

На правах рукописи



Ремчуков Святослав Сергеевич

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА МГТД
СЛОЖНОГО ЦИКЛА**

05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Лепешкин Александр Роальдович

Официальные оппоненты: **Кузьмичев Венедикт Степанович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор
Бесчастных Владимир Николаевич, кандидат технических наук, публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», первый заместитель директора – главный конструктор научно-производственного центра «Системы автономного энергоснабжения» Территориально обособленного предприятия «Лианозовский электромеханический завод»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

Защита состоится «24» мая 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: https://mai.ru/upload/iblock/74f/Dissertatsiya_Remchukov_S_S.pdf.

Автореферат разослан: « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Отечественная авиационная промышленность в настоящее время заинтересована в современных двигателях мощностью 150-500 л.с. (100-400 кВт) в связи с ростом разрабатываемых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного типа и назначения в России.

Современные гражданские БПЛА самолетного и вертолетного типа взлетной массой до 1 000...5 000 кг представляют собой высокотехнологичные машины способные решать широкий спектр сложнейших задач. В настоящее время в большинстве силовых установок (СУ) таких летательных аппаратов (ЛА) используются авиационные поршневые двигатели (АПД), причем в основном зарубежного исполнения.

В последнее время, разработчики БПЛА в мире обращают повышенное внимание на малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД), так как они имеют малый вес, большой ресурс и способны работать на различных типах топлива.

В настоящее время, также, возрастает роль малоразмерных ГТУ в энергетической отрасли. Такие установки представляют собой стационарные машины, с выходного вала которых снимают электрическую энергию.

Для популяризации МГТД как в авиационном, так и наземном исполнении, необходимо повысить топливную эффективность машины, т.е. обеспечить получение большей работы при экономии горючего. Стоит отметить, что для повышения топливной эффективности двигателя можно поступиться требованиями к массовым характеристикам машины.

Одним из наиболее доступных и эффективных способов повышения экономичности МГТД рассматриваемого класса является применение регенерации тепла. В этом случае, на эффективность двигателя существенное влияние оказывает наличие теплообменного устройства. В существующих конструкциях МГТД применяются трубчатые и пластинчатые теплообменники. Как показывает практика, применение пластинчатой матрицы позволяет добиться оптимальных тепло-гидравлических и габаритно-массовых характеристик теплообменника.

В случае применения пластинчатого теплообменника в МГТД сложного цикла геометрия теплообменной поверхности, обеспечивающая наилучшую эффективность теплообмена, подбирается индивидуально для каждого конкретного случая.

В соответствии с вышеизложенным, важное значение приобретает разработка методики проектирования и изготовления теплообменника оптимальной конструкции, обеспечивающей требуемые по проекту технические характеристики при снижении материально-временных затрат.

Решение указанной задачи актуально для процесса повышения эффективности и экономичности современных МГТД.

Степень разработанности темы исследования

Рассматриваемой задаче по разработке методик проектирования, расчета и изготовления теплообменников, посвящено множество исследований, как в России, так и за рубежом. Наиболее известные работы по изучению тепло-гидравлических процессов в трубчатых теплообменниках проводились такими авторами, как Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Петухов Б.С., Мигай В.К.

Работы авторов Савостина А.Ф., Тихонова А.М., Кэйса В.М., Лондона А.Л., А.А. Жукаускаса, Коваленко Л.М., Нагоги Г.П., Е.И. Микулина, Ястребенецкого А.Р., Белова И.А. посвящены исследованию эффективности пластинчатых теплообменных аппаратов. В ряде работ рассматриваются способы повышения тепловых и гидравлических характеристик пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена, что достигается, в основном, интенсификацией теплообмена в потоке путем турбулизации теплоносителей.

При рассмотрении технологии создания теплообменников были изучены, преимущественно, процессы штамповки и сварки. В работах рассматриваются технологии получения пластин теплообменников, а также способы соединения пластин в теплообменную матрицу.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию вопроса эффективности теплообмена, подбор наилучшей геометрии теплообменной поверхности для решения конкретной задачи требует значительных материально-временных затрат. Кроме того, выбор оптимальной теплообменной поверхности ограничен количеством проведенных авторами экспериментальных исследований. Таким образом, в проблеме создания эффективных теплообменников остаются открытыми вопросы оптимизации геометрии теплообменной поверхности и технологии их изготовления.

Объектом диссертационного исследования являются:

- малоразмерные газотурбинные двигатели авиационного назначения и газотурбинные установки в классе мощности до 500 л.с. (≈ 370 кВт);
- пластинчатые теплообменники с поверхностями теплообмена различного типа;
- методика автоматизированного проектирования и расчета пластинчатых теплообменников;
- технология и производственное оборудование для создания пластинчатых теплообменников.

Предметом исследования являются вопросы автоматизированного проектирования, расчета и изготовления теплообменника для МГТД сложного цикла.

Целью работы является создание системы комплексного автоматизированного проектирования оптимальной по тепло-гидравлическим параметрам конструкции пластинчатого теплообменника и технологической оснастки для его изготовления, обеспечивающей значительное снижение материально-трудовых и временных затрат.

Задачи работы

- Провести анализ тенденций развития МГТД и МГТУ мощностью до 500 л.с. (≈ 370 кВт).
- Провести исследование конструкции современных теплообменников МГТД и МГТУ.
- Провести анализ существующих методик расчета тепло-гидравлических характеристик теплообменников МГТД (МГТУ).
- Разработать комплексную методику автоматизированного проектирования и расчета теплообменников, обеспечивающую их нормативные характеристики.
- Провести анализ и осуществить выбор наиболее рациональной технологии изготовления теплообменника.
- Интегрировать технологическую составляющую создания теплообменника в комплексную методику его автоматизированного проектирования и расчета.
- Провести апробацию методики при разработке теплообменника для наземной ГТУ сложного цикла.
- По разработанной методике спроектировать и изготовить комплект технологической оснастки, демонстрационный теплообменник и провести на нем верификацию предложенной комплексной методики.
- Рассмотреть возможности использования предложенной методики при проектировании деталей и узлов ГТД.

