

*На правах рукописи*

Вербанов Иван Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЛАСТИНЧАТЫХ И АДДИТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ  
АППАРАТОВ**

Специальность 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном автономном учреждении  
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»

Научный руководитель: **Лепешкин Александр Роальдович**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры 101 «Проектирование и  
сертификация авиационной техники»  
ФГБОУ ВО «Московского авиационного  
института (национального  
исследовательского университета)»

Официальные оппоненты: **Исаев Сергей Александрович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий лабораторией  
фундаментальных исследований ФГБОУ ВО  
«Санкт-Петербургского государственного  
университета гражданской авиации имени  
Главного маршала авиации А.А. Новикова»  
**Королева Анастасия Павловна**  
кандидат технических наук, руководитель  
группы АНОО ВО «Университет Сириус»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ»

Защита диссертации состоится «\_» \_\_\_\_\_ 2025 г. в \_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при Московском  
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус,  
ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская  
ул., д. 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю  
диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправить электронные  
копии отзывов на электронную почту [kharit@bmstu.ru](mailto:kharit@bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.т.н.

 Харитонов С.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Разработка компактных и лёгких теплообменных аппаратов всегда была, есть и будет актуальной задачей. От массогабаритных и тепло-гидравлических характеристик теплообменных устройств напрямую зависят характеристики многих промышленных и бытовых устройств, летательных аппаратов, станков и пр. поэтому исследования в области создания новых типов теплообменных устройств, методик их проектирования и оптимизации никогда не потеряют свою актуальность.

Развитие авиационных двигателей связано с постоянным ростом параметров рабочего процесса, включая температуру газа перед турбиной. В этих условиях эффективным методом решения задачи является разработка компактных и лёгких теплообменных аппаратов (ТА) для охлаждения горячей части газотурбинных двигателей (ГТД), а также для повышения термодинамической эффективности за счёт использования сложных циклов, включая охлаждение воздуха между ступенями компрессора, повышение температуры воздуха перед камерой сгорания за счёт теплоты газов.

Компактность, лёгкость и эффективность пластинчатых теплообменников, обладающих рядом преимуществ относительно кожухотрубных, позволили им найти широкое применение в авиации, в таких системах как: системы регенерации тепла, промежуточного охлаждения между ступенями компрессора, охлаждения лопаток турбин, топливно-воздушные теплообменники, система обеспечения жизнедеятельности (СОЖ) и др. и, в связи с этим, задача повышения параметров таких теплообменников и для авиационных ГТД остаётся актуальной.

Значительную долю в общих гидравлических потерях теплообменных аппаратов составляют потери в коллекторных системах, непосредственно не связанные с организацией теплообмена. Необходимость обеспечения прочности в коллекторных системах, как правило, приводит к необходимости увеличения толщин стенок в этих элементах теплообменников, что также негативно сказывается на их экономических и массогабаритных характеристиках, особенно актуальных для авиационной техники. Поэтому поиск вариантов более рационального размена гидравлических потерь в коллекторах ТА на тепловую эффективность является актуальной задачей также как оптимизация течений в теплообменных каналах и параметров прочности.

### **Степень научной разработанности проблемы**

В 20-м и в начале 21-го века теплообменные аппараты, как и методы определения их теплогидравлических параметров, получили бурное развитие и стали применяться практически во всех сферах человеческой деятельности. В качестве основного метода многие годы использовались методы, основанные на

аналогиях, разработанные родоначальниками термодинамики: Карно, Рейнольдсом, Клаузиусом, Нуссельтом и др. Экспериментально изучалось огромное количество конструкций интенсификаторов теплообмена, наработан колоссальный экспериментальный опыт, который отражен в статьях и книгах: А.Л. Лондона, А.А. Жукаускаса, А.И. Леонтьева, А.В. Дедова, Б.С. Петухова, Л.Г. Генина, С.А. Ковалева, Ю.А. Кузма-Кичта, С.А. Исаева, Л.М. Коваленко, Н.В. Барановского, В.М. Кэйса, А.Л. Емельянова, Е.В. Кожевникова, С.С. Кутателадзе, П.И. Бажан и др.

Исследованию вопросов применения теплообменных аппаратов в авиации посвящены работы ведущих ученых, таких как: Г.А. Дрейцер, Э.К. Калинин, А.Б. Агульник, А.Н. Антонов, Ю.Ф. Баранов, Б.М. Митин, Т.И. Васильев, А.И. Худяков и др.

Накопленный опыт в исследовании свойств течений систематизировался в коммерческие программные комплексы такие как ANSYS, OpenFOAM, COMSOLmultiphysics, STARCCM+. Есть и отечественные разработки, такие как FlowVision, Логос. Использование программных комплексов численного моделирования физических процессов позволяет значительно сократить временные и финансовые затраты на получение конкретных результатов. Двумя факторами, определяющими скорость получения результатов при сложившемся подходе к теплогидравлическим расчётам, являются располагаемые вычислительные мощности и совершенство программного кода.

