

На правах рукописи



Андросович Ирина Вячеславовна

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ГАЗОТУРБИННОГО
ДВИГАТЕЛЯ

Специальность 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре ТПЭДЛА «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Силуянова Марина Владимировна**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Евдокимов Алексей Иннокентьевич**, доктор технических наук, профессор, Военно-воздушная инженерная академия имени профессора Н.Е. Жуковского, почетный профессор; АО «ОДК» «НИИД», главный специалист филиала.

Бадамшин Ильдар Хайдарович, доктор технических наук, доцент, «Уфимский университет науки и технологии» (г. Уфа), профессор кафедры «Авиационные двигатели».

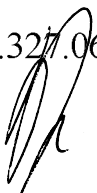
Ведущая организация: ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева

Защита диссертации состоится 18 декабря 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» _____.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06,
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: совершенствование параметров перспективных двигателей может быть достигнуто прежде всего за счёт существенного улучшения параметров узлов и их компонентов, например, за счёт уплотнений. Эффективность ГТД существенно зависит от утечек воздуха как в узлах двигателя, так и при отборе воздуха на различные нужды. Для снижения утечек воздуха используются различные типы как бесконтактных, так и контактных уплотнений такие как лабиринтные, сотовые, лунковые, щеточные, пальчиковые, листовые и др. Создание новых и модернизация существующих уплотнений является одной из важнейших задач для повышения КПД газотурбинных двигателей и силовых установок. Несмотря на активное развитие перспективных уплотнений, таких как щеточные, лабиринтные уплотнения также не теряют своей актуальности.

Ряд современных исследований посвящен не только расходным характеристикам уплотнений, но и их влиянию на роторную динамику за счет достаточно больших сил возникающих в зазорах уплотнений, тем не менее большинство исследований не рассматривает работу уплотнений в системе силовой установки. Помимо этого, ряд исследований рассматривает вопросы теплообмена в уплотнительных узлах, так как развитая поверхность и намеренная турбулизация течения в уплотнениях способствует интенсификации теплообмена между потоком газа и стенками уплотнения. Возможность учесть при моделировании силовой установки влияния уплотнительных узлов на расход воздуха, теплообмен между узлами и динамику силовой установки может способствовать более точному моделированию, как состояния газотурбинного двигателя на установившихся режимах работы, так и при переходных процессах.

В диссертационном исследовании разработана одномерная математическая модель бесконтактного уплотнения газотурбинного двигателя, учитывающая его расходную характеристику, работу как части механической системы и процессы теплообмена в уплотнении. Рассмотрена настройка и валидация математической модели бесконтактного уплотнения на примере лабиринтного уплотнения. Разработана методика выбора оптимальных параметров лабиринтного уплотнения, которая включает в себя алгоритм, одномерную математическую модель

лабиринтного уплотнения и постановку задачи оптимизации с ограничениями. Приведен пример решения задачи выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтного уплотнения.

Степень разработанности темы исследования: активное развитие вычислительных мощностей и программных комплексов привело к развитию методик математического моделирования до уровня, позволяющего как детально моделировать работу узлов газотурбинных двигателей в трехмерной постановке, так и динамические процессы в газотурбинных двигателях в одномерной постановке. Тем не менее математические модели и методики, предназначенные для моделирования динамических процессов в узлах, не имеющих такого существенного влияния на параметры газотурбинных двигателей как лопаточные машины или камера сгорания остаются слабо изученными.

Цель работы - разработка методики выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Исследовать актуальное состояние проблемы математического моделирования и выбора конструктивных параметров лабиринтных уплотнений ГТД;
2. разработать методику выбора оптимальных параметров уплотнения в системе газотурбинного двигателя;
3. разработать математическую модель процесса функционирования лабиринтных уплотнений в одномерной постановке, для моделирования работы лабиринтных уплотнений как части системы газотурбинного двигателя с учетом механического взаимодействия и теплообмена между потоком газа, ротором и статором;
4. определить требования и рекомендации для численного моделирования рабочих процессов в лабиринтных уплотнениях и определения эмпирических коэффициентов математической модели лабиринтного уплотнения в условиях отсутствия экспериментальных данных с применением метода конечных элементов;
5. сформулировать постановку задачи оптимизации лабиринтного уплотнения;

6. найти оптимальные параметры лабиринтного уплотнения по разработанной методике.

Вклад автора в проведенное исследование: основные положения диссертации получены автором лично, либо при его непосредственном участии, что подтверждено публикациями и докладами на научно-технических конференциях. В процессе выполнения диссертации соискатель самостоятельно выполнил следующие виды научно-исследовательских работ:

1. Обзор источников по теме исследования;
2. разработку методики выбора оптимальных параметров лабиринтного уплотнения;
3. разработку комплекса математических моделей, описывающих рабочие процессы в лабиринтных уплотнениях;
4. постановку задачи оптимизации лабиринтного уплотнения;
5. валидацию математических моделей;
6. определение оптимальных параметров лабиринтного уплотнения по разработанной методике.

Новизна результатов исследований

1. Разработана одномерная математическая модель бесконтактных уплотнений, учитывающая динамические характеристики уплотнения, процессы теплообмена, а также механическое взаимодействие ротора и статора с потоком газа;
2. разработана методика выбора оптимальных параметров и поставлена задача оптимизации лабиринтных уплотнений в системе газотурбинного двигателя;
3. определены требования и рекомендации для численного моделирования рабочих процессов в лабиринтных уплотнениях и определения эмпирических коэффициентов одномерной математической модели лабиринтного уплотнения с применением метода конечных элементов;
4. выполнено параметрическое исследование лабиринтного уплотнения, проведена валидация математической модели путем сравнения результатов математического моделирования с опубликованными данными;

5. с использованием разработанной методики решена задача оптимизации геометрии лабиринтного уплотнения, определены геометрические параметры оптимального лабиринтного уплотнения в соответствии с поставленной задачей оптимизации.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований

1. Разработанная методика позволяет выполнить проектирование высокоэффективного лабиринтного уплотнения с учетом его работы как части системы двигателя.

2. Разработанная математическая модель позволяет: повысить точность моделирования динамических процессов в роторных системах газотурбинных двигателей с учетом работы уплотнительных узлов; повысить точность моделирования теплового состояния газотурбинного двигателя и термогазодинамических процессов в тракте газотурбинного двигателя; учесть взаимное влияние вышеперечисленных процессов.

Методология и методы диссертационного исследования

В основе разработанной методики лежат:

1. Метод связанных графов и физические законы сохранения массы, энергии и импульса;
2. метод конечных элементов с использованием высокопроизводительных программных средств;
3. математические модели прочности и тепломассообмена;
4. современные методы оптимизации.

Положения, выносимые на защиту

1. Одномерная математическая модель бесконтактных уплотнений, учитывающая динамические характеристики уплотнения, процессы теплообмена, а также механическое взаимодействие ротора и статора с потоком газа;
2. методика выбора оптимальных параметров геометрии уплотнения, учитывающая его работу как части системы двигателя;
3. постановка задачи оптимизации лабиринтного уплотнения;

4. результаты математического моделирования, валидации математических моделей, параметрического исследования и оптимизации лабиринтного уплотнения.

Достоверность полученных результатов научных положений и выводов диссертации обусловлена применением теоретически обоснованных методов, применением современного метода конечных элементов, проверкой выполнения законов сохранения и валидацией методик, которые показали высокую сходимость результатов расчетов с известными литературными источниками и опубликованными результатами численных и экспериментальных исследований. Результаты не противоречат опубликованным данным других авторов.

Реализация и внедрения результатов работы: методика выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей (ГТД), включающая математическую модель лабиринтных уплотнений, позволяющую учесть влияние уплотнения на тягу, расход топлива и приемистость ГТД в целом и в увязке с функциями систем управления была учтена при проведении экспериментально-поискового оценочного сравнительного моделирования эффективности работы силовых установок в составе изделий разработки ОКБ Сухого. Акт внедрения ПАО «ОАК» «ОКБ Сухого» № 1/451084/1027 от 27.03.2023.

Апробация работы: основные положения работы и отдельные ее части были представлены и обсуждались на 21 научно-технической конференции, из них 15 международных и 6 всероссийских:

- X международная заочная научно-практическая конференция "Наука в современном информационном обществе", Москва, 2016 г.;
- Межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», 2016 г., 2017 г.; 2022 г.;
- Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2015 г., 2017 г., 2018 г.;
- Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г.;
- XXI Научно-техническая Конференция молодых ученых и специалистов, Королёв, 2017 г.;

- V Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Образование. Логистика и инженерия – 2018», Рига, 2018 г.;
- XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Москва, 2018 г.;
- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, 2018 г., 2022 г.;
- IX Международный Аэрокосмический Конгресс IAC 18, Межд. фонд попечителей МГАТУ, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2018 г.;
- Международная молодёжная научная конференция XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых), КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, 2019 г.;
- I Международная молодёжная научная конференция «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование», МИСиС, Москва, 2020 г.
- Международная научно-техническая конференция. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», СГАУ им. С.П. Королева, Самара, 2021 г.

Публикации по теме диссертации: непосредственно по теме диссертационной работы основные результаты изложены в 21 публикациях, в том числе 5 в изданиях, включенных в перечень ВАК, из которых три зарубежные (в т.ч. две из них индексируемые в международной наукометрической базе «Scopus»).

Структура и объём диссертации: диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, включает в себя 64 рисунка, 14 таблиц, а также список литературы, содержащий 92 наименования. Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе выполнен краткий аналитический обзор источников по теме диссертации. Рассмотрена классификация уплотнений и критерии выбора типа уплотнения, применяемые в России и в зарубежных странах (рисунок 1).