Новизна результатов исследований

1. Разработана комплексная методика автоматизированного проектирования и расчета пластинчатых теплообменников для МГТД (МГТУ) сложного цикла, которая позволяет по заданным исходным данным получить теплообменник, обеспечивающий наилучшие тепловые и гидравлические характеристики в пределах заданных ограничений с минимальным участием проектанта.
2. Разработан алгоритм тесной увязки стадии проектирования с технологией изготовления, что позволяет получить комплект 3D моделей технологической оснастки, необходимой для изготовления теплообменника.
3. Разработана наиболее рациональная технология изготовления теплообменника с использованием маломощного лазерного станка с ЧПУ.

Практическая значимость результатов исследований

Комплексная методика позволяет получить и изготовить оптимальный теплообменник (по тепловым и гидравлическим характеристикам) для условий конкретной задачи. Автоматизация методики позволяет сформировать 3D модели теплообменника и комплект технологической оснастки, необходимой для его изготовления.

Благодаря автоматизации методики и применению специализированного программного обеспечения достигается существенное сокращение временных и человеческих ресурсов, затрачиваемых на создание теплообменника.

Результаты применения технологии лазерной сварки на станке с ЧПУ малой мощности могут быть использованы при осуществлении сварки тонкостенных и разнотолщинных деталей – элементов пластинчатого теплообменника.

Разработанная экспериментальная установка, на которой проводилась верификация методики автоматизированного проектирования и расчета, применяется для получения тепло-гидравлических характеристик теплообменников различных типов.

Комплексная методика автоматизированного проектирования и расчета теплообменника применяется в «ЦИАМ им. П.И. Баранова» при разработке теплообменников системы регенерации тепла МГТД и МГТУ сложного цикла.

Методология и методы исследования. При подготовке и проведении испытаний применялась следующая нормативная документация. ГОСТ 24026-80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения». Программа испытаний составлялась по стандарту СТП 07538518-10-02-2001 «Порядок разработки программ и методик испытаний опытных объектов на испытательной базе ЦИАМ». Статистическая обработка результатов исследований проводилась с использованием математического обеспечения ЭВМ. При проведении проектирования и расчета применялись открытые, сертифицированные, верифицированные программные продукты.

Достоверность основных положений, результатов, выводов. Верификация методики автоматизированного проектирования и расчета пластинчатых теплообменников показала высокую сходимость результатов расчетов с известными литературными источниками и опубликованными результатами экспериментальных исследований авторов.

Проведенный натурный эксперимент по продувке демонстрационного теплообменника показал удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных тепло-гидравлических характеристик. Результаты не противоречат опубликованным данным других авторов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы использовались при разработке и изготовлении теплообменника для наземной газотурбинной установки ГТУсц-4 в ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Также, на предприятии по предложенной методике разработан теплообменник для малоразмерного газотурбинного двигателя сложного цикла мощностью 200 л.с. Внедренная методика позволила сократить время создания теплообменника и в установленные сроки испытать экспериментальный образец.

Апробация результатов работы. Основные результаты проведенных исследований докладывались на всероссийских и международных конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Эпоха науки», г. Ачинск, 2016 г.;

- Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», Москва, МАИ (НИУ), 2016, 2017, 2018 г.;

- Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, МАИ (НИУ), 2016, 2017, 2018, 2019 и 2020 г.;

- Международный молодежный форум «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией» в рамках МАКС 2017, г. Жуковский, 2017 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии и процессы», Курск, 2018 г.;
- Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, МАИ (НИУ), 2018 и 2020 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации», Пермь, ПНИПУ, 2018 г.;
- Международный аэрокосмический конгресс IAC 18, Москва, МГУ, 2018 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки», Москва, ЦИАМ, 2019 г.;
- Международная научно-техническая конференция «Техника и технологии машиностроения», Омск, ОмГТУ, 2019 г.;
- Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, МЭИ, 2020 г.;
- Международная научно-техническая конференция «International conference of aviation motors», Москва, ЦИАМ, 2020 г.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Комплексная методика автоматизированного проектирования и изготовления оптимального по тепло-гидравлическим параметрам пластинчатого теплообменника для МГТДр;
- Анализ технологии изготовления пластинчатого теплообменника;
- Интеграция технологии изготовления в методику автоматизированного проектирования и расчета;
- Способ соединения тонкостенных и разнотолщинных элементов теплообменника лазерной сваркой на маломощном станке с ЧПУ;
- Методика трехмерного расчета газодинамики и оптимизации параметров теплообменника;
- Верификация методики трехмерного расчета газодинамики теплообменника натурным экспериментом на демонстрационном теплообменнике;
- Применение методики автоматизированного проектирования и расчета для охлаждаемых лопаток турбин;
- Верификация методики автоматизированного проектирования и расчета системы охлаждения лопатки турбины методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате.

Вклад автора в проведенное исследование

На основании анализа условий работы и теплогидравлических характеристик различных поверхностей теплообмена была выбрана наиболее оптимальная конструкция теплообменника.

Автор разработал комплексную методику автоматизированного проектирования, расчета и изготовления пластинчатых теплообменников для МГТД сложного цикла. Совмещение методик автоматизированного проектирования и технологии изготовления в единую программу создания компактного теплообменника обеспечило значительное снижение материально-трудовых затрат.

Комплексная методика, разработанная автором, применялась при создании демонстрационного теплообменника для МГТД сложного цикла. Автор участвовал в разработке технологии лазерной сварки тонкостенных и разнотолщинных элементов теплообменника на маломощном станке с ЧПУ.

Верификация методики автоматизированного проектирования и расчета осуществлялась на стенде ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» при проведении продувки теплообменника подогретым воздухом. Автор непосредственно принимал участие в разработке и изготовлении экспериментальной установки для испытаний теплообменников, участвовал в проведении экспериментальных исследований. Полученные результаты обработаны автором и преобразованы в критериальные зависимости, по которым и проводилась верификация.

Автором проведена оценка применимости методики автоматизированного проектирования и расчета для систем охлаждения лопаток турбин ГТД. Проведенная верификация с применением метода калориметрирования в жидкометаллическом термостате показала высокую сходимость расчетных и экспериментальных характеристик.

Разработаны:

- комплексная методика автоматизированного проектирования и изготовления пластинчатых теплообменников для МГТД сложного цикла;
- демонстрационный теплообменник;
- комплект технологической оснастки для изготовления теплообменника;
- экспериментальная установка для оценки тепловых и гидравлических характеристик теплообменника.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 25 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 123 наименований, изложена на 158 страницах машинописного текста, включает 47 иллюстраций, 20 таблиц и 8 страниц приложений.

