



ПОПОВА ДАРЬЯ КИРИЛЛОВНА

**Разработка метода расчета теплового состояния охлаждаемых
рабочих лопаток, учитывающего температурную сепарацию
газа в газотурбинном двигателе**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Кортиков Николай Николаевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Веретенников Сергей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и технической физики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» (ФГБОУ ВО РГАТУ имени П. А. Соловьева), г. Рыбинск

Юнаков Леонид Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры А8 «Двигатели и энергоустановки летальных аппаратов» факультета «А» Ракетно-космической техники, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им Д.Ф. Устинова» (ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»), г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Саровский инженерный центр» (ООО СИНЦ), ЗАТО г. Саров

Защита состоится «15» июня 2026 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.1.3.14.58 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Механический корпус, аудитория 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.1.3.14.58,
к.т.н.

Сероштанов
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ключевым элементом любого газотурбинного двигателя (ГТД) является газогенератор. В его состав входят компрессор высокого давления, камера сгорания и ступень турбины. Надёжность функционирования газогенератора играет определяющую роль, поскольку её обеспечение позволяет значительно снизить технические риски разработки, а также уменьшить продолжительность и стоимость сертификационных испытаний.

Тенденция развития ГТД такова, что с каждым новым поколением двигателей, температура газа перед турбиной увеличивается. Для того чтобы детали турбины, в частности лопатки, выдерживали высокие температурные нагрузки, разрабатываются жаропрочные и жаростойкие сплавы, а также различные конструктивные схемы охлаждения [6]. Неравномерность поля температуры газа на выходе камеры сгорания также оказывает существенное влияние на надёжность турбины и относится к числу важных параметров при *CFD* моделировании.

Неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания сохраняется и за сопловым аппаратом. Возникает эффект температурной сепарации, который заключается в том, что горячие слои газа смещаются к корыту рабочей лопатки, а холодные – к спинке. Рабочие лопатки турбины находятся под действием центробежных сил, которые влияют на их поле напряжений [9]. Появление градиентов температуры приводит к возникновению температурных напряжений, которые, в сумме с напряжениями от центробежных сил провоцируют появление термоусталостных трещин.

Для проектирования такого типа двигателей, требуются расчетные методы, позволяющие оценить тепловое состояние горячей части двигателя с высокой степенью точности. Задача достоверного расчета теплового состояния лопаток турбин высокого давления в полном объеме не решена до сих пор. Это связано с большим количеством факторов, влияющих на тепловое состояние рабочих лопаток.

К ним относятся факторы, связанные с окружной и радиальной неравномерностью температуры на выходе камеры сгорания (*hot streak*); положением форсунки относительно входа в ступень (*clocking effect*); формированием вторичных течений (*secondary flows*) в рабочем колесе турбины с перетеканием через радиальный зазор; учетом температурной сепарации газа вблизи поверхностей рабочей лопатки (*temperature segregation*).

Наиболее полно учесть совокупность факторов, влияющих на тепловое состояние элементов турбины, позволяют трёхмерные расчётные методы. В рамках таких подходов проводится численное моделирование температурного состояния турбинных лопаток с учётом нестационарных процессов. Подобные эффекты условно подразделяются на две основные категории. К первой относятся процессы нестационарного теплообмена, возникающие на переходных режимах работы двигателя. Именно в эти моменты возможно формирование наибольших температурных градиентов в материале лопаток. Ко второй категории относятся явления, обусловленные нестационарной природой течения газового потока в межлопаточном канале. Они проявляются в колебаниях параметров потока – скорости, температуры и давления – которые возникают вследствие нестационарного газодинамического взаимодействия между статором и ротором.

Современные вычислительные методы позволяют выполнять *CFD*-расчёты и моделировать газодинамические процессы в турбомашинах. Однако задача корректного задания граничных условий теплообмена, учитывающих трёхмерность и нестационарность течения рабочего газа, по-прежнему остаётся сложной. Кроме того, до

настоящего времени недостаточно исследовано влияние переходных режимов функционирования двигателя на долговечность и ресурс турбинных лопаток.

Степень разработанности темы. Современные тренды развития двигателестроения направлены на постоянное повышение температуры газа перед турбиной, что позволяет снизить удельный расход топлива в крейсерском полёте (А.А. Иноземцев, Ю.Н. Шмотин). А.И. Леонтьевым, С.В. Алексеенко, О.М. Алифановым, Л.М. Зысиной - Моложен, В.И. Тереховым, А.В. Щукиным, Э.К. Калининым, Г.А. Дрейцером, Ш.А. Пиралишвили, Е.М. Смирновым, С.А. Исаевым, С.В. Веретенниковым и другими выполнен большой объем исследований по интенсификации тепло – и массообмена (в том числе, в закрученном потоке газа) в каналах системы охлаждения лопаток турбин. Численное моделирование трехмерного течения и теплообмена в ступени турбины газотурбинного двигателя представлено в работах В.Г. Августиновича, А.М. Сипатова, В.Н. Матвеева, в которых на основе *RANS* и *URANS* подходов отдельно от камеры сгорания рассматривалось тепловое состояние рабочей лопатки. Преимущества перехода к перспективному (с точки зрения экономии вычислительных ресурсов в четыре и более раз) методу гармонического баланса указаны в работах He L., Hall K.C., Hirsch Ch., Clark W.S. Работы Frey C., Shang T., Epstein A., Saxe F., Gaetani P., Griffini D., Kourper S. посвящены изучению влияния неравномерности температуры на выходе из камеры сгорания, температурной сепарации, а также положения форсунок камеры сгорания относительно входа в ступень на характеристики потока в проточной части турбины. В этих работах приняты условия, характерные для модельных турбинных ступеней.

Задача исследования трехмерного теплового состояния лопаток турбин с учетом нестационарных явлений в ступени турбины является крайне сложной. Как показал обзор литературы, большинство исследователей концентрируют внимание только на эффекты статор-ротор взаимодействия в ступени турбины без учета особенностей выходных параметров камеры сгорания при **модельных** условиях эксплуатации двигателя.

Цель исследования: разработка и апробация метода трехмерного расчёта теплового состояния рабочих лопаток на режиме с максимальными температурами газа с учетом нестационарных явлений в охлаждаемой ступени турбины газотурбинного двигателя в **реальных** условиях его эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель течения и теплообмена в охлаждаемой ступени турбины с учетом трёхмерных особенностей обтекания ограничивающих поверхностей, окружной и радиальной неравномерностей температурного поля на выходе из камеры сгорания, дрейфа горячих пятен, идущих от форсунок, а также влияния нестационарного статор-ротор взаимодействия.

2. Провести 3D - анализ полей скорости и температур в проточной части от выходного сечения камеры сгорания до рабочей лопатки охлаждаемой ступени турбины двигателя с учетом основных факторов. Определить уровень нестационарного воздействия потока газа на рабочую лопатку на основе данных амплитудно - частотного спектра. Выявить основные факторы, влияющие на уровень температурной сепарации на поверхности рабочей лопатки.

3. Провести сравнение численных подходов *URANS* и метода гармонического баланса (НВ), применяемых для моделирования 3D нестационарных течений в турбомашине. Определить экономию вычислительных ресурсов в случае применения НВ.

4. Осуществить уточнение граничных условий теплообмена с целью снижения невязки (менее 7%) между результатами расчета температуры охлаждаемой лопатки и

опытными данными посредством применения платформы многокритериальной оптимизации и аппроксимации IOSO.