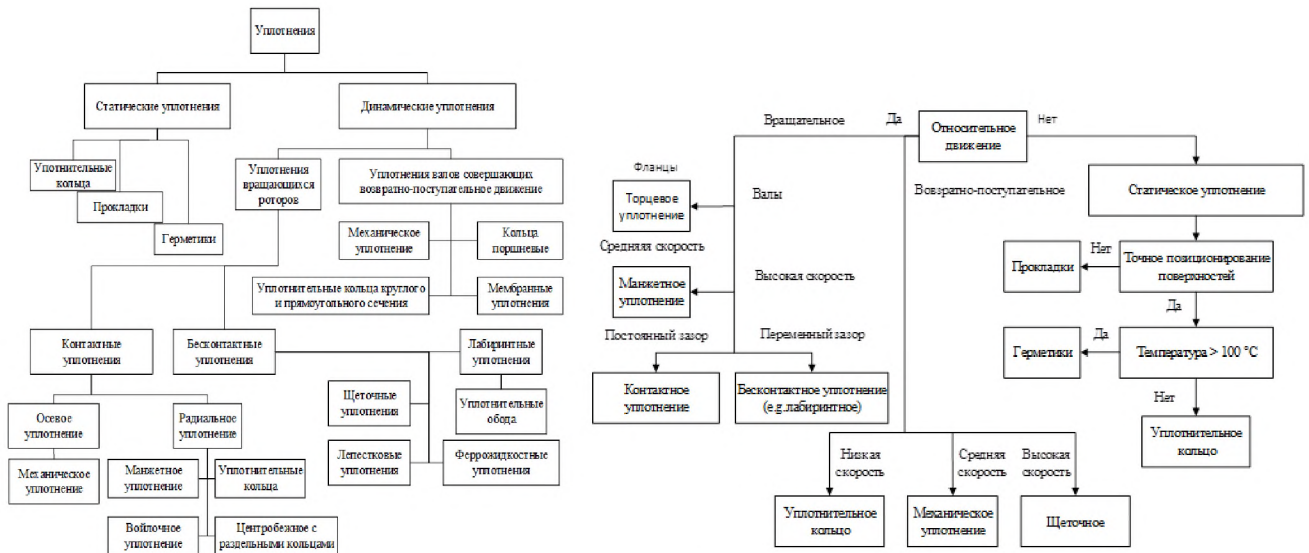


Рисунок 1 – Классификация и критерии выбора уплотнений в зарубежных странах

Выполнен обзор исследований по математическому моделированию и оптимизации бесконтактных уплотнений в России и мире, а также обзор существующих одномерных математических моделей бесконтактных уплотнений. Сделаны выводы о том, что во многих современных исследованиях бесконтактных и лабиринтных уплотнений применяются инструменты вычислительной гидродинамики. Ряд исследований посвящен влиянию уплотнений на роторную динамику и теплообмен в силовых установках.

По результатам проведенного анализа сформулированы задачи данного исследования и выбрана методика их решения. Сделан вывод о возможности разработки дифференциальной математической модели бесконтактных уплотнений, учитывающей влияние уплотнения на термогазодинамические процессы, тепловое состояние моделируемой системы и механическое взаимодействие потока газа с ротором.

Во второй главе рассмотрена методика выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинного двигателя, которая включает в себя алгоритм (рисунок 2), математическую модель лабиринтного уплотнения, для моделирования работы уплотнения совместно с двигателем и постановку задачи оптимизации с ограничениями, решить которую позволяет разработанная математическая модель.

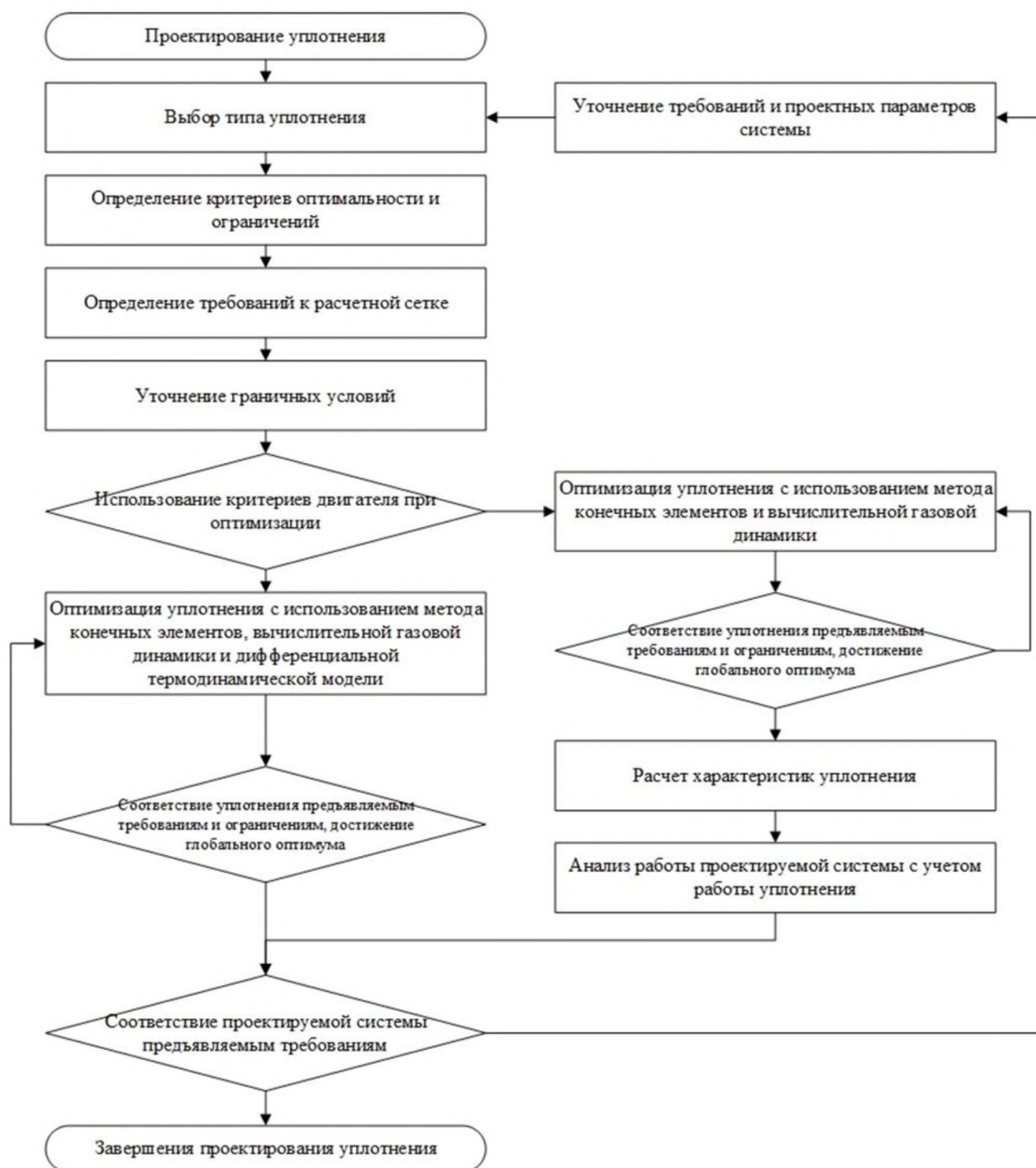


Рисунок 2. Алгоритм выбора оптимальных параметров лабиринтного уплотнения

В данной главе был проведен анализ корреляции математических моделей лабиринтных уплотнений, рассмотренных в обзоре, с результатами моделирования с использованием вычислительной гидрогазодинамики (CFD) на примере прямоточного лабиринтного уплотнения (рисунок 3).

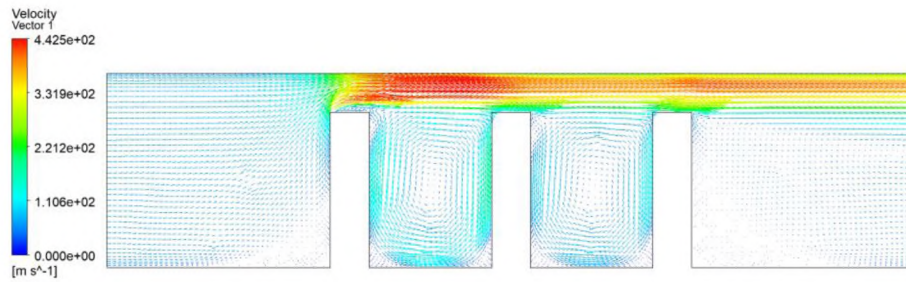


Рисунок 3 – Результаты моделирования прямоточного лабиринтного уплотнения

Определено, что наибольшим коэффициентом корреляции обладает модель Vennard J.K. и Street R.L. Результаты сравнения приведены в таблице 1. Данная модель была взята за основу при разработке модифицированной математической модели уплотнения.

Таблица 1 – Коэффициент корреляции математических моделей уплотнений

Математическая модель	Сумма среднеквадратичных отклонений	Коэффициент корреляции Пирсона с результатами CFD моделирования
Модель Martin H.	0,001244	0,99696
Модель Egli A.	0,001505	0,99696
Модель Dollin F. и Brown W.S.	0,000976	0,99696
Модель Hodkinson B.	0,003455	0,99696
Модель Vermes G.	0,044519	0,99696
Модель Vennard J.K. и Street R.L.	0,001367	0,99948
Модель John von Neumann/Чаплыгина и Гуревича	0,004829	0,99526
Модель Esser D. и Kazakia J.Y.	0,0037781	0,99905
Модель Kurohashi M.	0,0019229	0,99368

В выбранную математическую модель были введены: поправочный коэффициент расхода C_{im} ; дополнительные коэффициенты зависимости расхода от соотношения давлений μ_{ip} и частоты вращения μ_{iH} , а также учет критического соотношения давлений:

$$\dot{m}_l = \begin{cases} (1 - n\mu_{in}) \left(\frac{P_{iВХ}}{P_{iВЫХ}} \mu_{ip} + 1 \right) C_{im} A_i \frac{P_{iВХ}}{\sqrt{T_{iВХ}}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left(\left(\frac{P_{iВЫХ}}{P_{iВХ}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{iВЫХ}}{P_{iВХ}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} & \text{если } \frac{P_{iВХ}}{P_{iВЫХ}} < P_{кр} \\ (1 - n\mu_{in}) \left(\frac{P_{iВХ}}{P_{iВЫХ}} \mu_{ip} + 1 \right) C_{im} A_i \frac{P_{iВХ}}{\sqrt{T_{iВХ}}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}} & \text{если } \frac{P_{iВХ}}{P_{iВЫХ}} \geq P_{кр} \end{cases} \quad (1)$$

где \dot{m}_l – расход воздуха, кг/с; A – площадь сечения канала, м²; $P_{ВХ}$ – давление на входе, Па; $T_{ВХ}$ – температура на входе, К; $P_{ВЫХ}$ – давление на выходе, Па; R – газовая постоянная, Дж/кг/К; n – частота вращения, об/мин.