Автор выражает глубокую благодарность за постоянную поддержку и содействие работе, за помощь и критические замечания во время ее написания научному руководителю - доктору технических наук, профессору Лепешкину А.Р., научному консультанту - кандидату технических наук, доценту Ярославцеву Н.Л., доктору технических наук, профессору Силуяновой М.В. За содействие и поддержку при подготовке работы автор выражает благодарность коллективу сектора «Анализ конструкций малоразмерных газотурбинных двигателей» ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности исследовательской работы. Проанализирован уровень актуальности проблемы. Приведена и обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведена структура работы и ее краткая характеристика.

В **первой главе** работы рассматриваются основные тенденции совершенствования малоразмерных двигателей. Рассмотрены области применения малоразмерных двигателей и выявлены факторы, способствующие популяризации МГТД. Как наиболее доступное и актуальное направление, выбрано повышение топливной эффективности МГТД. Изучены основные способы повышения топливной эффективности, обоснован переход к схеме МГТД сложного цикла с регенерацией тепла. Проведен анализ конструкций современных теплообменников, применяемых на МГТД и МГТУ. Установлено, что из всего разнообразия исследованных пластинчатых поверхностей нагрева можно выделить «набивки Френкеля», которые в последнее время наиболее часто рассматриваются в авиационных теплообменниках (рис. 1).

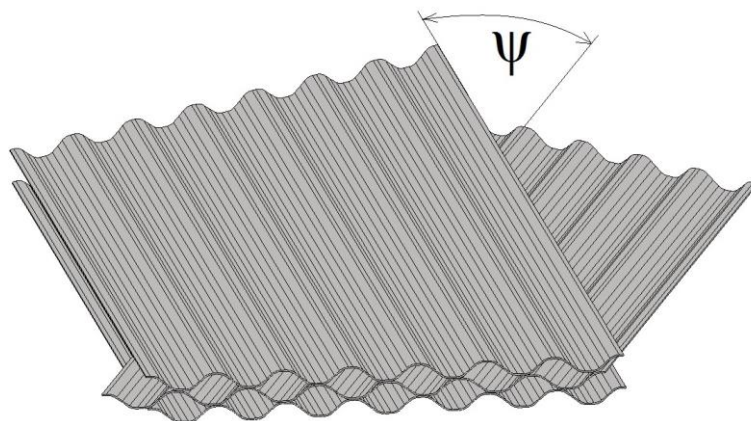


Рисунок 1 - Принципиальная схема пластинчатого теплообменника с геометрией типа «набивки Френкеля»

Проведен анализ существующих методик определения тепло-гидравлических характеристик исследуемых поверхностей теплообмена. Анализ показал, что существующие методики не в полной мере позволяют определить оптимальную геометрию теплообменной поверхности для условий конкретной задачи. Большинство работ по исследованию тепло-гидравлических характеристик различных поверхностей теплообмена содержат экспериментальные данные, преобразованные в критериальные зависимости.

Анализ работ по рассматриваемой тематике показал, что для упрощения создания оптимальной конструкции теплообменника целесообразна увязка всех стадий его создания, в том числе и технологической составляющей.

На основании проведенного обзора работ по повышению топливной эффективности МГТД сложного цикла сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики автоматизированного проектирования и расчета пластинчатого теплообменника для МГТД сложного цикла.

Разработанная методика автоматизированного проектирования и расчета представляет собой совокупность блоков, каждый из которых выполняет ряд определенных функций. Основные этапы методики автоматизированного проектирования и расчета теплообменника представлены на рисунке 2. Разработанный алгоритм позволяет разработчику получить оптимальную геометрию теплообменной поверхности в пределах заданных ограничений за счет итерационного подхода. Функцию каждого блока выполняет определенный открытый программный продукт.

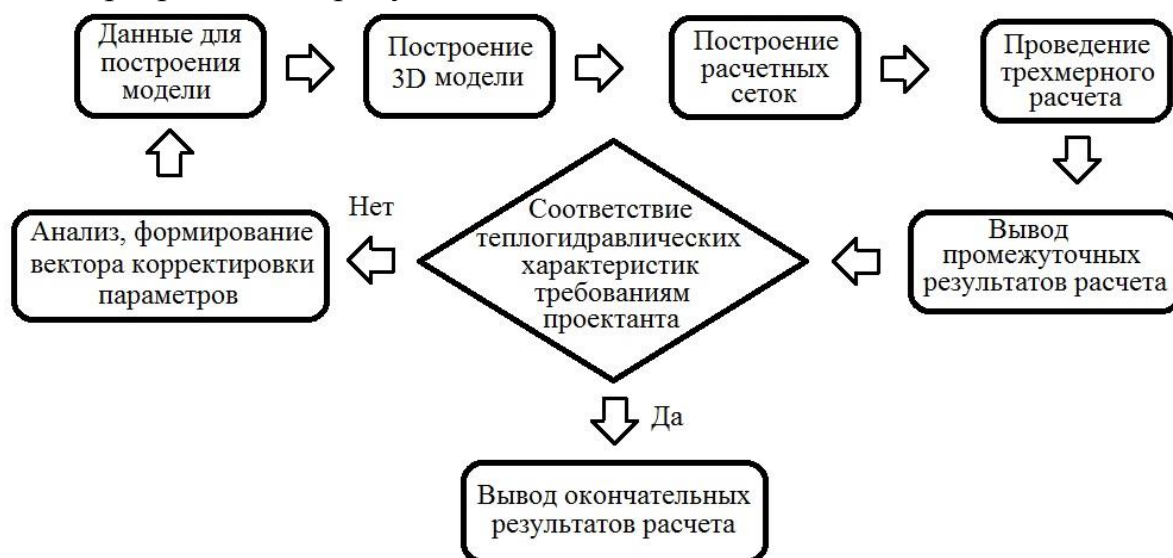


Рисунок 2 – Основные этапы методики автоматизированного проектирования и расчета теплообменника

Цель методики автоматизированного проектирования и расчета: максимизация степени регенерации при условии минимизации коэффициента гидравлического сопротивления. Оптимизация критериев осуществляется за счет варьирования наиболее значимых факторов параметрической 3D модели пластины теплообменника, определяющих тепло-гидравлические характеристики (рисунок 3).

