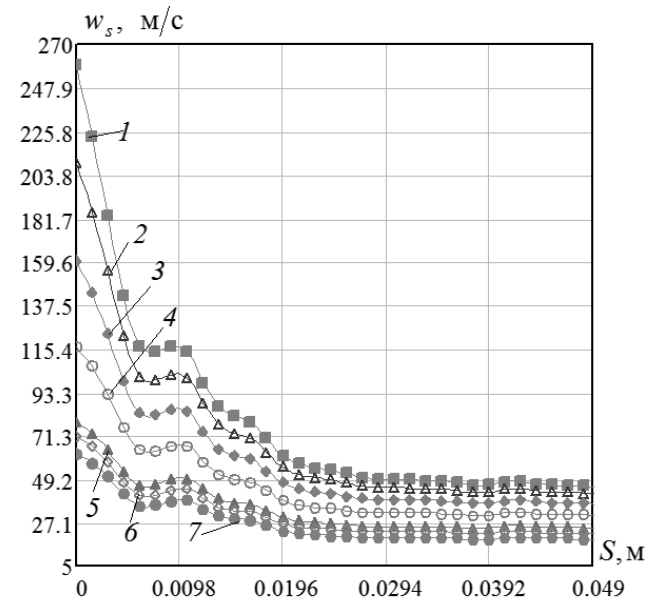


Рис. 5 — Изменение скорости течения хладагента в каналах

1 -  $z_0 = 0.0016$  м, 2 -  $z_5 = 0.018$  м, 3 -  $z_{10} = 0.034$  м, 4 -  $z_{15} = 0.05$  м,  
5 -  $z_{20} = 0.066$  м, 6 -  $z_{25} = 0.082$  м, 7 -  $z_{30} = 0.098$  м

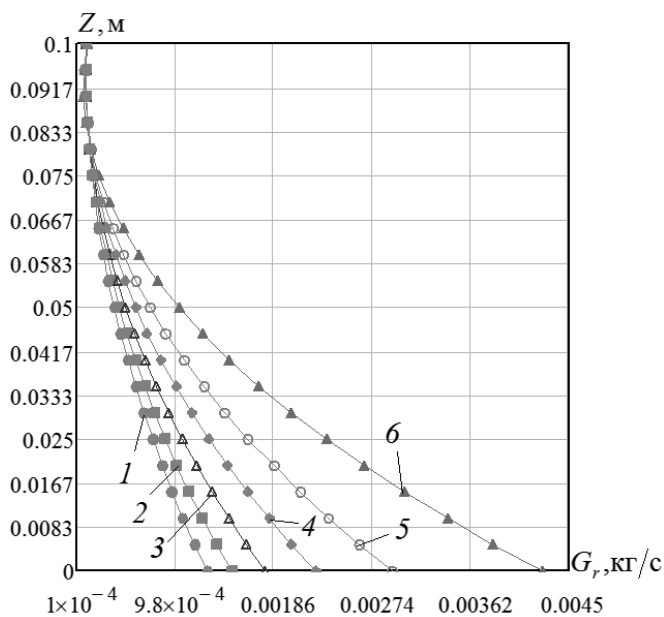


Рис. 6 — Изменение массового расхода по высоте оболочкового элемента при

1 —  $\tau_1 = 100$  часов, 2 —  $\tau_2 = 200$  часов,  
3 —  $\tau_3 = 400$  часов, 4 —  $\tau_4 = 600$  часов,  
5 —  $\tau_5 = 800$  часов, 6 —  $\tau_6 = 1000$  часов