В результате коэффициент корреляции Пирсона для доработанной модели увеличился до 0,99991. Результаты сравнения доработанных математических моделей и модели Martin H. представлены на рисунке 4.

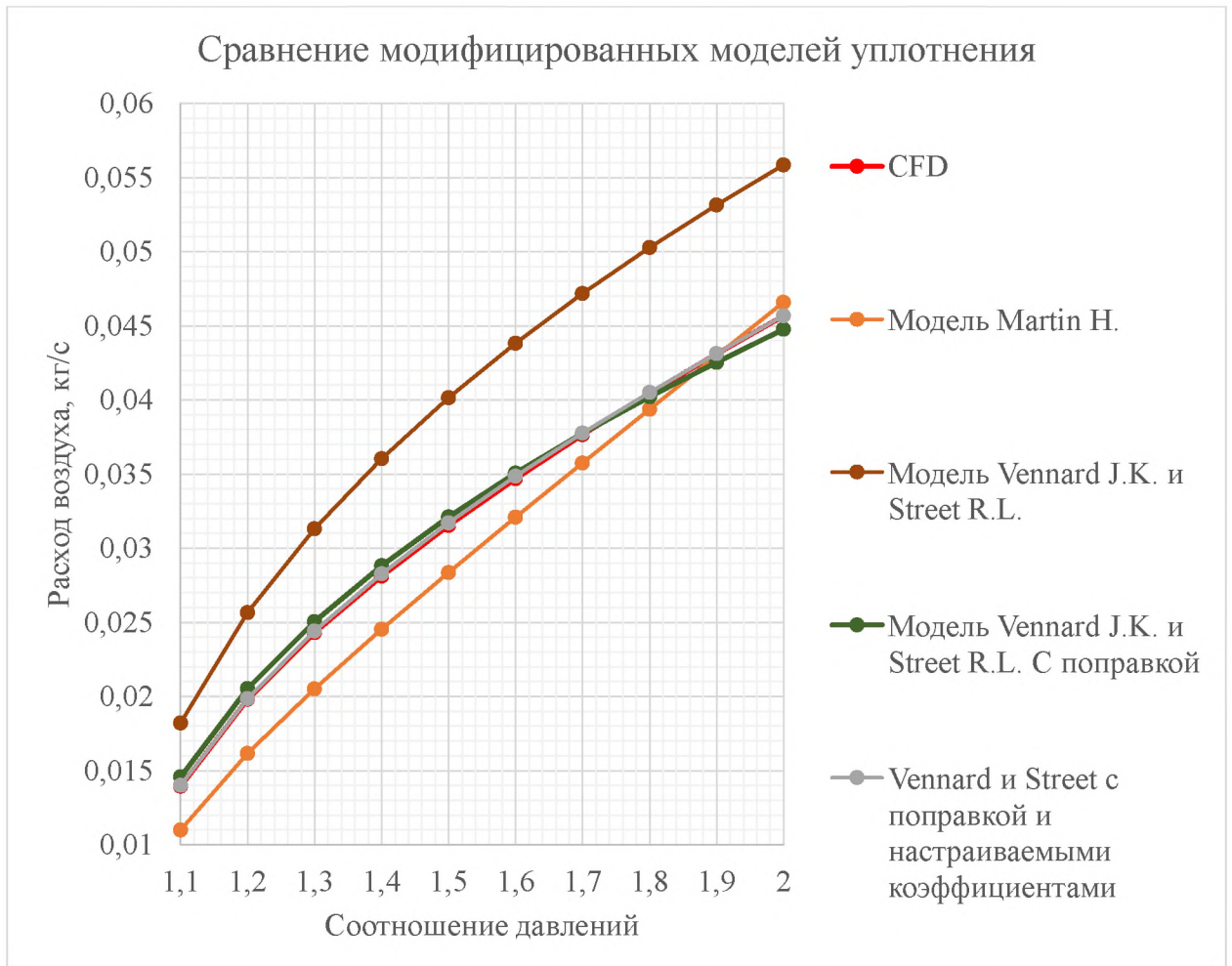


Рисунок 4. Сравнение математических моделей

Для учета механического взаимодействия потока газа с ротором было введено следующее уравнение, включающее в себя коэффициенты вязкого трения μ_{HM} и коэффициент, учитывающий возникновение крутящего момента из-за

сохранения количества движения при изменении окружной скорости потока газа μ_{IM} . Такая модель показала хорошее совпадение с результатами CFD (рисунок 5).

$$M = n\mu_{HM} + |\dot{m}|n\mu_{IM}, \quad (2)$$

где M – крутящий момент.

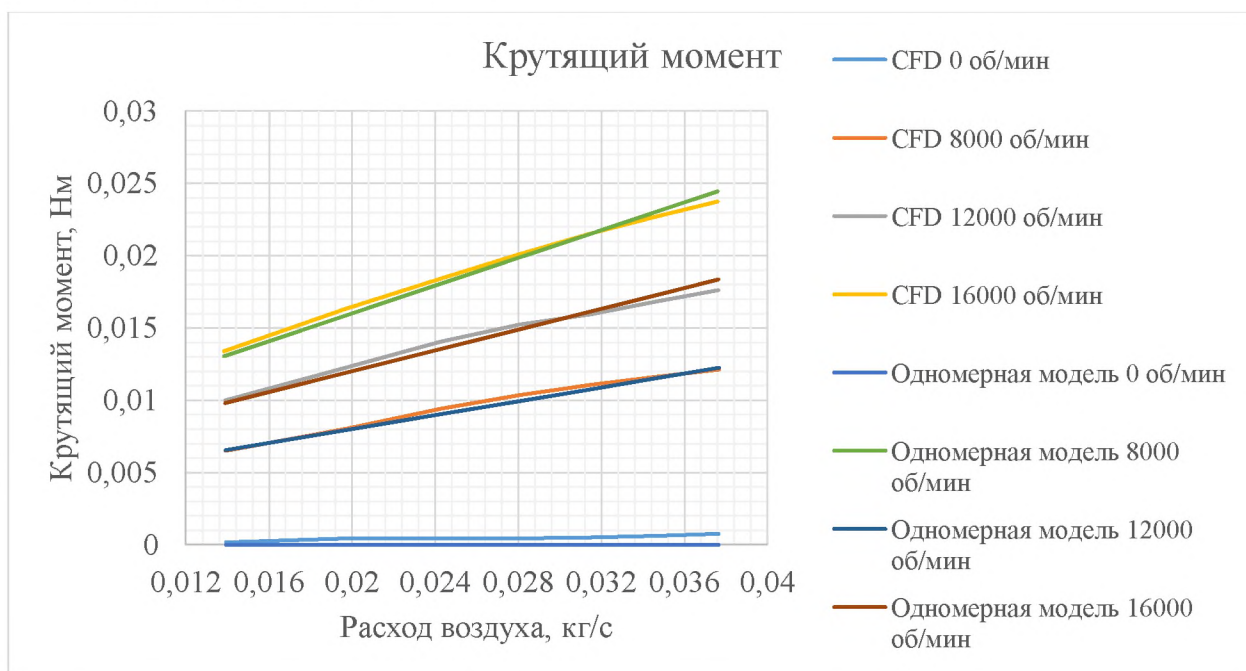


Рисунок 5 – Зависимость крутящего момента действующего со стороны уплотнения от частоты вращения и расхода воздуха через уплотнение

Теплообмен моделировался с использованием таблично заданных функций коэффициента теплоотдачи α между газом и ротором и газом, и статором.

$$\alpha = f\left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}, n\right), \quad (3)$$

Тепловой поток через стенку рассчитывался по тепловому напору

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A (T_{\text{ВХ}} - T_c), \quad (4)$$

где $\frac{dQ}{dt}$ – тепловой поток, Вт; T_c – температура стенки, К; A – площадь стенки, м².

Для корректного расчета теплового напора в уплотнении использовалась модель объема газа в уплотнении с изменяющейся внутренней энергией и уравнение состояния.

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{m}_i h_i + \sum \frac{dQ_i}{dt} + \omega M, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} V \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T & V \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \\ m \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - V & m \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dp}{dt} \\ \frac{dT}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \frac{dm_i}{dt} - \rho \frac{dV}{dt} \\ \sum \frac{dm_i}{dt} \cdot h_i - h \cdot \sum \frac{dm_i}{dt} + \delta Q \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$PV = rT, \quad (7)$$

где U – Внутренняя энергия газа, Дж; h – удельная энтальпия газа, Дж/кг; ω – частота вращения ротора, рад/с; V – объем уплотнения, м³; r – газовая постоянная, Дж/моль/К;

Для автоматического подбора коэффициентов в уравнении 1 использовался NLPQL алгоритм, определявший шаг изменения коэффициентов по направлению градиента среднеквадратичных отклонений.

$$\overrightarrow{\text{grad}} \left(\sum \left(\frac{\sum_0^n \dot{m}_{ncfd}}{n} - \dot{m}_n \right)^2 \right) (C_m, \mu_p, \mu_H) = \begin{pmatrix} \frac{\dot{m}_n(C_m, \mu_p, \mu_H) - \dot{m}_n(C_m + \delta C_m, \mu_p, \mu_H)}{\delta C_m} \\ \frac{\dot{m}_n(C_m, \mu_p, \mu_H) - \dot{m}_n(C_m, \mu_p + \delta \mu_p, \mu_H)}{\delta \mu_p} \\ \frac{\dot{m}_n(C_m, \mu_p, \mu_H) - \dot{m}_n(C_m, \mu_p, \mu_H + \delta \mu_H)}{\delta \mu_H} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Разработанная модель была протестирована при моделировании изменения направления течения газа при соотношении давлений 1,1 при температуре 600 К. Проведено сравнение расхода воздуха при различных соотношениях давлений с результатами CFD.