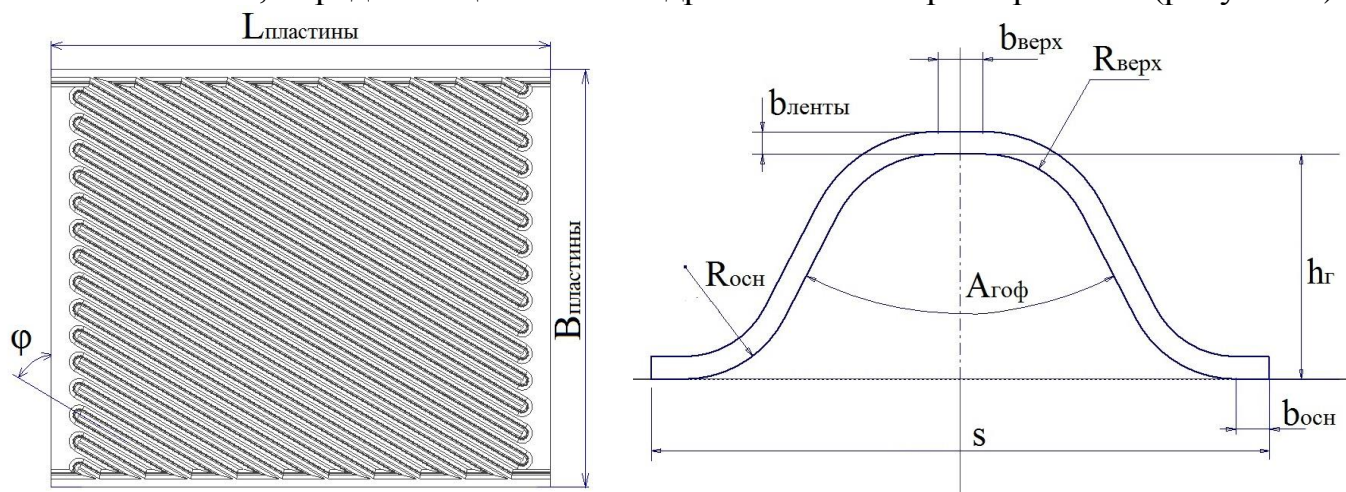


Рисунок 3 – Основные варьируемые геометрические параметры пластины

Проведена верификация методики автоматизированного проектирования и расчета теплообменника по известным литературным источникам. В литературных источниках содержатся тепловые и гидравлические характеристики различных

теплообменных поверхностей типа «набивки Френкеля», волновая, микрохолмистая, полученные экспериментальным способом. Геометрические характеристики теплообменных поверхностей закладывались в предлагаемую методику, после чего осуществлялась обработка данных с преобразованием в критериальные зависимости. Верификация показала удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных теплогидравлических характеристик (рисунки 4, 5).

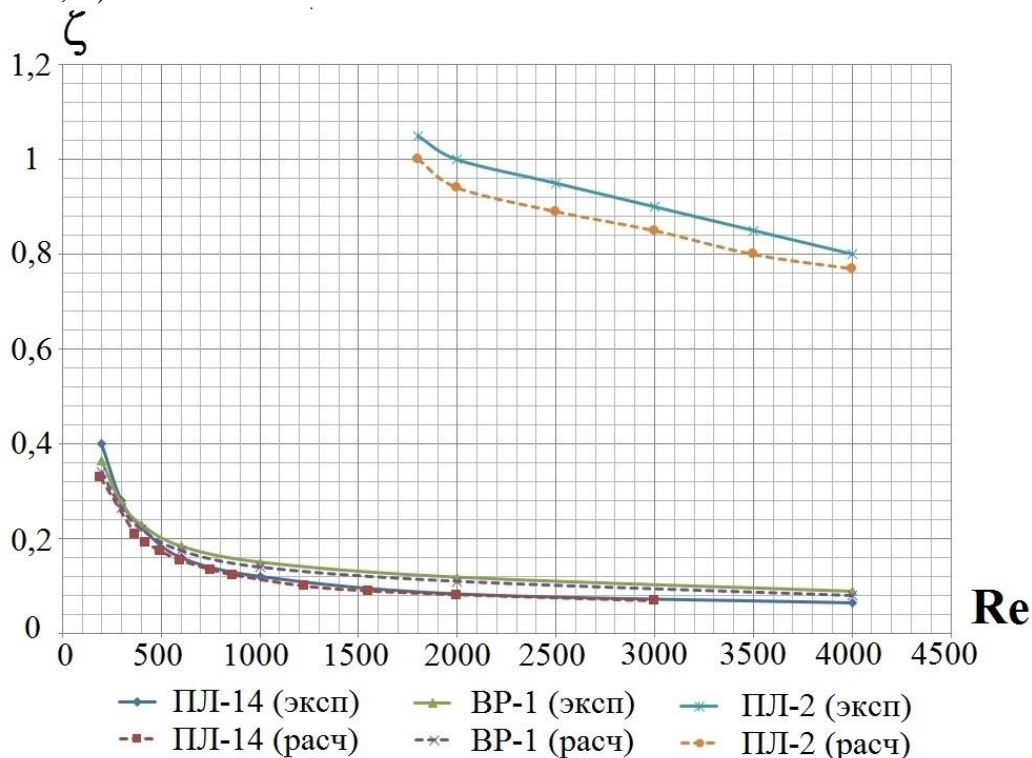


Рисунок 4 – Гидравлические характеристики поверхностей ПЛ-14, ВР-1 и ПЛ-2, полученные экспериментальным $\zeta_{\text{эксп}}(Re)$ и расчетным $\zeta_{\text{расч}}(Re)$ способами