5. Провести апробацию и валидацию полученных поправок к граничным условиям теплообмена при определении теплового состояния ТВД ГТД IV поколения.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части направления исследования*: п.5 «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»; п.9. «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло - и массообмена и тепловой защиты».

Научная новизна диссертации заключается в следующих положениях:

1. Показана правомерность подхода URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier - Stokes*) воспроизводить периодические колебания плотности теплового потока на поверхности рабочей лопатки (ошибка – 10%). Отмечено, что доминирующий пик в значении спектральной плотности мощности колебаний теплового потока на поверхности рабочей лопатки соответствует фундаментальной частоте вращения ротора турбины.

2. Впервые установлено влияние положения форсунки на выходе камеры сгорания на величину динамического нагружения рабочей лопатки. Снижение величины температурной сепарации и динамического нагружения (на 81,6%) на поверхности рабочей лопатки наблюдается в случае расположения форсунки по центру относительно входа в межлопаточный канал сопловой решетки.

3. Отмечается незначительный вклад эффектов плавучести на развитие вторичных течений в межлопаточном канале вследствие малости значения числа Ричардсона в случае условий работы ступеней ЛПИ и ГТД IV поколения.

4. Установлено соотношение между модами (1 – 5 – 3) при использовании метода гармонического баланса (НВ) для системы «камера сгорания – сопловая и рабочая лопатки ступени», при котором обеспечивается корректный (без искажений) переход параметров потока через внутренние границы расчетной области. Отмечена экономия вычислительных ресурсов (в три раза) при использовании НВ по сравнению с URANS без потери точности.

5. Разработан единый алгоритм на основе включения в него платформ STAR CCM+ и IOSO и осуществлено уточнение граничных условий теплообмена на поверхности рабочей лопатки. Получены корректирующие множители в критериальные уравнения, учитывающие интенсификацию теплообмена около втулки и периферии рабочего колеса, и обеспечивающие снижение неопределенности расчета с 22 % до 7%.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенный в диссертации метод расчета теплового состояния рабочей лопатки и данные о протекании нестационарных теплофизических процессов в охлаждаемых турбинных ступенях при реальных условиях работы газотурбинного двигателя позволят вносить новые конструктивные решения без проведения натурных испытаний на начальном этапе проектирования двигателя. По итогам проведенной работы получен акт внедрения в АО «ОДК-Климов», в котором отмечается использование результатов диссертации при инженерном проектировании рабочих лопаток и их систем охлаждения с учетом температурной сепарации газа.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач основано на известных теоретических положениях и ключевых закономерностях термодинамики, газодинамики тепломассообмена, численных методов и методов многокритериальной оптимизации и аппроксимации с их валидацией и идентификацией.

Объект исследования – турбинная ступень ГТД IV поколения.

Предмет исследования – нестационарные газодинамические и теплофизические процессы, протекающие в трехмерной охлаждаемой турбинной ступени при реальных условиях эксплуатации газотурбинного двигателя.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты изучения возможностей URANS и НВ подходов численно моделировать периодические колебания параметров газового потока и определять температурную сепарацию вблизи поверхности рабочей лопатки, которая влияет на термоусталость металла рабочей лопатки и появление трещин около выходной кромки.

2. Результаты анализа амплитудно-частотной характеристики статор-ротор взаимодействия и анализа влияния положения форсунки камеры сгорания на снижение динамического нагружения и температурной сепарации рабочей лопатки.

3. Результаты сравнения вычислительной эффективности URANS и НВ подходов и их модальный анализ.

4. Разработка метода расчета теплового состояния охлаждаемых рабочих лопаток, учитывающего температурную сепарацию газа в газотурбинном двигателе, основанного на совместной работе платформ STAR CCM+ и IOSO и направленного на уточнение граничных условий теплообмена на поверхности рабочей лопатки.

Достоверность результатов обеспечивается использованием основополагающих законов термогазодинамики, положений теории подобия и размерностей, статистической обработкой при получении аппроксимационных зависимостей, и подтверждается соответствием расчетных и опытных данных, а также совпадением с результатами работ других авторов.

Апробация работы. Материалы докладывались и обсуждались на научных конференциях: всероссийской научной конференции «Неделя науки ФизМех» (г. Санкт-Петербург, 2023г.); XXIV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова (г. Казань, 2023г.); всероссийской научной конференции «Неделя науки ФизМех» (г. Санкт-Петербург, 2024г.); XVII Международном форуме по теплообмену (г. Минск, 2024г.); всероссийской научной конференции «Неделя науки ФизМех» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.); XXV школе – семинаре молодых ученых и специалистов академика А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и теплообмена” (г. Рыбинск, 2025г.); международной научно-технической конференции по авиационным двигателям (г. Москва, ICAM – 2025); научно-технической конференции «Климовские чтения - 2025: перспективные направления развития авиадвигателестроения» (г. Санкт-Петербург, 2025г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ, в том числе: 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и приравненных к ним; 8 статей – в сборниках международных и всероссийских конференций.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач исследования; в выборе объекта и предмета исследования; в обосновании выбора экономичного вычислительного подхода для расчета нестационарных явлений в трехмерной охлаждаемой ступени турбины; в обработке, обобщении полученных результатов и формулировке основных выводов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, имеет 10 таблиц, 52 рисунка. Список литературы включает 100 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, ее новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современных методов прогнозирования теплового состояния охлаждаемых рабочих лопаток, который должен учитывать многофакторный характер воздействия параметров газового потока. Проектирование систем охлаждения деталей и узлов двигателя, прежде всего рабочих лопаток турбины, а также оценка их прочностных резервов невозможны без получения достоверной информации о температурном состоянии конструкции.

Течение в турбинных лопаточных решетках нестационарное вследствие периодически проявляющихся возмущений течения, вызываемых выше и ниже расположенными (по потоку) лопаточными решетками. Нестационарные эффекты можно разделить на две группы. К первой группе относятся эффекты, обусловленные нестационарным теплообменом на переходных режимах работы двигателя, на которых следует ожидать наиболее высокие градиенты температур. Ко второй группе можно отнести эффекты, связанные со статор - ротор взаимодействием в ступени турбины.

Для численного моделирования нестационарных явлений в охлаждаемых турбинных ступенях применяют CFD методы расчета (в частности, STAR CCM+), учитывающие нестационарные явления при течении газа и вдув охладителя в проточную часть двигателя, а также неравномерность поля температуры газа на выходе камеры сгорания (рисунок 1).