С учетом возможностей разработанной модели сформулирована постановка задачи оптимизации уплотнения.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A (T_{\text{вх}} - T_c), \quad (9)$$

$$(\vec{S}_i^*) \in \mathbb{S}: \dot{m}(\vec{S}_i^*) = \min_{(\vec{S}_i) \in \mathbb{S}} \{\dot{m}(\vec{S}_i)\}; s_{\text{п}} > s_{\text{пmin}}; \tau_{\text{min}} < \tau < \tau_{\text{max}}; T_{\text{сmin}} < T_c < T_{\text{сmax}} \quad (10)$$

где \mathbb{S} – множество лабиринтных уплотнений; \vec{S}_i – вектор конфигурации уплотнения; \vec{S}_i^* – вектор оптимальной конфигурации лабиринтного уплотнения; P_i – параметр лабиринтного уплотнения; $G_{\text{в}}$ – расход воздуха через лабиринтное уплотнение; $s_{\text{п}}$ – запас прочности; $s_{\text{пmin}}$ – минимальный запас прочности; τ – время раскрутки ротора; τ_{max} – максимальное время раскрутки ротора; T_c – температура стенки.

В третьей главе рассмотрены математические модели течения вязкого газа в уплотнении, модели турбулентности, теплообмена и модель механических характеристик для расчета запаса прочности. Выполнено параметрическое исследование, анализ механизма и степени влияния геометрических параметров лабиринтного уплотнения на расход воздуха (рисунок 6).

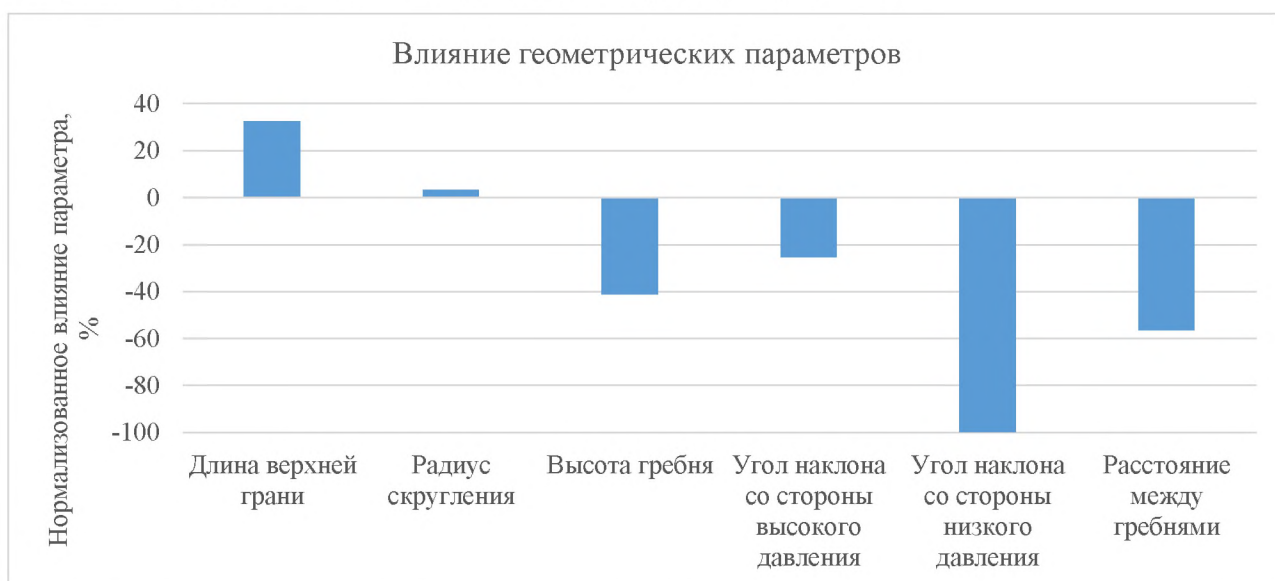


Рисунок 6 - Влияние геометрических параметров на расход воздуха через уплотнение

Выполнена верификация математической модели путем сравнения результатов CFD моделирования с опубликованной аппроксимацией экспериментальных данных (рисунки 7, 8), сравнением влияния зазора в лабиринтном уплотнении на расход воздуха по данным аналогичных исследований (рисунок 9) и выполнен качественный анализ характера влияния параметров, полученных по результатам CFD моделирования и опубликованных в рассмотренных источниках.

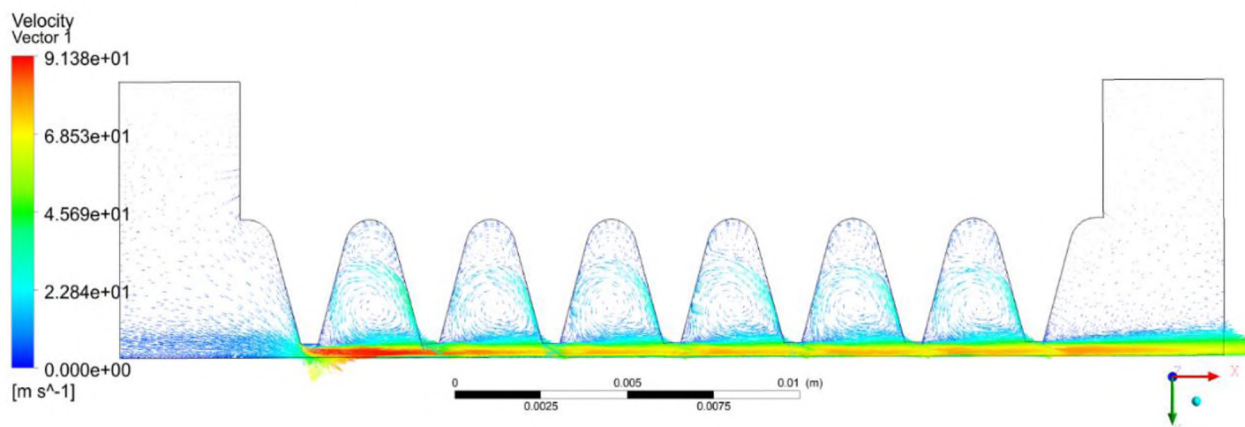


Рисунок 7 - Результаты моделирования лабиринтного уплотнения №1

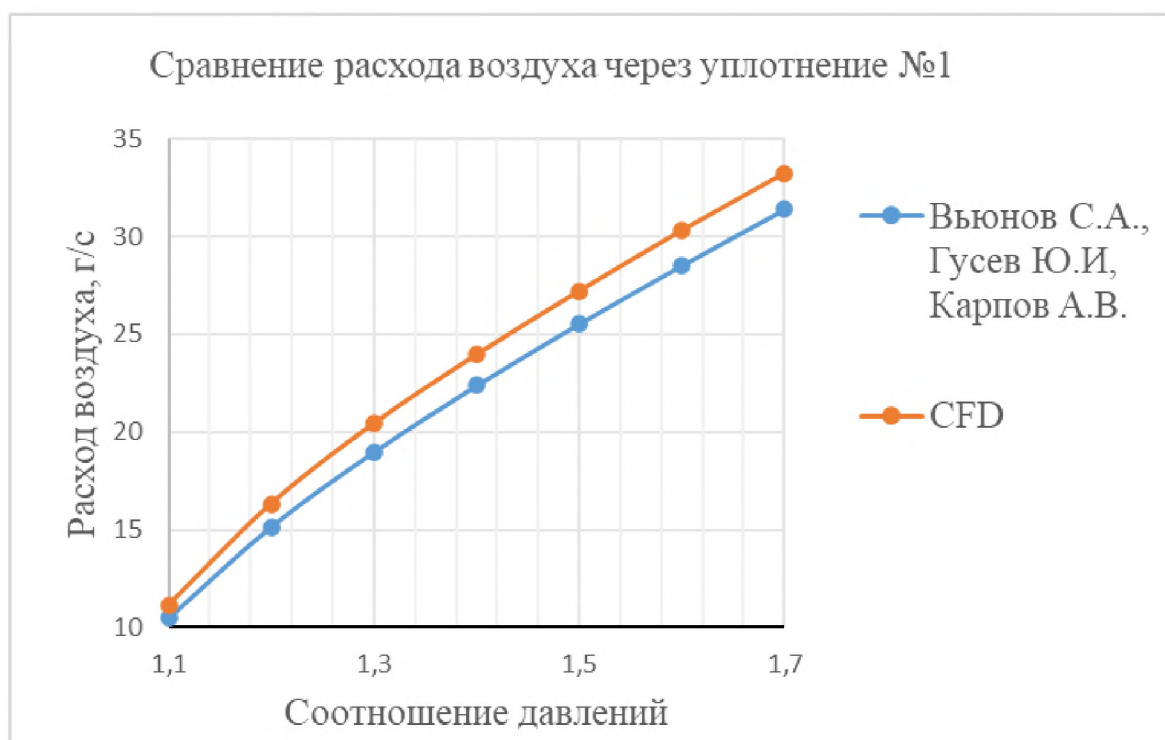


Рисунок 8 – Сравнение результатов CFD моделирования и аппроксимации экспериментальных данных