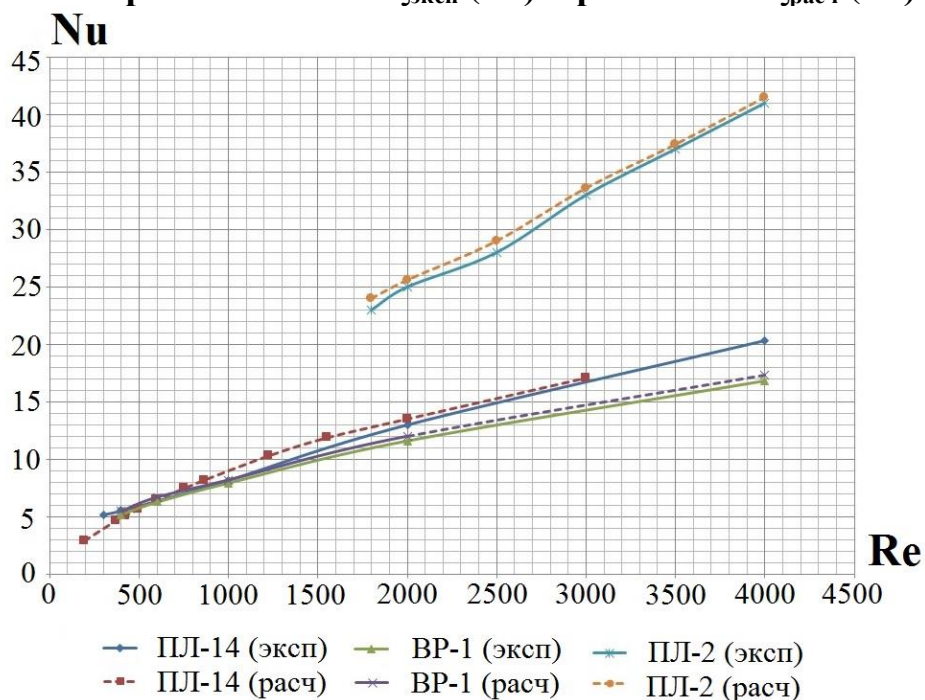


Рисунок 5 – Тепловые характеристики поверхности ПЛ-14, ВР-1 и ПЛ-2, полученные экспериментальным $Nu_{\text{эксп}}(Re)$ и расчетным $Nu_{\text{расч}}(Re)$ способами

Рассмотрены альтернативы применения разработанной автором комплексной методики. Задача оптимизации теплообменной поверхности находит свое применение в системах охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин. Верификация предлагаемой методики выполнена применительно к передней полости лопатки ТВД, представленной на рисунке 6.

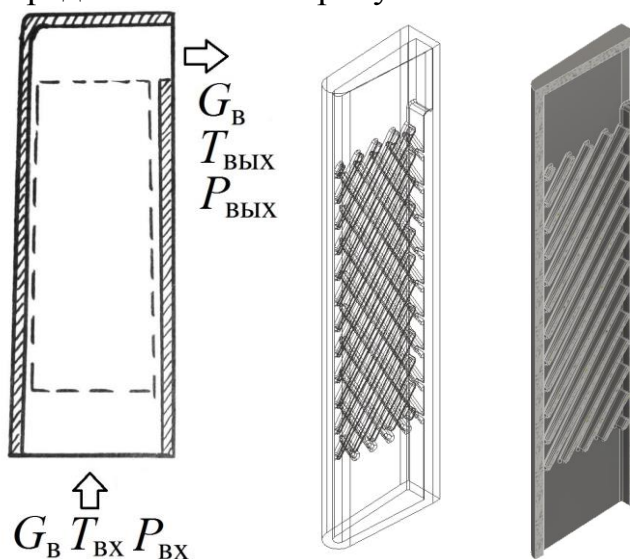


Рисунок 6 – Схема и параметрическая 3D модель передней полости исследуемой лопатки с вихревой матрицей

Методика автоматизированного проектирования и расчета позволила оценить тепловое состояние в исследуемой лопатке ТВД. Тепловое состояние лопатки в трех расчетных сечениях представлено на рисунке 7.

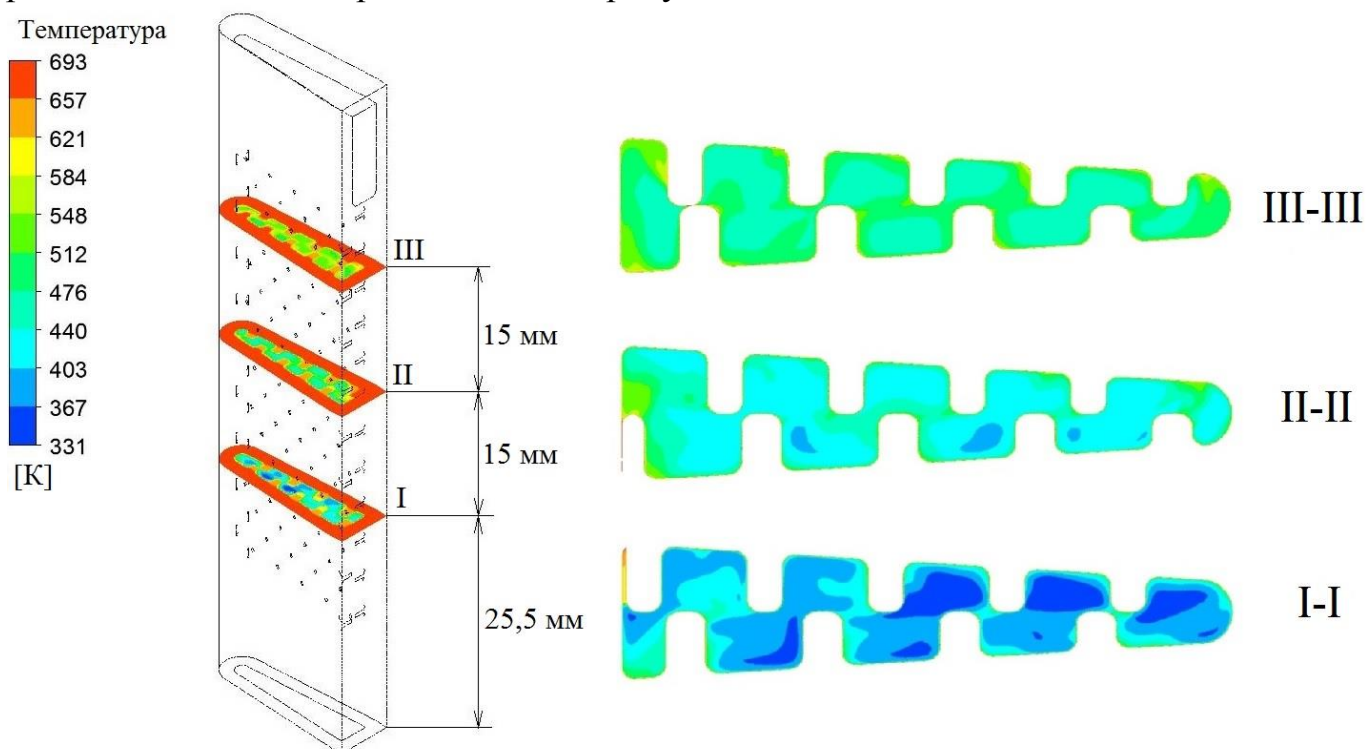


Рисунок 7 – Тепловое состояние в трех расчетных сечениях лопатки

Экспериментальные характеристики системы охлаждения получены методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Полученные с помощью методики автоматизированного проектирования и расчета результаты сравнивались

с экспериментальными данными. Расхождение расчетных и экспериментальных характеристик не превысило 10 %.