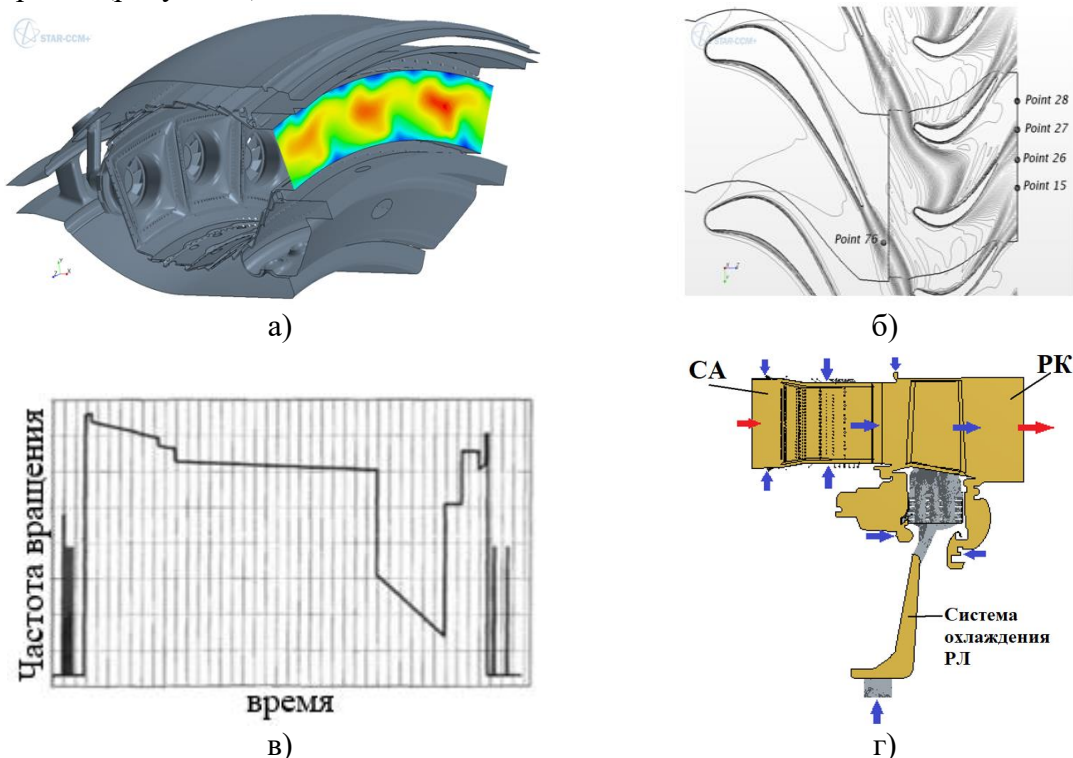


Рисунок 1 – Факторы, влияющие на тепловое состояние охлаждаемой рабочей лопатки газотурбинного двигателя: а) неравномерность поля температуры газа на выходе камеры сгорания; б) статор-ротор взаимодействие; в) нестационарные явления на переходных режимах; г) вдув охладителя в проточную часть двигателя

В главе дается классификация методов численного моделирования нестационарного течения и теплообмена в трехмерных турбинных ступенях. Подчеркивается перспективность применения в этих расчетах метода гармонического баланса с точки зрения вычислительной эффективности. Указывается перспективность использования цифровой платформы, включающей в себя программы STAR CCM+ и IOSO, для определения теплового состояния элементов ступени турбины. В выводах главы предлагается план действий по улучшению прогнозирования теплового состояния рабочей лопатки, который позволит учесть ряд эффектов, которые ранее рассматривались либо автономно друг от друга, либо вообще не учитывались.

Во второй главе описываются нестационарные и трехмерные явления при неизотермическом течении в охлаждаемой турбинной ступени. Трехмерные течения вязкого газа в межлопаточном канале в виде вихревых структур возникают под действием массовых сил (центробежной силы и силы Кориолиса). В охлаждаемой турбинной ступени добавляются эффекты плавучести. Перетекание через радиальный зазор рабочей лопатки оказывают значительное влияние на образование потерь кинетической энергии, генерацию турбулентности, тепловую защиту от перегрева, вибрацию и шум в турбомашине.

Неравномерность температурного поля на входе в решетку соплового аппарата (выход камеры сгорания) влияет на динамическое нагружение лопаток ротора. В межлопаточных каналах рабочего колеса газовый поток «сегрегируется» (разделяется): “горячие” слои газа перемещаются к поверхности корыта лопатки, а “холодные” слои – к поверхности спинки.

В заключительном параграфе главы отмечается, что наиболее распространенным при диагностировании теплового состояния рабочей лопатки турбины является метод ИМТК, который ориентирован на максимальное значение температуры поверхности лопатки и применим в диапазоне температур 1100°C - 1200°C. При этом для визуализации опасных зон на поверхности рабочей лопатки и размеров трещин на ней применяется метод ЛЮМ с использованием люминесцентного порошка.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования и анализа нестационарных газодинамических и тепловых явлений в неохлаждаемой турбинной ступени при наличии входной температурной неравномерности, на основе которых отмечено влияние окружного сдвига форсунок камеры сгорания (**clocking effect**) на температурную сепарацию и динамическое нагружение на рабочих лопатках турбинной ступени. Геометрические и режимные характеристики ступени ЛПИ соответствовали параметрам модельной турбинной ступени MIT (число Рейнольдса $Re=3,4 \cdot 10^5$; число Струхала $Sh=1,25$; число вращения $K=0,12$; температурная неравномерность на выходе камеры сгорания $TD=0,14$; число Прандтля $Pr=0,7$; число Грасгофа $Gr_{\omega}=1,88 \cdot 10^8$; число Ричардсона $Ri=1,63 \cdot 10^{-3}$).

Результаты численного моделирования нестационарного течения вязкого газа и сравнение их с опытными данными подтверждает правомерность URANS подхода (рисунок 2).

URANS подход удовлетворительно воспроизводит крупномасштабные периодические колебания плотности теплового потока на поверхности рабочей лопатки (ошибка не превышает 10%) (рисунок 2а). На рисунке 2б можно отметить, что доминирующий пик в значении спектральной плотности мощности колебаний теплового потока S [$Вт^2/м^4/Гц$] соответствует фундаментальной частоте ротора $f_R=2,0кГц$.

Влияние клокинг – эффекта на динамическое нагружение рабочей лопатки, потери кинетической энергии в ступени и теплообмен на рабочей лопатке рассмотрено на рисунке 3 при трех положениях форсунки относительно центра межлопаточного

канала соплового аппарата: а) центр форсунки расположен вблизи корыта лопатки (*PS*); б) по центру межлопаточного канала (*CC*); в) вблизи спинки лопатки (*SS*).

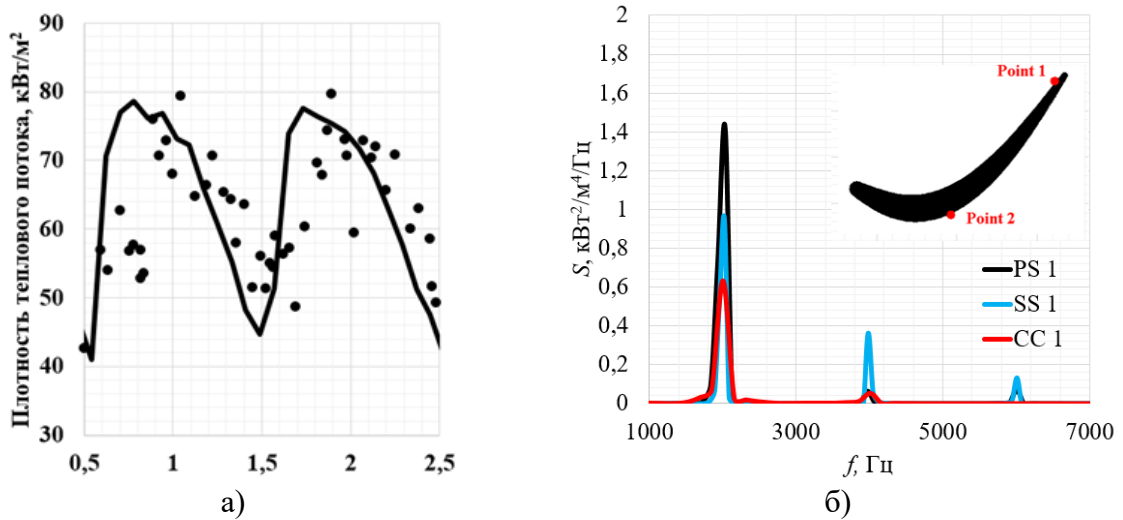


Рисунок 2 – а) Колебание плотности теплового потока на поверхности рабочей лопатки в точке мониторинга Point 1 во время перехода между смежными форсунками (расчет и эксперимент: круглые точки – опытные данные, линия – расчет); б) амплитудно-частотная характеристика нестационарного теплового потока в точке мониторинга Point 1

Расположение форсунки в центре межлопаточного канала сопловой решетки (рис. 3б, положение *CC*) обеспечивает наименьшее значение «колебательной» добавки (динамическое нагружение) (рис. 2б) в величину спектральной плотности теплового потока.