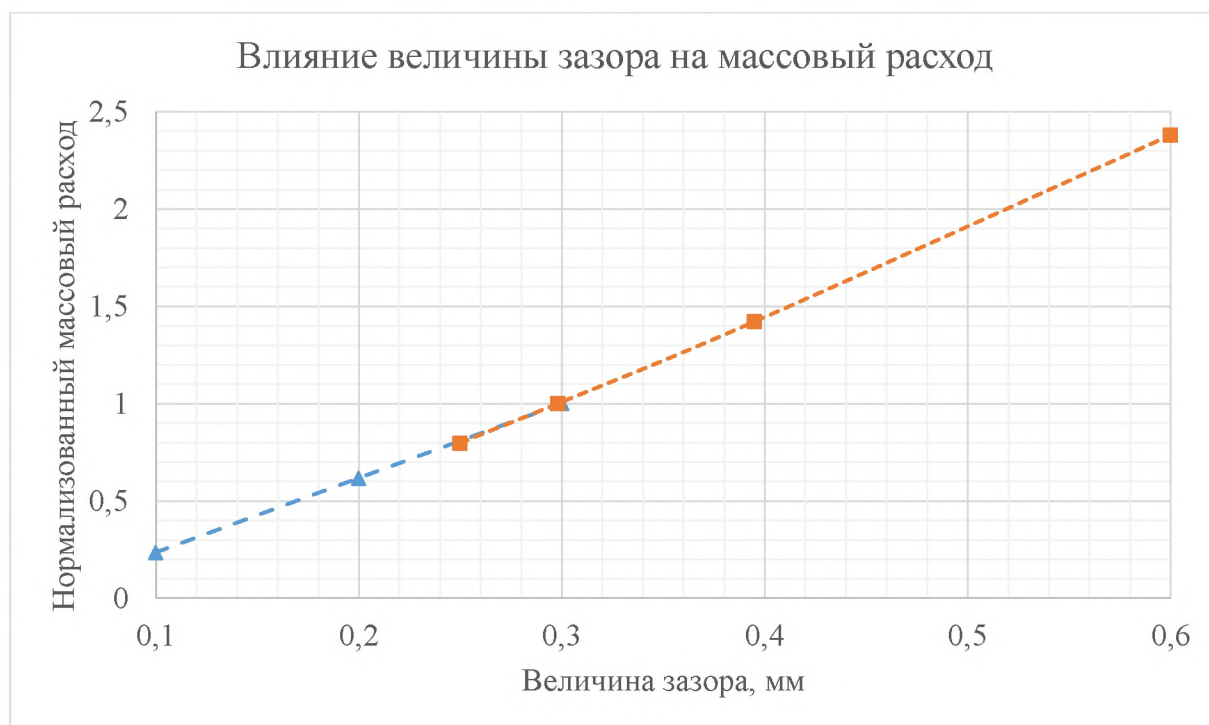


Рисунок 9 - Влияние величины зазора на массовый расход (оранжевый) по сравнению с данными аналогичных исследований (синий)

Результаты моделирования позволили сделать вывод, что все анализируемые параметры имеют два механизма уменьшения расхода через уплотнение. Первый — это диссипация энергии, а второй — уменьшение эффективной площади поперечного сечения в зазоре. Увеличение высоты гребня, углов наклона и длины уплотнения привели к увеличению интенсивности вихревых структур между гребнями и, как следствие, к увеличению диссипации энергии и снижению скорости потока в зазоре. Дополнительные гребни увеличивают общую диссипацию энергии в уплотнении. Размер зазора напрямую влияет на площадь поперечного сечения. Длина верхней грани влияет на оба механизма снижения расхода. Радиус скругления не влияет на расход в рассматриваемом примере.

В четвертой главе рассмотрено применение предлагаемой методики на примере уплотнения, представленного на рисунке 10. Разделы главы соответствуют этапам методики выбора оптимальных параметров уплотнения.

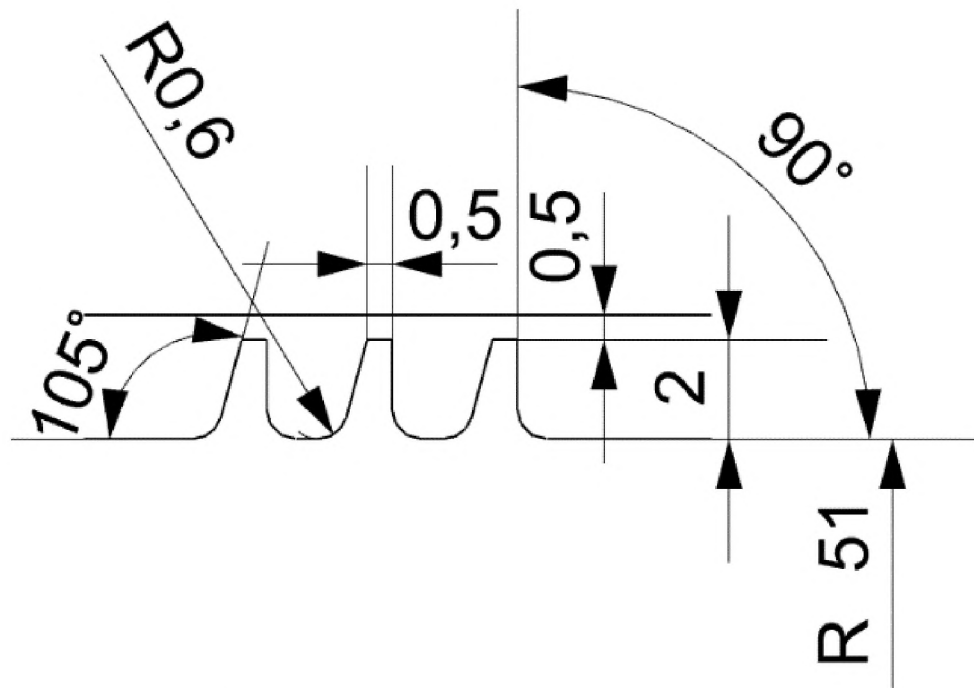


Рисунок 10 – Эскиз рассматриваемого лабиринтного уплотнения

В первом разделе приведен пример сравнения эффективности прямого, комбинированного и ступенчатого уплотнения имеющих одинаковые габаритные размеры с использованием вычислительной гидрогазодинамики.

Во втором разделе рассматриваются критерии оптимальности и ограничения варьируемых параметров уплотнения, основным ограничением на геометрические размеры являются габаритные размеры уплотнения, а также необходимость сохранения топологии геометрии уплотнения при решении задачи оптимизации при использовании метода конечных элементов и вычислительной гидрогазодинамики.

В третьем разделе приведен пример анализа результатов на сеточную независимость, выполнен анализ влияния размера элементов и параметров призматического подслоя на результаты математического моделирования. Сделаны выводы о необходимости обеспечения достаточного количества элементов сетки в зазоре уплотнения, ur_{plus} в диапазоне 1-10, коэффициент роста размера элементов сетки не более 1,25. Результаты анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследования на сеточную независимость результатов

Средний размер элемента, мм	Количество элементов	Относительное количество элементов	Расход воздуха, г/с	Относительный расход воздуха	Yplus max
0,1	88230	0,165908	9,81	1,008222	<50
0,06	205050	0,385577	9,89	1,016444	<50
0,05	280470	0,527398	9,91	1,018499	<50
0,04	417920	0,785859	9,97	1,024666	<50
0,07	221600	0,416698	9,58	0,984584	≈1
0,06	283680	0,533434	9,63	0,989723	≈1
0,05	370320	0,696352	9,59	0,985612	≈1
0,04	531800	1	9,73	1	≈1

В четвертом разделе выполнен анализ влияния различных граничных условий на результаты математического моделирования лабиринтного уплотнения. Результаты анализа показали, что использование окружной симметрии для сокращения времени расчета не влияет на результат расчета. При моделировании узких секторов условие вращающейся периодики приводит к возникновению ошибок для 3% моделируемых уплотнений (оценка проводилась для 200 вариантов геометрии уплотнения с ограниченными габаритными размерами и фиксированной величиной зазора), что не позволяет использовать это условие при оптимизации.

Был проведен анализ влияния частоты вращения на работу лабиринтного уплотнения, в том числе анализ выполнен повторно после завершения оптимизации уплотнения, результаты анализа показали, что частота вращения слабо влияет на качественную зависимость расхода воздуха через уплотнения, что позволяет использовать при оптимизации граничное условие стенки с проскальзыванием и не учитывать частоту вращения уплотнения. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Влияние частоты вращения на расход воздуха.

Частота вращения, об/мин	Суммарный массовый расход через уплотнение, г/с	
	Оптимизированное уплотнение, г/с	Неоптимизированное уплотнение, г/с
0	7,211	8,72
8000	7,24	8,62
12000	7,18	8,56
16000	7,04	8,46

Условие стенки с проскальзыванием показало существенно большую стабильность при проведении массивов расчетов. При моделировании массива из 300 вариантов уплотнения ошибки связанные с перестроением геометрии и граничными условиями возникли менее чем в 0,1% случаев.

В пятом разделе была сформулирована задача оптимизации для выбранного лабиринтного уплотнения.

$$\mathbb{S} = \{\vec{S}_i | 0.1 \leq P_1 \leq 0.6, 90 \leq P_2 \leq 140, 90 \leq P_3 \leq 140, 0.1 \leq P_4 \leq 0.8, 0.2 \leq P_5 \leq 1.6, 2 \leq P_6 \leq 4\}, \quad (11)$$

где P_1 – радиус скругления, мм; P_2 – угол наклона со стороны высокого давления, град; P_3 – угол наклона со стороны низкого давления, град; P_4 – ширина острия гребня; P_5 – расстояние между гребнями, P_6 – высота гребня, мм.

$$(\vec{S}_i^*) \in \mathbb{S}: \dot{m}(\vec{S}_i^*) = \min_{(\vec{S}_i) \in \mathbb{S}} \{\dot{m}(\vec{S}_i)\}; s_{\pi} > 1,3; \quad (12)$$

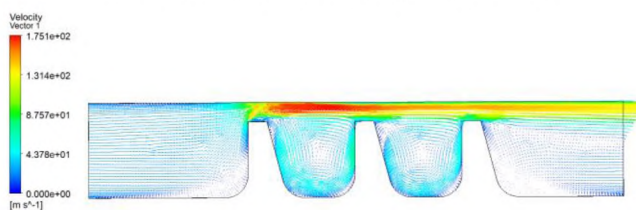
Задача была решена с использованием встроенного инструмента оптимизации (Direct optimization) программного комплекса Ansys с использованием адаптивной однокритериальной оптимизации (Adaptive single objective) параметров геометрии (таблица 4).