В **третьей главе** проведен анализ технологии изготовления пластинчатых теплообменников. Изначально сформированы требования к современным теплообменникам МГТД (МГТУ). Далее, проведен анализ технологий изготовления теплообменников. В результате предложен технологический процесс создания пластинчатого теплообменника МГТД (МГТУ), представленный в таблице 1.

Таблица 1 - Технологический процесс изготовления пластинчатого теплообменника

№	Наименование операции	Оборудование, оснастка
005	<u>Заготовительная</u> - получение заготовок для изготовления пластин теплообменника.	Лазерный станок с ЧПУ HTS Portal мощностью до 300 Вт.
010	<u>Штамповка</u> - получение пластин методом холодной листовой штамповки.	Штамп с формообразующими элементами геометрии типа «набивки Френкеля» собственной разработки.
015	<u>Чеканка</u> входных каналов пластин методом пластического деформирования.	Чеканочное приспособление гильотинного типа собственной разработки.
020	<u>Лазерная резка</u> пластин в единый размер, выравнивание торцевых поверхностей для последующих операций.	Лазерный станок с ЧПУ HTS Portal мощностью до 300 Вт; формообразующие элементы штампа для позиционирования пластин.
025	<u>Сварка конвертов</u> - сварка пластин в конверты.	Лазерный станок с ЧПУ HTS Portal мощностью до 300 Вт; приспособление для прижима свариваемых поверхностей собственной разработки.
030	<u>Сварка матрицы</u> - сварка конвертов в единую матрицу теплообменника.	Лазерный станок с ЧПУ HTS Portal мощностью до 300 Вт; приспособление для прижима конвертов собственной разработки; технологические вставки для прижима свариваемых поверхностей.
035	<u>Лазерная резка</u> корпусных элементов теплообменника по цифровым моделям.	Лазерный станок с ЧПУ HTS Portal мощностью до 300 Вт.
040	<u>Сварка теплообменника</u> - сварка матрицы с корпусными деталями.	Лазерный станок с ЧПУ HTS Portal мощностью до 300 Вт.

Технология создания пластинчатого теплообменника является очень сложной задачей, для реализации которой требуется специальная оснастка. Проведена интеграция технологии изготовления в методику автоматизированного проектирования и расчета, что позволяет получать весь комплект требуемой технологической оснастки по модели пластины теплообменника. На рисунке 8 представлен технологический этап комплексной методики создания теплообменника.

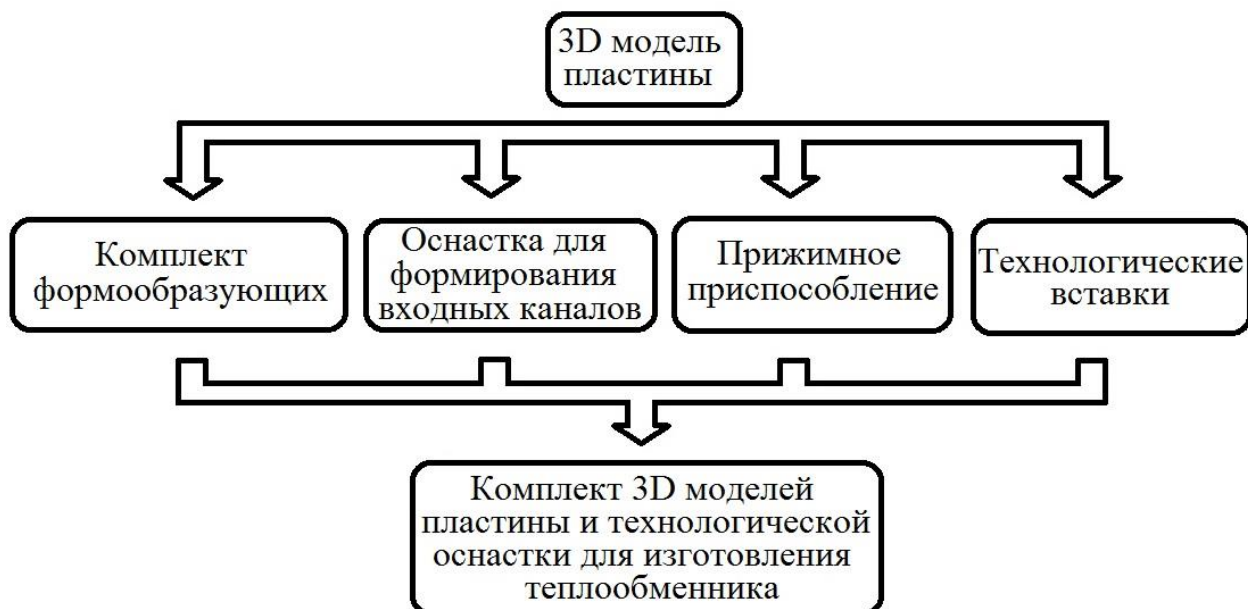


Рисунок 8 – Технологический этап комплексной методики проектирования, расчета и изготовления теплообменника

В четвертой главе описан процесс создания экспериментального теплообменника для ГТУсц-4 по предложенной комплексной методике (рисунок 9).



Рисунок 9 – Последовательность создания экспериментального теплообменника для ГТУсц-4

Автоматизированное проектирование и расчет позволили получить конфигурацию пластины, обеспечивающую наилучшие тепловые и гидравлические характеристики. По представленной методике спроектирован и изготовлен весь комплект оснастки и экспериментальный теплообменник.

Соединение тонкостенных и разнотолщинных деталей в процессе создания теплообменника осуществлялось методом лазерной сварки на мало мощном станке с

ЧПУ. Приведены особенности применения лазерной сварки при создании теплообменников МГТД (МГТУ). Для подтверждения прочности и герметичности соединения проведены экспериментальные исследования. Подтверждена работоспособность и герметичность сварных швов до давлений 4 атм.