Сдвиг центра форсунки в сторону спинки сопловой лопатки приводит к увеличению динамического нагружения. (рис. 3в) Промежуточное значение имеет место при сдвиге форсунки в сторону корыта сопловой лопатки (рисунок 3а).

При значениях параметров, характерных ступеням ЛПИ и МИТ и нулевом значении радиального зазора различие в значениях коэффициента потерь как в сопловом аппарате, так и в рабочем колесе при окружном перемещении форсунки от корыта к спинке мало. При этом различие в значениях чисел Нуссельта (при крайних положениях форсунки) составляет 6,7%.

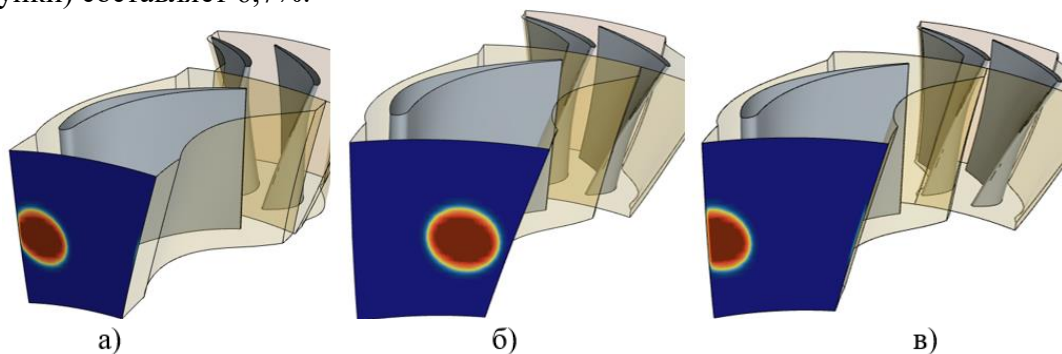


Рисунок 3 – Положения форсунок относительно соплового аппарата: а) вблизи корытной части лопатки (*PS*); б) по центру межлопаточного канала (*CC*); в) вблизи спинки лопатки (*SS*)

В четвертой главе обосновывается выбор метода гармонического баланса, эффективного с точки зрения экономии вычислительных ресурсов и не уступающего по

точности получаемых результатов, на примере расчета тепловых процессов в турбинной ступени ГТД при реальных условиях его эксплуатации.

В диссертации объектом исследования является турбинная ступень ГТД IV поколения, представленная на рисунке 4.

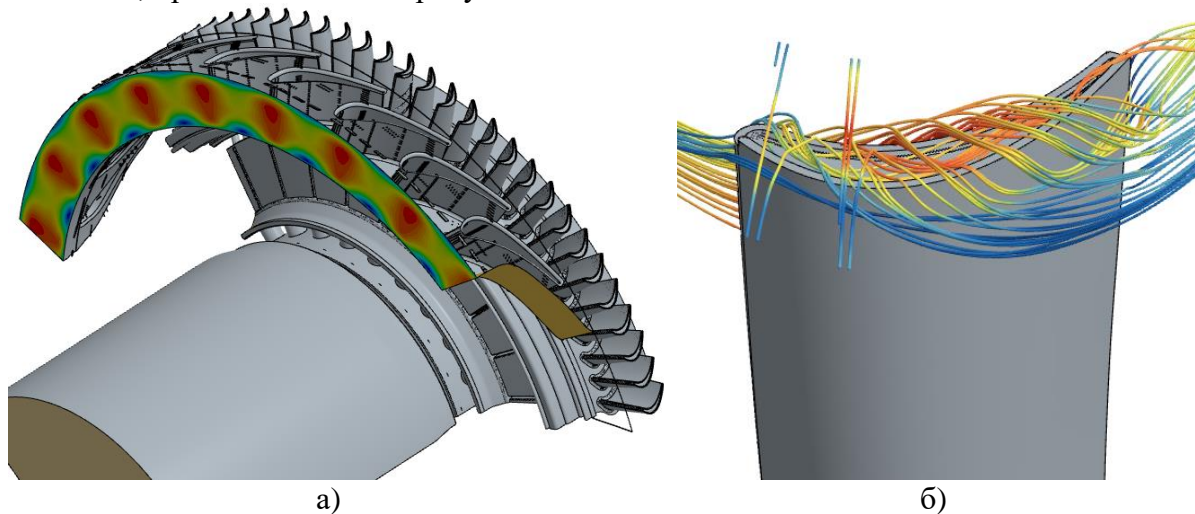


Рисунок 4 – а) Расчетная область турбинной ступени; б) перетекание через радиальный зазор с корыта на спинку рабочей лопатки

Входная температурная неравномерность формируется 24 топливными форсунками (рисунок 4а). Для рабочей лопатки учтен радиальный зазор, тем самым моделируется перетекание газа с корыта на спинку, которое существенно влияет на тепловое состояние рабочей лопатки (рисунок 4б).

Степень понижения давления в ступени ГТД IV поколения: $\pi = 3,23$; число оборотов ротора: $n=15446$ об/мин; число Рейнольдса – $Re = 1,6 \cdot 10^5$; число Струхалия – $Sh = 0,85$; число вращения – $K = 1,21$; температурная неравномерность на выходе камеры сгорания – $TD = 0,36$; число Грасгофа – $Gr_{\omega} = 1,06 \cdot 10^9$; число Ричардсона – $Ri = 0,041$.

Система охлаждения ступени включает: ряды перфораций, расположенные на верхней и нижней полках соплового аппарата, ряды перфораций на поверхности профиля сопловых лопаток (рисунок 5а).