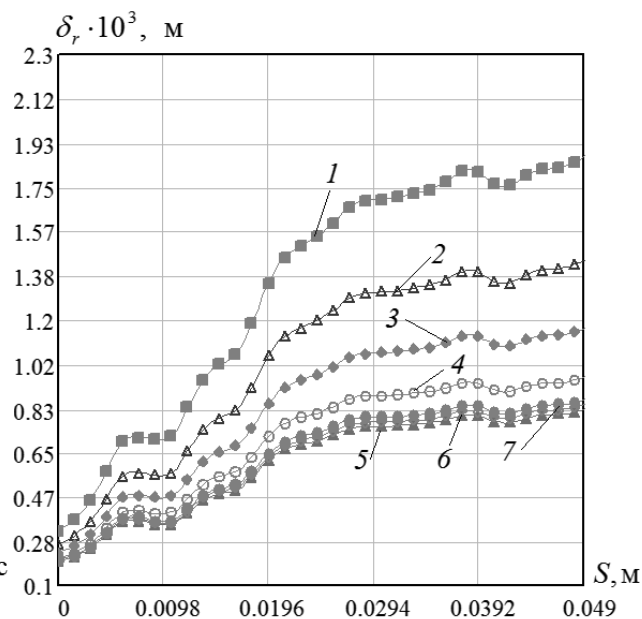


Рис. 7 — Изменение ширины сечения каналов теплоотвода. 1 —  $z_0 = 0.0016$  м, 2 —  $z_5 = 0.018$  м, 3 —  $z_{10} = 0.034$  м, 4 —  $z_{15} = 0.05$  м, 5 —  $z_{20} = 0.066$  м, 6 —  $z_{25} = 0.082$  м, 7 —  $z_{30} = 0.098$  м

В **заклучении** сформулированы основные результаты проведенного диссертационного исследования, позволяющие повысить эффективность работы системы охлаждения оболочковых элементов турбомашин:

1. Проведено математическое моделирование процесса теплоотвода с учетом особенностей действия силовых и тепловых факторов, временных условий работы оболочковых элементов. Математическая модель позволяет определить геометрические параметры каналов теплоотвода, при которых обеспечиваются равнопрочное состояние на наиболее термонагруженной поверхности оболочки и минимальный массовый расход охладителя.
2. Разработан численный метод расчета процессов отвода тепла на основании полученных закономерностей, связывающих параметры теплоотвода и охлаждения, температурное условие, удовлетворяющее критерию длительной прочности. На основании построенных нелинейных разностных схем проведено численное моделирование процессов теплоотдачи в каналах охлаждения элементов, кинематической картины течения охладителя при переменной геометрии каналов теплоотвода, обеспечивающей требуемый теплоотвод в зависимости от прочностного условия.
3. Созданы алгоритмы и программный комплекс в математическом пакете MathCad, реализующие численную методику расчета

параметров теплоотвода, определения геометрических и кинематических параметров работы систем охлаждения в оболочковых элементах турбомашин.

4. Проведена апробация численных процедур для расчета процессов отвода тепла в однослойных оболочковых элементах, оболочках с теплозащитным слоем. Проведено сравнение результатов расчета при различных зависимостях предела длительной прочности от времени работы элемента. По результатам расчетов представлен анализ условий теплоотвода и получено требуемое изменение ширины поперечного сечения каналов охлаждения, при котором обеспечивается минимальный массовый расход охладителя и выполняется условие равнопрочности.

## **ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Андрианов, И. К. Параметрическая идентификация математической модели теплообменного процесса для тонкостенных криволинейных оболочек турбомашин / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 2(10). – С. 24-38.
2. Андрианов, И. К. Математическое моделирование геометрии каналов теплоотвода оболочковых элементов турбомашин, удовлетворяющей требуемому тепловому состоянию / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. – 2016. – № 2(37). – С. 85-89.
3. Андрианов, И. К. Численный метод расчета теплоотдачи для требуемого температурного поля на поверхности контакта лопатки и теплозащитного покрытия при поперечной схеме охлаждения / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: «Физика-математика». – 2015. – №2. – С. 34-43.
4. Гринкруг, М. С. Численный подход к расчету параметров охлаждающего потока в каналах оболочковых элементов турбомашин для заданных условий на поверхности теплоотвода / М. С. Гринкруг, И. К. Андрианов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Том 8. – №1; URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/25TVN116.pdf> (дата обращения: 18.02.2016)