Экспериментальный теплообменник, полученный с использованием лазерных технологий по методике автоматизированного проектирования, расчета и изготовления, представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Экспериментальный теплообменник

В **пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований теплообменника, созданного по предложенной методике.

Разработанная программа эксперимента позволяет оценить тепловые и гидравлические характеристики теплообменника путем продувки теплообменника потоками горячего и холодного воздуха. Программа составлена в соответствии со стандартом предприятия, на котором проводятся экспериментальные исследования.

Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследований тепло-гидравлических характеристик теплообменников, представленная на рисунке 11.

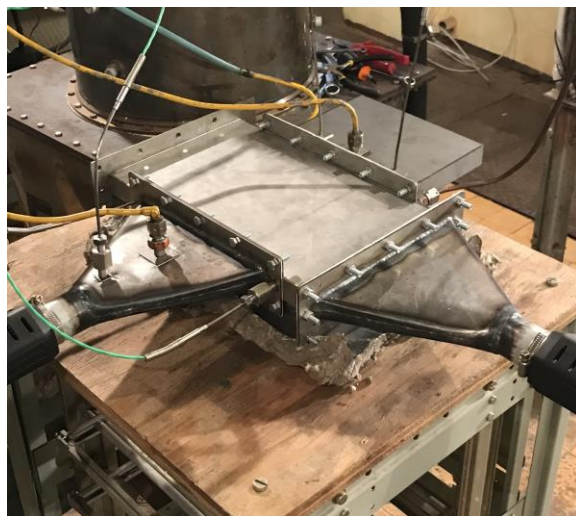


Рисунок 11 – Экспериментальная установка в сборе (без теплоизоляции)

Конструкция установки обеспечивает замер необходимого количества экспериментальных параметров при минимальном числе измерительных устройств. Теплоизоляция установки обеспечивает потери в окружающую среду не более 15 %.

Представлены результаты испытаний, проведенных на испытательном стенде ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Результаты получены для различных режимов продувок.

Обработанные результаты эксперимента представлены в виде критериальных зависимостей на рисунке 12. Наблюдается близкая сходимость результатов расчета с экспериментальными данными. Рассогласование данных на высоких числах Рейнольдса не превышает 5 %.

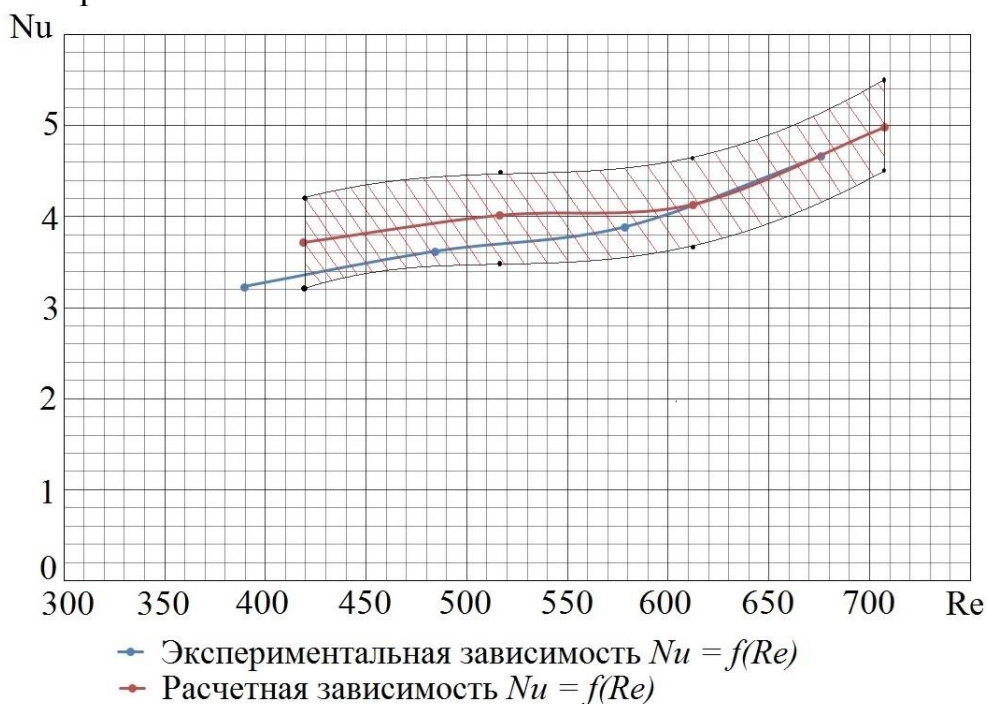


Рисунок 12 – Расчетная и экспериментальная тепловые характеристики исследуемого теплообменника

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены и обоснованы следующие результаты.

1. Проведен анализ научно-технических исследований в области перспектив развития МГТД и МГТУ в классе мощности до 500 л.с. (370 кВт) и показано, что одним из актуальных направлений совершенствования является повышение экономичности.

2. В двигателях малой размерности наиболее существенным способом повышения топливной эффективности является регенерация тепла. Применение сложного цикла в малоразмерных двигателях позволяет приблизить топливную эффективность к уровню современных АПД.

3. Разработана комплексная методика автоматизированного проектирования и производства пластинчатого теплообменника для МГТД (МГТУ) сложного цикла. Методика позволяет получать оптимальную геометрию теплообменной поверхности и разработку технологического оборудования с учетом требований и ограничений, задаваемых проектантом.

4. Проведена верификация методики автоматизированного проектирования и расчета пластинчатого ТО с экспериментальными и литературными источниками. Расхождение расчетных и экспериментальных данных составило не более 5%.

5. Выполнена оценка применимости методики при разработке систем охлаждения высокотемпературных турбин ГТД. Результаты расчетной методики сравнивались с экспериментальными данными, полученными методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Подтверждена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных характеристик.

6. Проведен анализ технологии изготовления пластинчатых теплообменников МГТД (МГТУ) сложного цикла. Предложен технологический процесс изготовления пластинчатого теплообменника с использованием маломощного лазерного станка с ЧПУ. Выполнена интеграция технологической составляющей создания теплообменника в комплексную методику.

7. Проведена апробация методики при разработке теплообменника ГТУсц-4. По предложенной методике изготовлен комплект технологической оснастки и экспериментальный теплообменник.