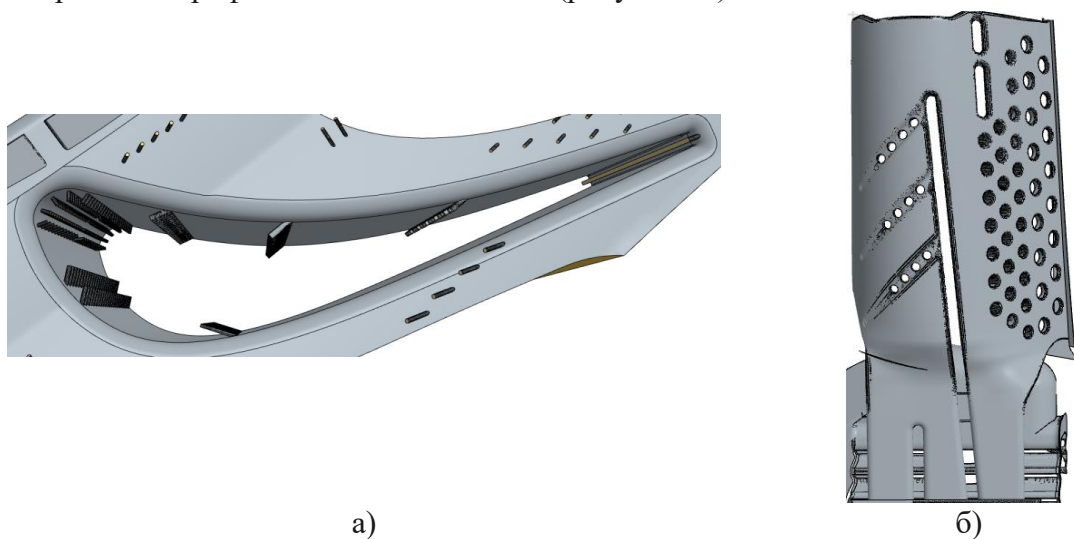


Рисунок 5 – Общий вид системы охлаждения: а) сопловая лопатка; б) рабочая лопатка

Расход охлаждающего воздуха определяется относительно расхода на входе в компрессор. Суммарный относительный расход охлаждающего воздуха через перфорацию по всему перу сопловой лопатки составляет 5,37%. Относительный расход через щель в выходной кромке сопловой лопатки равен 2,37% (рис. 5а).

Система охлаждения рабочей лопатки состоит из двух каналов, по которым проходит воздух, отобранный от компрессора. Течение охлаждающего воздуха имеет сложный вихревой характер, проходя через матрицу штырей (что необходимо для интенсификации теплообмена), и выходит через выходную кромку рабочей лопатки (рис. 5б). Относительный расход через выходную кромку составляет 3,5%.

Расчетная область в рамках *URANS* – моделирования охватывала девять межлопаточных каналов соплового аппарата и двадцать восемь межлопаточных каналов рабочего колеса, оснащённого конвективной системой охлаждения рабочей лопатки (рисунок 6а).

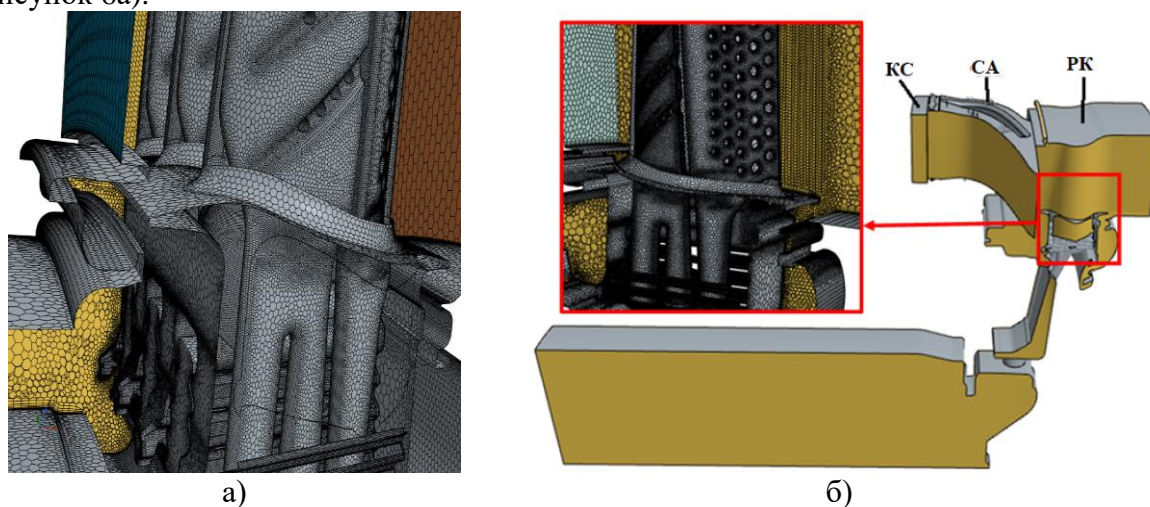


Рисунок 6 – а) Расчетная сетка для метода *URANS* (90 миллионов контрольных объемов); б) Расчетная сетка для метода *HB* (4 миллиона контрольных объемов)

Расчетная область, используемая при применении метода гармонического баланса (*HB*), представлена на рисунке 6б. Принципиальным отличием данного подхода от метода *URANS* является отсутствие необходимости согласования периодичности между различными расчетными регионами. Это позволяет моделировать каждый компонент турбины с индивидуальной периодичностью, соответствующей его геометрии и характеру течения.

Численное моделирование, выполненное с применением *URANS* подхода и технологии скользящих расчетных сеток, было выполнено с использованием *SST k – omega* модели турбулентности. При анализе результатов расчетов особое внимание уделено нестационарному поведению температурной сепарации газа вдоль профиля рабочей лопатки. На рисунке 7 показано изменение температурной разности между зонами, прилегающими к корыту и спинке лопатки, во времени. Из рисунка 7 видно, что температурное распределение является не только неравномерным, но и переменным во времени: в отдельные моменты времени зона, прилегающая к спинке лопатки, оказывается более нагретой, чем зона у корыта.

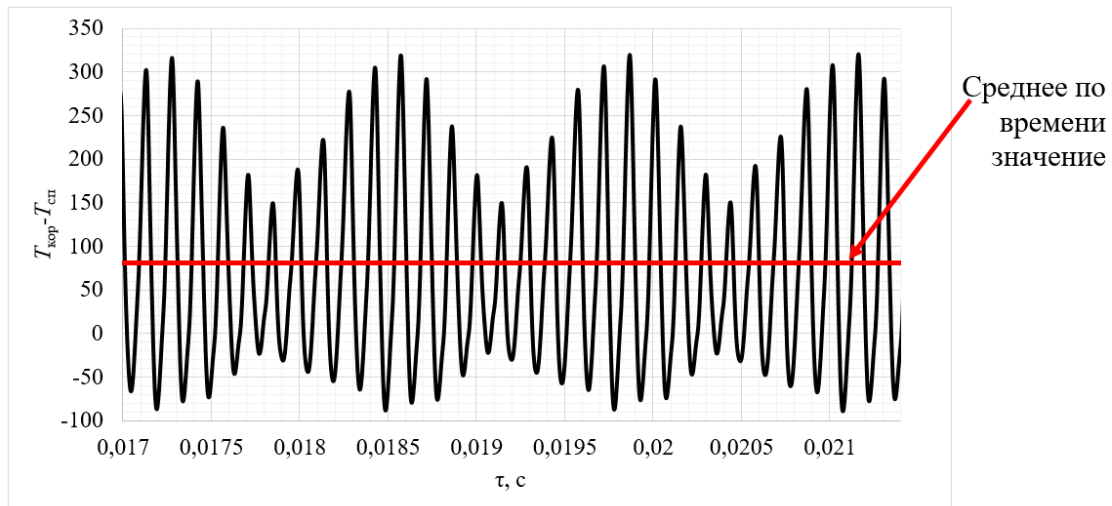


Рисунок 7 – Изменение разницы температур газа между зонами, прилегающими к корыту и спинке рабочей лопатки во времени

Ключевым моментом при использовании метода НВ является определение необходимого и достаточного количества мод (гармоник) для адекватного воспроизведения нестационарной картины течения. Особое внимание было уделено камере сгорания как источнику температурной и пульсационной неравномерности. Было установлено, что увеличение числа мод в этой области до трёх приводит к появлению в рабочем колесе высокочастотных компонент с выраженной амплитудой, которые не имеют физической природы и могут рассматриваться как численные артефакты – так называемые "паразитные" частоты.