### **Публикации в прочих изданиях:**

5. Андрианов, И. К. Математическое моделирование обратной граничной задачи теплообмена для оболочковых элементов турбомашин / И. К. Андрианов // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2015): Материалы XIV междунар. конф. имени А. Ф. Терпугова, Томск, 18-22 ноября 2015 г. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2015. – Ч.2. – С. 18-21.
6. Андрианов, И. К. Численный метод восстановления параметров теплообменного процесса, обеспечивающих требуемое тепловое состояние в оболочковых лопатках турбомашин / И. К. Андрианов // Молодые ученые – Хабаровскому краю. Материалы XVIII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 19-22 января 2016 г. – Хабаровск: Принт-2, 2016. – С. 297-303.
7. Андрианов, И. К. Результаты численного моделирования теплоотвода в оболочковых элементах авиационных турбин в зависимости от времени работы / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Математическое моделирование в естественных науках: материалы XXV Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов. – Пермь: ПНИПУ, 2016. – С. 22-25.
8. Гринкруг, М. С. Управление параметрами теплоотвода, обеспечивающими равнопрочное напряженное состояние оболочковых элементов турбомашин / М. С. Гринкруг, И. К. Андрианов // Материалы XX международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 9-12 ноября 2016 г. – Красноярск: СИБГАУ, 2016. – Ч.1. – С. 225-227.
9. Андрианов, И. К. Разработка программного комплекса для обеспечения оптимальной тепловой защиты оболочковых элементов авиационных газотурбинных двигателей / И. К. Андрианов // Тезисы 15-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016», Москва, 14-18 ноября 2016 г. – М.: МАИ, 2016. – С. 486-488.
10. Андрианов, И. К. Численное моделирование равномерных температурных полей в оболочковых элементах газотурбинного двигателя / И. К. Андрианов // Итоги диссертационных исследований: материалы VII Всероссийского конкурса молодых ученых, посвященного 70-летию Победы, Миасс, 13-15 октября 2015 г. – М.: РАН, 2015. – Т. 1. – С. 3-11.
11. Андрианов, И. К. Численный метод расчета кинематической картины течения, обеспечивающего неравномерный теплоотвод в каналах охлаждения оболочковых элементов турбомашин / И. К. Андрианов //

«Аспекты оперативного управления в технических системах»: сб. научн. трудов межд. конф., 02 сентября 2016. – М.:Перо, 2016. – С. 37-40.

12. Гринкруг, М. С. Патентный обзор зарубежных систем и способов охлаждения элементов газотурбинного двигателя / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // «Nauka dzis: teoria, metodologia, praktyka, problematyka»: сб. науч. докл. междунар. науч.-практ. конф., Сопот, 30-31 июля 2014 г. – Варшава: «Diamond trading tour», 2014. – Ч.7. – С. 37-38.
13. Андрианов, И. К. Линейная аппроксимация коэффициентов теплопроводности многослойных теплозащитных покрытий для лопаток газотурбинного двигателя / И. К. Андрианов // Концепт. – 2015. – Современные научные исследования. Выпуск 3. – ART 85504. – URL: <http://e-koncept.ru/2015/85504.htm>. – ISSN 2304-120X (дата обращения: 18.02.2016).
14. Андрианов, И. К. Анализ теплоизоляционных покрытий для лопаток газотурбинного двигателя / И.К. Андрианов // «Science and civilization - 2015»: материалы междунар. науч.-практ. конф., Шеффилд, 30.01.2015 – 07.02.2015. – Лондон: «Science and education LTD», 2015 – Ч. 25. – С. 48-50.

#### **Свидетельства о регистрации программ:**

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660802. Программа для расчета температурных полей на граничных поверхностях оболочковых элементов на основании требуемой температурной конфигурации, удовлетворяющей условию длительной прочности / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг (RU) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КнАГТУ»; заявл. 27.07.2016; зарегистр. 21.09.2016.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660802. Программа для расчета параметров теплоотвода в каналах охлаждения оболочковых элементов турбомашин, обеспечивающих требуемое тепловое состояние элементов / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг (RU) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КнАГТУ»; заявл. 27.07.2016; зарегистр. 21.09.2016.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660980. Программа для расчета геометрических характеристик каналов охлаждения оболочковых элементов турбомашин, обеспечивающих требуемые условия теплоотвода / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг (RU) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КнАГТУ»; заявл. 27.07.2016; зарегистр. 27.09.2016.