Таблица 4 – геометрические параметры до и после оптимизации

Параметр	Значение до оптимизации	Значение после оптимизации
Длина верхней грани, мм	0,5	0,1
Радиус скругления, мм	0,6	0,286
Высота гребня, мм	2	4
Размер зазора, мм	0,5	0,5
Угол наклона грани со стороны высокого давления, град	105	111,65
Угол наклона грани со стороны низкого давления, град	90	140
Расстояние между гребнями, мм	0,42	1,586
Количество гребней	3	3

Помимо расхода через уплотнение для вариантов, удовлетворяющих критериям оптимальности, выполнялась проверка выполнения ограничения по прочности с использованием поля давления и частоты вращения в качестве граничных условий. Результаты представлены на рисунках 11-13.

Не оптимизированное уплотнение



Оптимизированное уплотнение

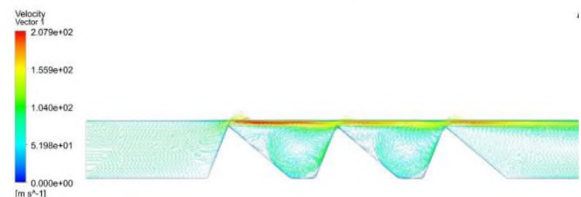


Рисунок 11 - Векторное поле скоростей

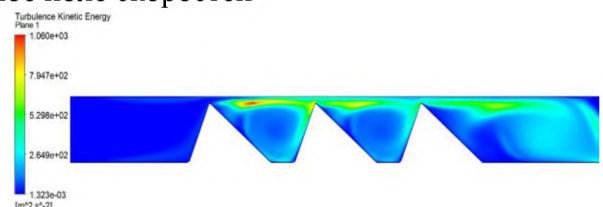
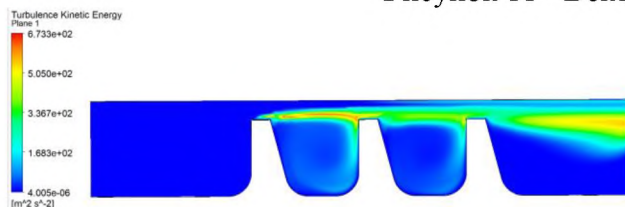


Рисунок 12 – Поле турбулентной кинетической энергии



Рисунок 13 – Эквивалентные напряжения по Мизесу

В результате оптимизации, в зависимости от режима работы, максимальное снижение расхода воздуха через уплотнение составило 28%, по сравнению с исходным уплотнением. Запас прочности уплотнения увеличился с 1,91 до 2,16. Основным механизмом снижения расхода при этом являлась более высокая

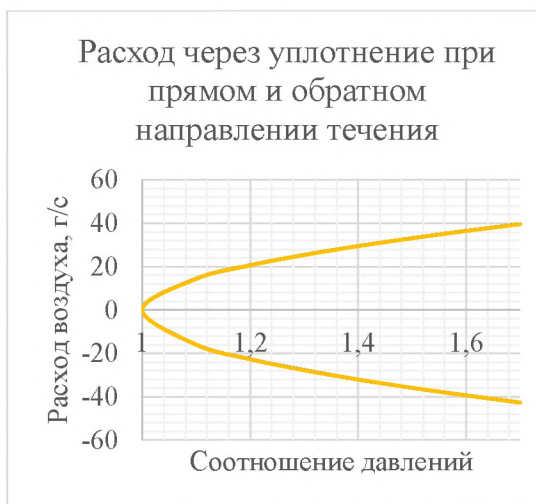
интенсивность вихревых структур в объеме уплотнения, что привело к увеличению интенсивности диссипации энергии и снижению полного давления (таблица 5).

Таблица 5 – влияние турбулентности на падение полного давления в уплотнении

Параметр	Значение до оптимизации	Значение после оптимизации
Осредненная по массе кинетическая энергия турбулентности в пространстве между гребнями, Дж/кг	125,198	209,033
Полное давление на входе, Па	111459	111460
Полное давление на выходе, Па	105866	102534

На шестом этапе выполнялся расчет характеристик уплотнений для настройки разработанной математической модели. Результаты представлены на рисунках 14 - 17.

Не оптимизированное уплотнение



Оптимизированное уплотнение

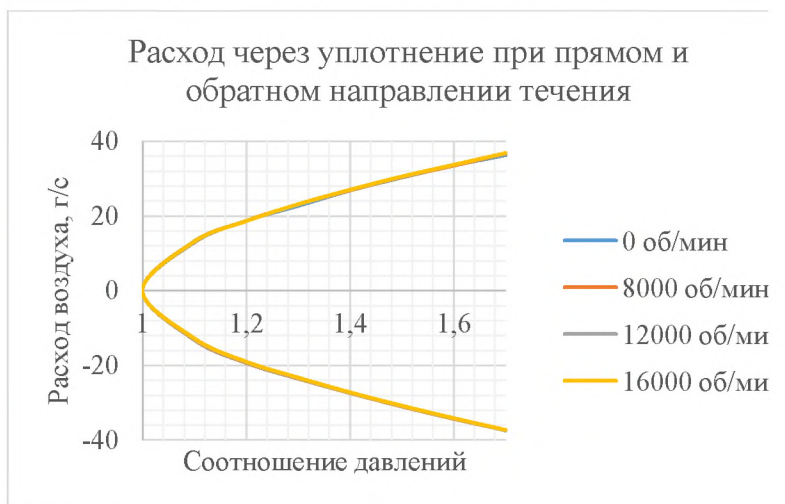


Рисунок 14 – Расход воздуха

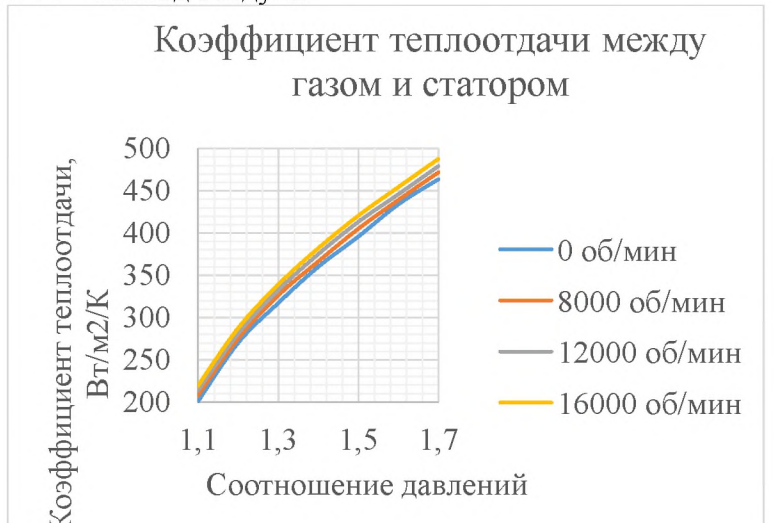
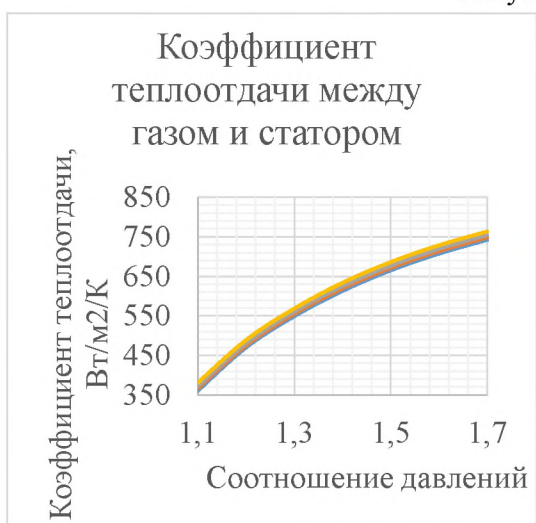