В случае соотношения числа мод 1–5–3 (одна мода для камеры сгорания, пять для соплового аппарата и три для рабочего колеса), удалось достичь результата, когда передача параметров потока через интерфейсы осуществляется без искажений (рисунок 8).

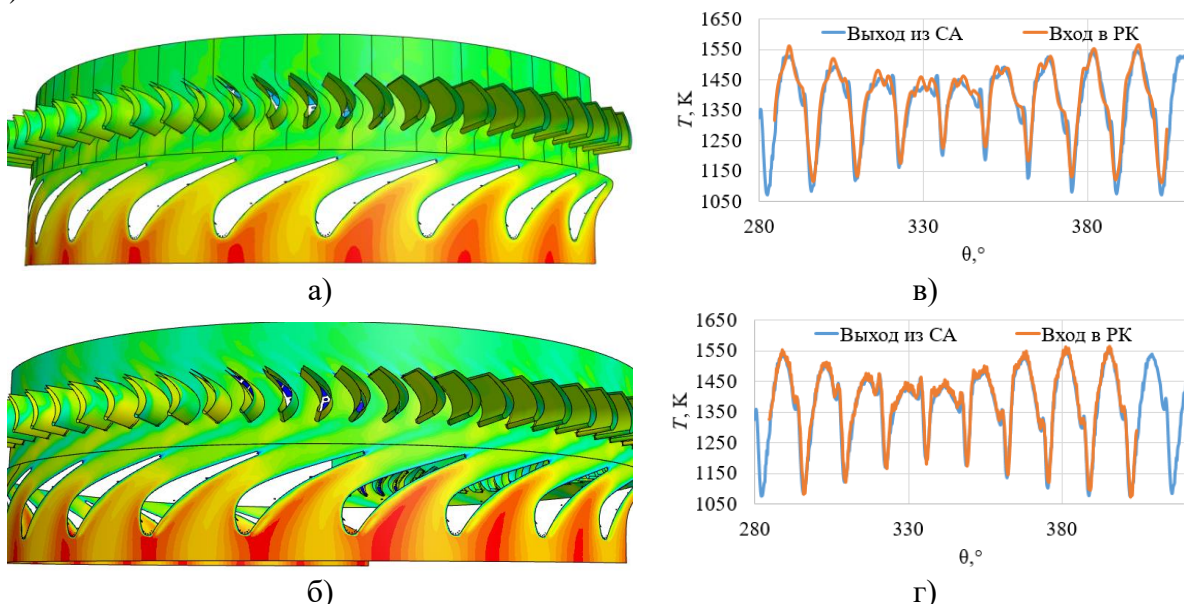


Рисунок 8 – а) Поле температуры для метода НВ; б) Поле температуры для метода URANS; в) Передача температурного поля через интерфейс между сопловым аппаратом и рабочим колесом при соотношении мод 1-3-1; г) Передача температурного поля через интерфейс между сопловым аппаратом и рабочим колесом при соотношении мод 1-5-3

В таблице 1 представлена сравнительная оценка затраченных вычислительных ресурсов для различных подходов к моделированию и отмечена экономия в 3 раза при использовании подхода НВ по сравнению с URANS.

Таблица 1 – Сравнение вычислительных затрат подходов URANS и НВ

Метод	Затраты оперативной памяти на 1 итерацию	Время расчета одной итерации	Время расчета
URANS	0.24 Гб	28 с	459 ч
НВ 1-1-1	0.64 Гб	36 с	70 ч
НВ 1-3-1	0.67 Гб	51 с	99 ч
НВ 1-5-3	0.83 Гб	97 с	180 ч

Для дополнительной верификации результатов был проведён сравнительный анализ частотных спектров, полученных по методу гармонического баланса и методу URANS, для охлаждаемой ступени турбины (ошибка не более 7%). Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение доминирующих частот при URANS и НВ

f , Гц (НВ)	f , Гц (URANS)	Относительная ошибка	Нодальный диаметр
778	749	3.94%	3
6172	6246	1.18%	24
6951	6996	0.64%	27
13123	13993	6.21%	51

В пятой главе выполнена итерационная процедура корректировки расчётных параметров теплообмена с целью минимизации расхождений (невязки) между расчётными и экспериментальными значениями температуры в контрольных точках на поверхности рабочей лопатки. Данная процедура изображена в виде блок – схемы на рисунке 9. Она использует результаты газодинамического расчета, полученные методом гармонического баланса (программа STAR CCM+), и поиска минимального значения невязки (программа IOSO).

По результатам выполненной итерационной процедуры с использованием суррогатной модели («суррогатная»/аппроксимационная модель расхождения экспериментальных и расчетных данных) были получены корректирующие поправки (1) - (4) к коэффициенту теплоотдачи для четырёх характерных участков поверхности рабочей лопатки: области входной кромки, средней части спинки, средней части корыта и области выходной кромки (рис. 9).

Для каждого из указанных участков поправки имеют выраженную зависимость от радиальной координаты и изменяются по высоте лопатки от втулочной части к периферии. Такой характер распределения поправок свидетельствует о неоднородности теплообмена по высоте лопатки, что обусловлено наличием развитых вторичных течений, характерных для межлопаточного канала турбинной ступени.