8. Применение комплексной методики автоматизированного проектирования, расчета и изготовления позволило существенно сократить затраты времени на разработку ТО для ГТУсц-4. Получена наиболее оптимальная конфигурация пластины теплообменника, позволяющая получить наилучшие тепло-гидравлические характеристики.

9. Разработаны и внедрены лазерные технологии при создании ТО. Выявлены особенности применения лазерной сварки на маломощном станке с ЧПУ при соединении тонкостенных и разнотолщинных деталей.

10. Проведены экспериментальные исследования демонстрационного ТО, выполненного по предложенной методике. Подтверждена герметичность сварных швов, полученных методом лазерной сварки на маломощном станке с ЧПУ.

Исследования показали близкую сходимость расчетных и экспериментальных тепло-гидравлических характеристик.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Ярославцев Н.Л., Викулин А.В., Ремчуков С.С. Оптимизация конструкции передней полости лопатки полупетлевой схемы охлаждения // *Авиационная промышленность*. 2017. № 4. С. 10-16.
2. Ярославцев Н.Л., Викулин А.В., Ремчуков С.С. Конструктивные особенности технологической оснастки для калориметрических испытаний теплонапряженных деталей ГТД // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20, № 1. С. 82-86.
3. Ремчуков С.С., Данилов М.А., Чистов К.А. Автоматизированное проектирование и расчет пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25, № 3. С. 116-123.
4. Викулин А.В., Ярославцев Н.Л., Ремчуков С.С. Тепловое проектирование рекуперативного теплообменника // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20, № 6. С. 107-113.
5. Ярославцев Н.Л., Викулин А.В., Ремчуков С.С. Использование вихревых матриц в конструкции лопаток высокотемпературных газовых турбин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2019. Т. 21, № 1. С. 172-177.
6. Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н., Ярославцев Н.Л. Внедрение технологии изготовления пластинчатого теплообменника МГТД в методику автоматизированного проектирования и расчета // *Авиационная промышленность*. 2019. № 2. С. 26-30.
7. Осипов И.В., Ремчуков С.С. Малоразмерный газотурбинный двигатель со свободной турбиной и теплообменником системы регенерации тепла в классе мощности 200 л.с. // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26, № 2. С. 81-90.
8. Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н. Особенности применения лазерных технологий в процессе создания пластинчатых теплообменников для малоразмерных газотурбинных двигателей // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27, № 2. С. 90-98.

Другие публикации

9. Ярославцев Н.Л., Ремчуков С.С. Исследование влияния загромождения каналов компактных теплообменников на их тепло-гидравлические характеристики // *Эпоха науки*. 2016. № 8. С. 186–202.
10. Ремчуков С.С. Анализ способов хранения криогенных топлив на борту долговременных орбитальных средств // 8-й Всероссийский межотраслевой

молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»: сб. аннотаций конкурсных работ. – М.: МАИ, 2016. С. 240-243.

11. Ремчуков С.С. Особенности топливных баков двигательных установок долговременных орбитальных средств на криогенных компонентах топлива, вызванные поддержанием температурного режима // XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2016»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2016. С. 110-111.

12. Пугаченко С.Е., Лангуев А.А., Сорохтин Г.Н., Ремчуков С.С. Использование ресурсов модуля «Заря» для управления орбитальным движением МКС на завершающем этапе полета // Труды XLI Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва: Секция 11. Научные технологии в ракетно-космической технике - М.: ООО ИД «Интервестник», 2017. С. 22-25.

13. Ремчуков С.С. Анализ тепло-гидравлических характеристик пластинчато-ребристых интенсификаторов теплообмена // XLIII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2017»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2017. С. 548-549.

14. Ремчуков С.С. Оптимизация конструкции передней полости лопатки полупетлевой схемы охлаждения с вихревыми интенсификаторами теплообмена // Международный молодежный форум «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией»: материалы форума. - Рыбинск: РГАТУ имени П.А.Соловьева, 2017. С. 67-74.

15. Ремчуков С.С., Ярославцев Н.Л. Оценка влияния матрицы теплообменника на характеристики малоразмерного газотурбинного двигателя // 9-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»: сб. аннотаций конкурсных работ. – М.: МАИ, 2017. С. 62-65.

16. Ремчуков С.С., Ярославцев Н.Л. Получение герметичного шва конверта теплообменника методом подбора режима лазерной сварки // 5-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Прогрессивные технологии и процессы»: сборник научных статей. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 212-214.

17. Ремчуков С.С. Конструктивное совершенствование системы охлаждения лопатки турбины методом калориметрирования // XLIV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2018»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2018. С. 206-207.

18. Ремчуков С. С., Ярославцев Н. Л., Судас С. А., Породнова О. В. Обеспечение герметичности сварного шва конверта пластинчатого теплообменника подбором режима лазерной сварки // 17-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2018. С. 106-107.

19. Ярославцев Н.Л., Ремчуков С.С. Разработка системы охлаждения базового варианта лопатки с компланарными каналами // XIX Всероссийская научно-

техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации»: материалы конференции. - Пермь: ПНИПУ, 2018. Т. 1. С. 367-370.

20. Ремчуков С.С. Верификация методики автоматизированного проектирования и расчета пластинчатого теплообменника // XLV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2019»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2019. С. 796-797.

21. Ремчуков С.С. Методика изготовления пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя с использованием лазерной сварки // VIII Международная научно-техническая конференция «Техника и технология машиностроения»: материалы конференции. – Омск: ОмГТУ, 2019. С. 147-152.

22. Ремчуков С.С., Осипов И.В., Ярославцев Н.Л. Разработка МГТД сложного цикла в классе мощности 200 л.с. // Авиационные двигатели и силовые установки: сб. тезисов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 28 – 30 мая 2019). – М.: ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 2019. С. 19 – 20.

23. Грунин А.Н., Алendarь А.Д., Ремчуков С.С. Расчет теплового состояния форсажной камеры газотурбинного двигателя // XLVI Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2020»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2020. С. 151-152.

24. Ремчуков С.С., Алendarь А.Д., Грунин А.Н. Лазерные технологии в производстве пластинчатых теплообменников малоразмерных газотурбинных двигателей // XLVI Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2020»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2020. С. 996-997.

25. Ремчуков С.С., Лепешкин А.Р., Ярославцев Н.Л. Автоматизированное проектирование, расчет и изготовление пластинчатых теплообменников для газотурбинных установок сложного цикла // III Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики»: материалы конференции. – М.: МЭИ, 2020. С. 655 – 656.