Рисунок 15 – Коэффициент теплоотдачи между газом и статором

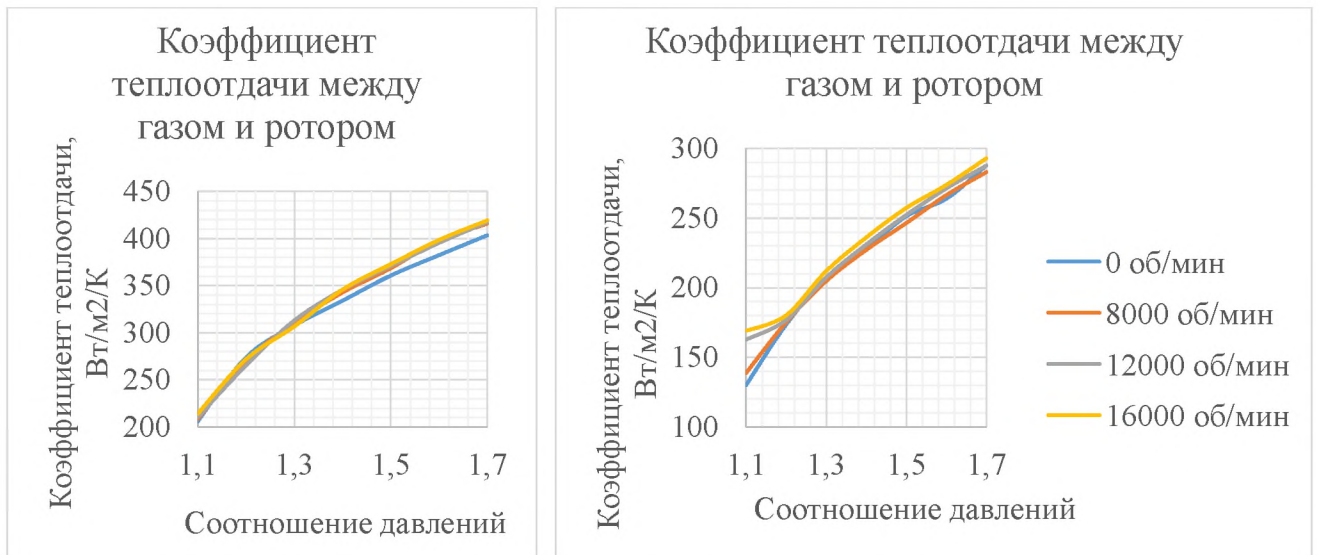


Рисунок 16 – Коэффициент теплоотдачи между газом и ротором

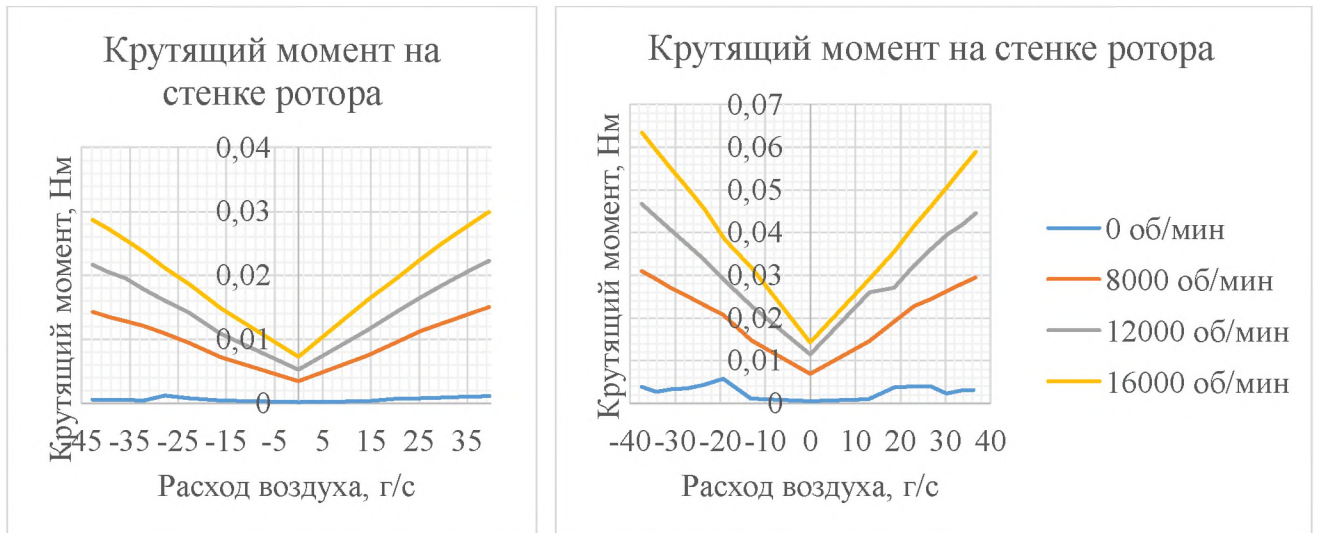


Рисунок 17 – Крутящий момент на стенке ротора

Подбор коэффициентов математической модели выполнялся с использованием NLPQL алгоритма (таблица 6)

Таблица 6 – Коэффициенты в уравнениях математических моделей уплотнений

Коэффициент	Не оптимизированное уплотнение		Оптимизированное уплотнение	
	При прямом направлении потока	При обратном направлении потока	При прямом направлении потока	При обратном направлении потока
C_m	1,177	1,414	0,991	1,021
μ_p	-4,7821e-02	-1,1869e-01	1,3976e-02	1,4895e-02
μ_n , мин	5,0723E-06	1,7124E-06	1,3960E-05	1,0568E-05
μ_{Im}	4,5431E-07		8,9027E-07	
μ_{nm} , Нм*мин	3,5820E-08	3,1880E-08	7,5828E-08	8,2315E-08

В седьмом разделе проводилось сравнение работы уплотнений с учетом переходных процессов при постепенном увеличении соотношения давлений от 1 до 1,7 в течение 70 секунд. Результаты влияния на тепловые потоки, частоту вращения ротора и расход газа показаны на рисунках 18 – 21, неоптимизированное уплотнение представлено синим цветом, оптимизированное уплотнение представлено оранжевым цветом.

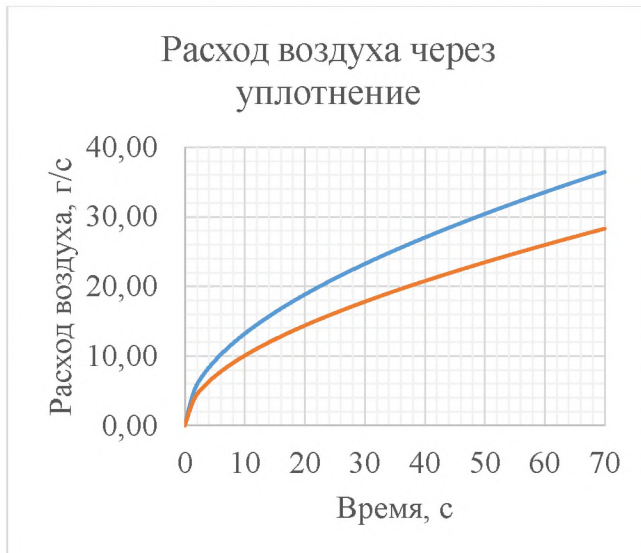


Рисунок 18 – Сравнение расхода воздуха через уплотнения при изменении режима работы уплотнения

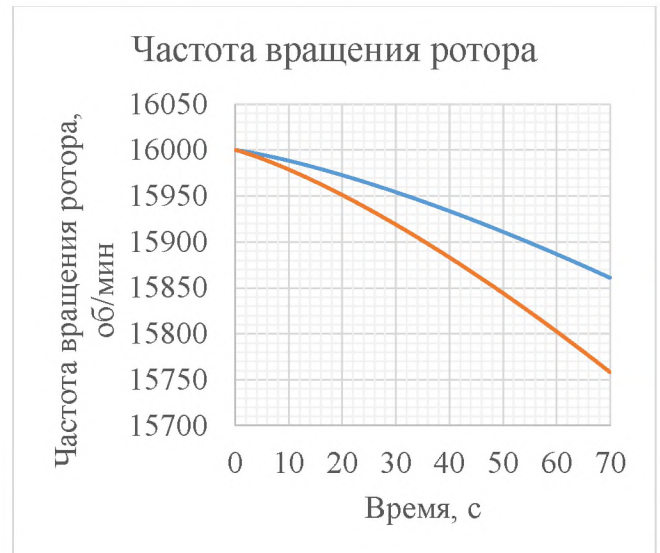


Рисунок 19 – Сравнение частоты вращения ротора с учетом влияния лабиринтного уплотнения

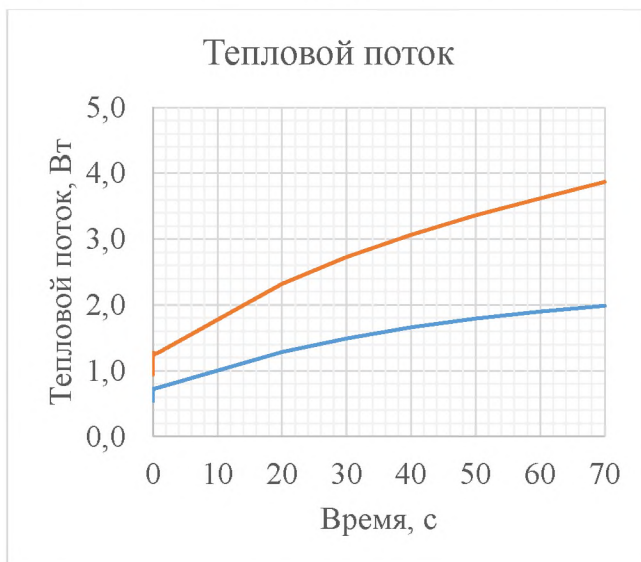


Рисунок 20 – Сравнение тепловых потоков в статор лабиринтного уплотнения

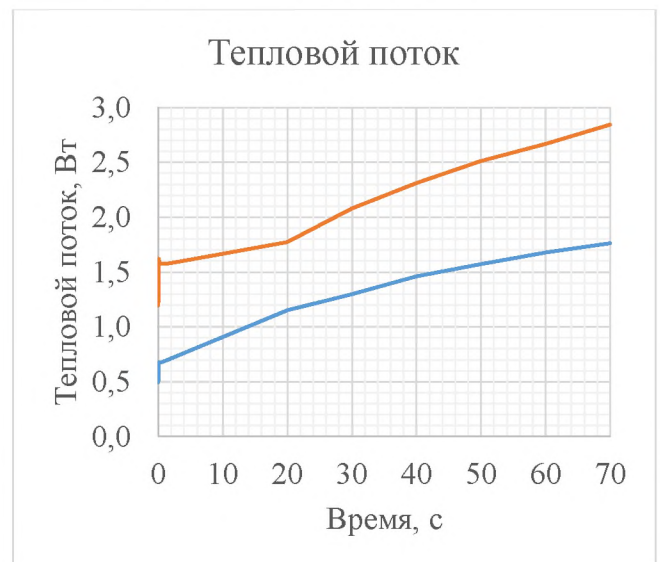


Рисунок 21 – Сравнение тепловых потоков в ротор лабиринтного уплотнения

В заключении по результатам диссертационного исследования были сформулированы следующие выводы:

Бесконтактные и, в частности, лабиринтные уплотнения широко применяются в качестве уплотнительных узлов в машиностроении с начала 20 века, за более чем 100 лет исследований физические процессы в уплотнительных узлах были всесторонне изучены и описаны. Разработано большое количество вариантов математических моделей уплотнений, большинство из которых обладают высокой точностью при описании расходных характеристик уплотнений. Современные исследования уплотнений газотурбинных двигателей сосредоточены на исследовании системных свойств уплотнительных узлов, влиянии на роторную динамику и тепловое состояние ГТД. Ожидается, что подходы, позволяющие учесть многочисленные особенности работы уплотнительных узлов, позволят проектировать более качественные уплотнения, отвечающие требованиям перспективных изделий.