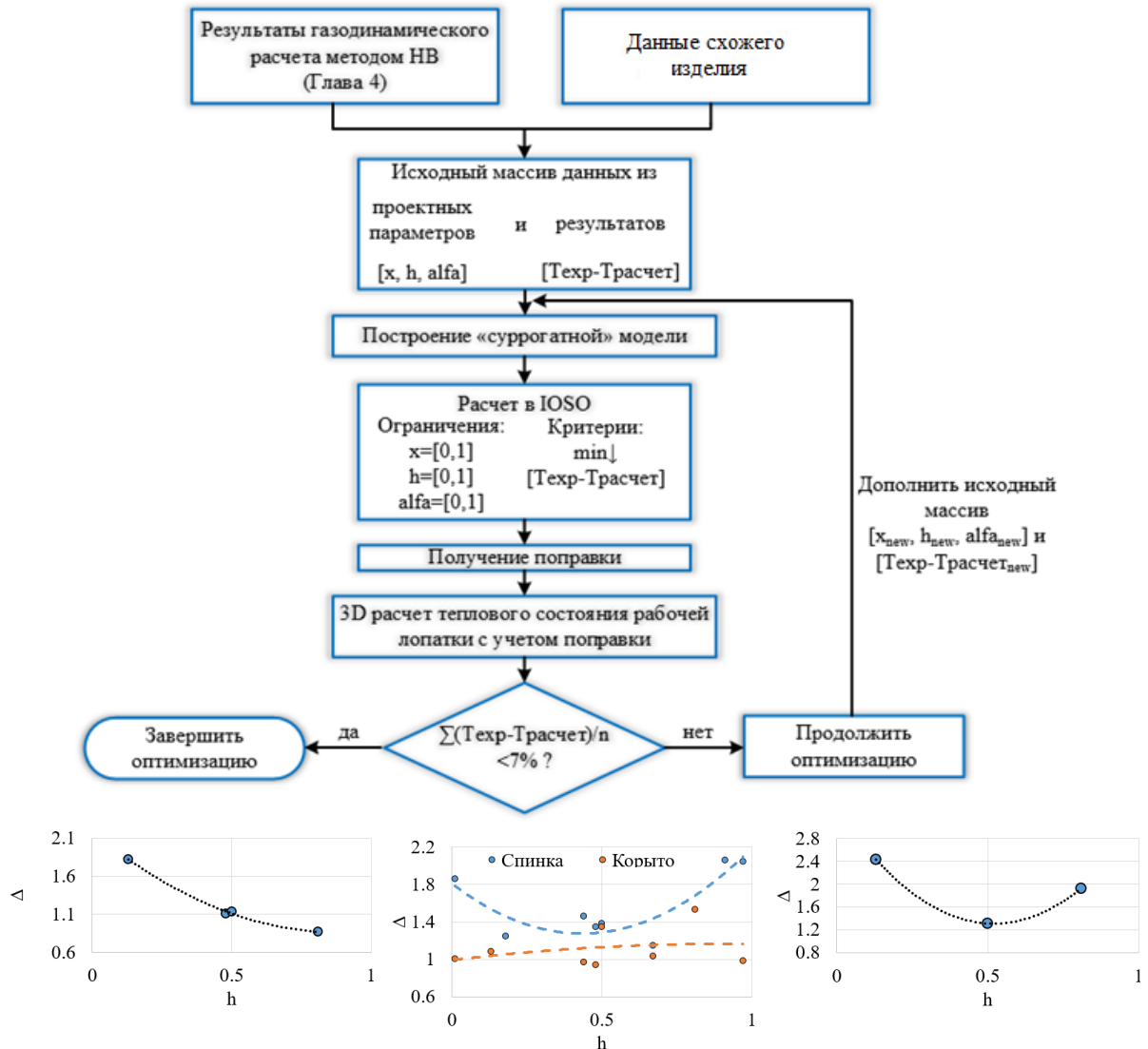


Рисунок 9 – Процесс поиска поправки

Поправки (1) – (4) входят в критериальные уравнения В.И. Локая и Щукина В.А. (КНИТУ - КАИ) в качестве дополнительных множителей $\Delta_{\text{вхкр}}$, $\Delta_{\text{сп}}$, $\Delta_{\text{кор}}$. Они зависят от относительной высоты лопатки h и аппроксимированы в виде полиномов следующими формулами:

для входной кромки:

$$\Delta_{\text{вхкр}} = 1.674 \cdot h^2 - 2.971 \cdot h + 2.178, \quad (1)$$

для средней части спинки:

$$\Delta_{\text{сп}} = 2.85 \cdot h^2 - 2.469 \cdot h + 1.811, \quad (2)$$

для средней части корыта:

$$\Delta_{\text{кор}} = -0.215 \cdot h^2 + 0.384 \cdot h + 0.993, \quad (3)$$

для выходной кромки:

$$\Delta_{\text{выхкр}} = 7.34 \cdot h^2 - 7.635 \cdot h + 3.296. \quad (4)$$

На рисунке 10 представлено сравнение расчетных и экспериментальных значений температур (в градусах Цельсия) на корыте и входной кромке (рис. 10а) и на спинке лопатки (рис. 10б), красным цветом обозначены экспериментальные данные, а синим – расчетные.

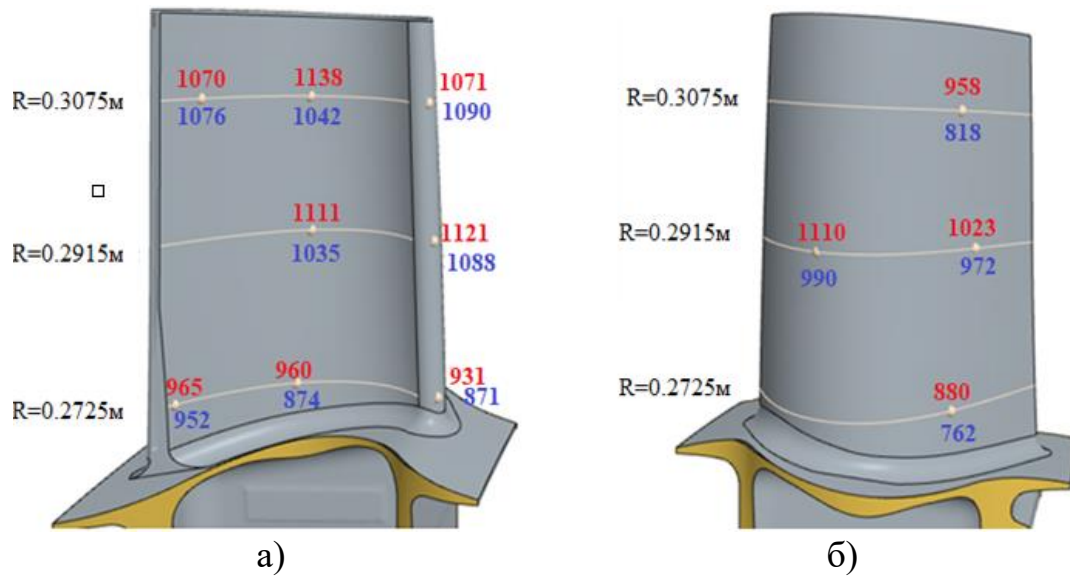


Рисунок 10 – Поля температуры на поверхности рабочей лопатки в градусах Цельсия: а) на корыте и входной кромке; б) на спинке лопатки (красным цветом обозначены экспериментальные данные, а синим – расчетные)

Среднее расхождение между расчётными и экспериментальными значениями температуры металла по контрольным точкам не превышает 7%, что может рассматриваться как удовлетворительный результат для расчёта теплового состояния рабочей лопатки. При этом на рисунке 11 представлен график, на котором показано изменение температурной сепарации вдоль высоты лопатки и отмечается согласование с экспериментальными данными (ошибка в среднем сечении не превышает 5%).

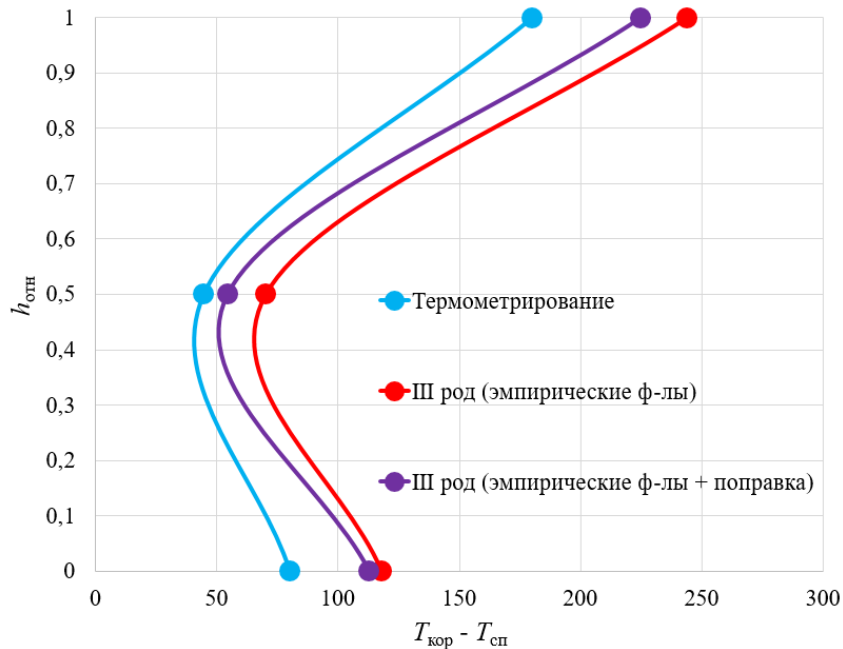


Рисунок 11 – Изменение температурной сепарации вдоль высоты лопатки

Предложенный метод позволяет выявлять опасные зоны температурной сепарации и потенциального зарождения термоусталостных повреждений расчётным путём, существенно сокращая объём дорогостоящих экспериментальных исследований

и сроки доводки конструкции, что особенно важно при модернизации и создании высокотемпературных газотурбинных двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана корректность подхода URANS моделировать периодические колебания плотности теплового потока на поверхности рабочей лопатки; расхождение с экспериментальными данными не превышает 10%. Доминирующий максимум спектральной плотности мощности колебаний теплового потока соответствует фундаментальной частоте вращения ротора (~ 2 кГц), что подтверждает определяющую роль статор-роторного взаимодействия в формировании нестационарного теплового воздействия.

2. Установлено, что расположение форсунки по центру относительно входа в межлопаточный канал сопловой решётки обеспечивает минимальное нестационарное тепловое воздействие на рабочую лопатку. В этом случае наблюдается снижение температурной сепарации и динамической составляющей теплового потока до 81,6 % по сравнению с крайними вариантами расположения.

3. При характерных режимах работы исследуемых турбинных ступеней вклад эффектов плавучести в развитие вторичных вихревых структур является незначительным вследствие малых значений числа Ричардсона ($Ri \leq 4,14 \cdot 10^{-2}$). Основное влияние на перераспределение температурного поля оказывают центробежные силы, кориолисовы эффекты и нестационарное взаимодействие лопаточных венцов, вызывающие температурную сегрегацию потока между корытом и спинкой лопатки.

4. Определено, что температурные колебания на поверхности рабочей лопатки могут достигать ± 250 К относительно среднего значения. Это приводит к формированию выраженной температурной сепарации и возникновению дополнительных термических напряжений, определяющих ресурс и трещиностойкость конструкции. Игнорирование этих факторов в стационарных расчётных схемах приводит к некорректной оценке тепловой нагруженности.

5. Обоснована эффективность применения метода гармонического баланса (НВ) для моделирования нестационарных процессов в системе «камера сгорания - сопловой аппарат - рабочее колесо». Установлено рациональное соотношение гармонических мод (1–5–3), при котором обеспечивается физически корректный и непрерывный перенос параметров потока через интерфейсы расчётных областей. Показано, что использование метода НВ позволяет сократить вычислительные затраты примерно в 3 раза по сравнению с URANS расчётами со скользящими сетками без потери точности.

6. Разработан и реализован интегрированный алгоритм расчётного анализа теплового состояния лопатки на основе совместного применения пакета STAR-CCM+ и оптимизационной платформы IOSO. Алгоритм обеспечивает проведение параметрического уточнения граничных условий теплообмена с использованием суррогатного моделирования и экспериментальных данных. В результате получены корректирующие поправки к критериальным зависимостям теплоотдачи, учитывающие влияние трёхмерности течения, вторичных структур, повышенной турбулентности и радиальной неравномерности условий обтекания.

7. Показано, что адаптация эмпирических зависимостей теплообмена к реальным условиям работы ступени повышает точность прогноза температурного состояния. Введение найденных поправочных функций позволило снизить расхождение между расчётными и экспериментальными значениями температуры металла с 22% до $\sim 7\%$, обеспечив тем самым возможность использования уточнённых моделей в инженерной практике без перехода к ресурсоёмкому сопряжённому нестационарному

моделированию. Предложенный метод позволяет выявлять опасные зоны температурной сепарации и потенциального зарождения термоусталостных повреждений расчётным путём, существенно сокращая объём дорогостоящих экспериментальных исследований и сроки доводки конструкции, что особенно важно при модернизации и создании высокотемпературных газотурбинных двигателей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus и изданиях из списка ВАК РФ

1. **Попова Д.К.**, Кузнецов Н.Б., Кортиков Н.Н., Бабий Ю.И. Повышение эффективности воздухо - воздушного теплообменника на основе многокритериальной оптимизации пучка оребренных U – образных трубок/ Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 8 (122). С. 1 - 8.

2. **D.K. Popova**, N.N. Kortikov. Simulation of unsteady heat transfer and temperature separation on the blades of a gas turbine by changing the position of the nozzles of the combustion chamber. Technical Physics, 2024, Vol. 69, No. 10, p. 1516 – 1522.

3. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Суррогатное моделирование для оптимизации рабочего процесса в турбинной ступени // Инженерно- физический журнал. 2025. Т. 98. № 1 (январь-февраль). С. 74-83.

4. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Обоснование метода гармонического баланса для моделирования нестационарных процессов в охлаждаемой ступени турбины ГТД // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 10. С. 476–487.

В сборниках трудов конференций

1. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Управление температурным состоянием и потерями в ступени газовой турбины регулировкой положения форсунок камеры сгорания. Неделя науки ФизМех: сборник материалов Всероссийской научной конференции, 3–7 апреля 2023 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ - ПРЕСС, 2023. – с. 112 - 115.

2. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Моделирование нестационарного теплообмена на поверхности рабочих лопаток турбинной ступени. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова (23-27 мая 2023г. г. Казань). – Казань: ООО ПК “Астор и Я”, 2023 - с. 346-347.

3. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Численное моделирование теплообмена и температурной сепарации применительно к задаче управления потерями в ступени турбины. Сборник материалов Всероссийской научной конференции «Неделя науки ФизМех», – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – с. 444 -447.

4. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Моделирование и управление температурной сепарацией для совершенствования аэродинамики и теплообмена в проточной части авиационных двигателей. 17-й Минский международный форум по тепломассообмену (ММФ-17) г. Минск. 20–24 мая 2024 г.

5. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Применение метода гармонического баланса при моделировании нестационарных процессов в охлаждаемой ступени турбины. Неделя науки ФизМех: сборник материалов Всероссийской научной конференции, 31 марта – 4 апреля 2025 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – с. 485-488.

6. **Попова Д.К.**, Кортиков Н.Н. Моделирование нестационарных процессов в охлаждаемой ступени турбины на основе метода гармонического баланса. XXV ШКОЛА-СЕМИНАР молодых ученых и специалистов академика А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломасообмена. Сборник материалов. г. Рыбинск. 9-13 июня 2025г. с. 246-247.

7. Кузнецов Н.Б., Якунин А.И., Кортиков Н.Н., **Попова Д.К.** Применение метода гармонического баланса для прогнозируемых зон с наибольшими тепловыми нагрузками на рабочих лопатках ГТД. «Климовские чтения - 2025: перспективные направления развития авиадвигателестроения»: Сборник статей научно-технической конференции - Санкт-Петербург: Скифия - принт. 2025. с. 62-71.

8. Н.Б. Кузнецов, А.И.Якунин, Н.Н. Кортиков, **Д.К. Попова.** Обоснование эффективности применения метода гармонического баланса для моделирования нестационарных процессов в охлаждаемой турбинной ступени. Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям - ICAM 2025: сборник тезисов/ Государственный научный центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». – М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2025. с. 343 - 346.