В рамках диссертационного исследования предложена методика выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений ГТД, включающая в себя: алгоритм действий с применением современных программных комплексов, таких как среды, предназначенные для математического моделирования и системного анализа, программные системы анализа методом конечных элементов и программные комплексы, предназначенные для оптимизации проектных параметров; математическую модель, основанную на модифицированной модели Vennard J.K. и Street R.L. и дополненную дополнительными полуэмпирическими коэффициентами, учетом течения при сверхкритическом перепаде давления, дополнительными уравнениями вязкого трения и теплообмена, а также уравнениями законов сохранения и уравнением состояния, что позволяет моделировать изменение давления и температуры в полостях уплотнения, а также расход в зазорах между ротором и статором от времени с учетом трения и теплообмена; а также формальную постановку задачи оптимизации с учетом критериев изделия и ограничений прочности и теплового состояния. В дальнейшем

математическая модель может быть модифицирована для учета прецессии ротора и окружной неравномерности давления в полостях уплотнения.

Дороговизна натурных испытаний вынуждает переходить к виртуальным испытаниям и численному моделированию с использованием систем анализа методом конечных элементов. Ограничения связанные с текущим уровнем развития вычислительной техники вынуждают использовать допущения, упрощенные инженерные модели турбулентности, пристеночные функции для аппроксимации параметров в пограничном слое на стенках и условия симметрии. В диссертационном исследовании рассмотрены особенности применяемых моделей, требования сеточной сходимости и влияние граничных условий на результаты компьютерного моделирования работы уплотнений. Выполнено параметрическое исследование и оценка влияния различных параметров геометрии уплотнения на расход газа. Показана удовлетворительная сходимость выбранных моделей и способа задания граничных условий с опубликованными результатам других авторов, расхождения в расходе через уплотнения по результатам численного моделирования и аппроксимации экспериментальных данных полуэмпирической зависимостью составило от 5% до 8% в зависимости от соотношения давлений.

Применение всех этапов разработанной методики рассмотрено на примере прямоточного лабиринтного уплотнения с тремя гребнями, определены оптимальные геометрические параметры уплотнения в соответствии с поставленной задачей оптимизации. Снижение расхода через уплотнение в результате оптимизации составило до 28%. При решении задачи оптимизации проверялось выполнение ограничения на запас статической прочности уплотнения по пределу текучести. В дальнейшем постановка задачи может быть модифицирована, так чтобы при решении задачи оптимизации учитывались также ограничения динамической прочности или малоциклового усталости уплотнения. Несмотря на уменьшение радиусов скругления в основании гребней уплотнения, которые могли оказаться концентраторами напряжений, запас прочности уплотнения после оптимизации увеличился за счет уменьшения суммарного

изгибающего момента. Выполнено моделирование совместной работы уплотнений до и после оптимизации с учетом момента инерции ротора и тепловых масс ротора и статора, показано влияния крутящего момента от сил вязкого трения на торможение ротора и теплового потока через уплотнение на нагрев ротора и статора в течение 70 секунд моделирования работы уплотнения.

Разработанная методика позволяет найти оптимальные параметры уплотнения в соответствии с поставленной задачей оптимизации и с учетом его работы как части системы двигателя, что может позволить повысить качество уплотнительных узлов газотурбинных двигателей. Разработанная математическая модель может позволить: повысить точность моделирования динамических процессов в роторных системах газотурбинных двигателей с учетом работы уплотнительных узлов; повысить точность моделирования теплового состояния газотурбинного двигателя и термогазодинамических процессов в тракте газотурбинного двигателя; учесть взаимное влияние вышеперечисленных процессов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Андросович И.В., Силуянова М.В. Математическое моделирование работы лабиринтного уплотнения газотурбинного двигателя и его прочностных свойств// Авиационная промышленность. – 2021. – № 3-4. – С. 36-40. – EDN VAJRXE.
2. Андросович И.В. Математическое моделирование и оптимизация лабиринтного уплотнения газотурбинного двигателя с учётом прочностных свойств// Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29. – № 2. – С. 107-117. – DOI 10.34759/vst-2022-2-107-117. – EDN EDKXRQ.
3. Андросович, И. В. Анализ влияния качества расчётной сетки и граничных условий на результаты математического моделирования и оптимизации лабиринтного уплотнения газотурбинного двигателя / И. В. Андросович, М. В. Силуянова // Двигатель. – 2021. – № 4 (136) – С. 13 – 15. – EDN DNMYCT.

В рецензируемых изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:

4. Androsovich I.V., Siluyanov M., Borovikov D. Analysis of the geometric parameters influence on the labyrinth seals performance / Journal of Physics: Conf.Ser.: 2021. – P. 012075. – DOI 10.1088/1742-6596/1925/1/012075. – EDN MFZVNB.
5. Androsovich, I.V., Siluyanov, M.V. Optimization of Labyrinth Seals in Gas-Turbine Engines. Rus. Engin. Res. 41, 360–362 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068798X21040043>.

В других изданиях:

6. Андросович, И. В. Способ крепления пары деталей из материалов, разработанных для двигателей 5 поколения, образующих надроторное уплотнение / И. В. Андросович // Межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», М.: МАИ, 2016. – Москва, 2016.
7. Силуянова М.В., Андросович И.В. Обеспечение качественного уплотнения надроторного зазора в турбине высокого давления /Наука в современном информационном обществе: Материалы X международной научно-практической конференции: в 3-х томах, North Charleston, USA, 28–29 ноября 2016 года /North Charleston, USA: CreateSpace, 2016. – С. 98 - 100. – EDN XHTBFT.

8. Силуянова М.В., Андросович И.В. Высокотемпературная печная пайка приработываемых материалов, образующих надроторное уплотнение// 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»,– М.: Типография «Люксор», 2016. – С. 163-165. – EDN ZJAL0Z.

9. Андросович, И. В. Модернизация надроторных уплотнений двигателей 4-го поколения для увеличения межремонтного ресурса и срока эксплуатации / И. В. Андросович // Научные труды ММНК Гагаринские чтения, М.:МАИ, 2017. Т.1. – Москва, 2017. – С. 516-517. – EDN ZIJDSL.

10. Андросович И.В. Влияние межроторного зазора в проточной части ГТД на ресурс// Авиация и космонавтика - 2017: тезисы, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – М.: Типография «Люксор», 2017. – С. 72-73. – EDN YLGWZM.

11. Андросович, И. В. Изучение влияния зазора в проточной части ГТД / И. В. Андросович, В.В. Авруцкий // Тезисы докладов XXI Научно-технической Конференции молодых ученых и специалистов, Королёв, 2017. Т.1. – Королёв, 2017.

12. Андросович И.В. Повышение эксплуатационного ресурса ГТД // Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Казань, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2018. – С. 236 - 238. – EDN YNBHTV.

13. Андросович И.В. Тенденции развития технологий изготовления узлов и агрегатов турбин высокого давления ГТД// Гагаринские чтения - 2018: Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции, Т. 3. – Москва-Байконур-Ахтубинск: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. – С. 155-156. – EDN XPRMDZ.

14. Андросович, И. В. Повышение КПД двигателя в турбине высокого давления / И. В. Андросович, М.В. Силуянова // В книге: Авиация и космонавтика - 2018. Тезисы 17-ой Международной конференции. – Москва: Типография «Люксор», 2018. – Москва, 2018. – С. 61-62. – EDN YTQVET

15. Андросович И.В. Влияние радиального зазора в проточной части ГТД

на ресурс и КПД // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): тексты докладов участников Международной молодёжной научной конференции, в 6 т., – Казань, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева: 2019. – С. 218-219. – EDN VKSYTA.

16. Андросович И.В., Боровиков Д.А., Силуянова М.В. Параметрическое исследование и оптимизация лабиринтных уплотнений ГТД// Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование : материалы I Международной молодёжной научной конференции, – М.: Международный Информационный Нобелевский Центр "Нобелистика", 2020. – С. 117-120. – EDN XLINIR.

17. Андросович И.В., Силуянова М.В. Анализ влияния геометрических параметров на работу лабиринтных уплотнений// 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: Тезисы 19-ой Международной конференции, – М.: «Перо», 2020. – С. 128-129. – EDN FFWWBO.

18. Андросович И.В., Коротаева И.Э. Роль англоязычной среды в Московском авиационном институте для создания научно-технического задела в области авиационного двигателестроения// 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: Тезисы 19-ой Международной конференции, – М.: «Перо», 2020. – С. 816-817. – EDN TMJYPX.

19. Андросович И.В., Силуянова М.В. Анализ влияния качества расчётной сетки и граничных условий на результаты математического моделирования и оптимизации лабиринтного уплотнения газотурбинного двигателя// Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Международной научно-технической конференции, – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. – С. 44-45. – EDN TXSKVD.

20. Андросович И.В. Математическое моделирование и оптимизация лабиринтного уплотнения газотурбинного двигателя с учётом прочностных свойств /В книге: Молодёжь и будущее авиации и космонавтики. Сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов. М.: 2022. С. 46.