Однако есть способы, позволяющие даже в условиях наличия ограниченных вычислительных мощностей решать достаточно объёмные задачи по оптимизации ТА путём упрощения модели, а именно сведением задачи к расчёту элементарных ячеек, как правило периодически повторяющихся у любой теплообменной поверхности. Данные подходы требуют валидации расчётных методов с экспериментами, учёта локальных эффектов и тонкой настройки параметров расчёта. Они позволяют формировать базы решений, использование которых в дальнейшем помогает избегать громоздких вычислений и пользоваться более простыми инженерными методиками. Из описанного выше вытекают задачи расчётно-экспериментальных исследований элементарных ячеек.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов расчётно-экспериментального определения теплогидравлических характеристик пластинчатых и аддитивных теплообменных аппаратов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Создание параметризованных моделей элементарных ячеек в CAD пакете.
2. Адаптация методов расчётов и экспериментального подтверждения теплогидравлических характеристик пластинчатых поверхностей ТА.

3. Формирование баз данных критериальных зависимостей путём численного моделирования теплообменных каналов с различными геометрическими параметрами, состоящих из минимального и при этом достаточного числа элементарных ячеек;

4. Сравнительный анализ различных типов пластинчатых теплообменных поверхностей (на примере подбора параметров регенератора для малоразмерного ГТД);

5. Обобщение комплексного подхода к расчётно-экспериментальным исследованиям пластинчатых теплообменных поверхностей. Поиск наиболее совершенных перспективных геометрических форм теплообменных поверхностей с учётом возможности применения для их производства аддитивных технологий.

**Объект исследования** – пластинчатые и аддитивные теплообменные аппараты.

**Предмет исследования** – теплогидравлические характеристики пластинчатых и аддитивных теплообменных аппаратов.

**Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:**

1. Разработан метод расчёта пластинчатых теплообменных аппаратов с учётом краевых эффектов с помощью элементарных ячеек. Оценено влияние нестационарности течения на точность расчётов.

2. Разработаны методы экспериментального определения тепловых характеристик пластинчатых теплообменных поверхностей с помощью тепловизирования или наблюдения за цветовым откликом нанесённых на исследуемую поверхность электрообогреваемого единичного конверта термохромных жидких кристаллов.

3. По результатам экспериментов получены эмпирические зависимости теплогидравлических характеристик для микрохолмистой и гофрированной пластинчатых теплообменных поверхностей. С помощью многопараметрических численных исследований сформирована база данных теплогидравлических характеристик элементарных ячеек пластинчатых теплообменных поверхностей.

4. Предложены более перспективные, чем пластинчатые и трубчатые, геометрические формы теплообменных поверхностей, в том числе с учётом возможности применения для их производства аддитивных технологий.

**Теоретическая и практическая значимость результатов**

**Теоретическая значимость** исследования заключается в разработке базы данных критериальных зависимостей теплогидравлических характеристик пластинчатых теплообменных аппаратов, полученных из 3D-расчетов элементарных ячеек теплообменных каналов с оценкой влияния нестационарных и краевых эффектов.

**Практическую значимость** составляют:

- метод расчётно-экспериментального исследования теплогидравлических характеристик теплообменных поверхностей пластинчатых ТА различной формы и геометрических параметров на единичном модельном электрообогреваемом конверте, в том числе теплового состояния с использованием тепловизионной съёмки и термохромных жидких кристаллов. Метод позволяет формировать эмпирические критериальные зависимости и валидировать соответствующие численные расчёты;

- основы проектирования теплообменных аппаратов с взаимно пористой структурой, изготавливаемых по аддитивной технологии.

Результаты исследований использовались в работах по формированию облика малоразмерных ГТД. Разрабатываемые автором экспериментальные методики внедрены в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского».

### **Достоверность результатов**

В расчётах использовались известные математические соотношения и физические законы, численные методы. В программе расчёта полноразмерного теплообменника использовались итерационные процедуры. При экспериментальных исследованиях использовались апробированные способы измерения давлений (пьезометры). Температуры рабочего тела измерялись термопарами и термисторами. Поверхностные распределения температур измерялись с использованием термо-хроматических жидких кристаллов и тепловизионной съёмки. Измерение расходов осуществлялось турбинными датчиками расхода при высоких значениях расхода и мерными шайбами при малых расходах.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения в газотурбостроении», (Москва, 2015); Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века», (Москва, 2015); Всероссийская конференция «Измерения. Испытания. Контроль», (Москва, 2018); 17-я международная конференция «Авиация и космонавтика», (Москва, 2018); Научно-техническая конференция «Динамика, прочность, надёжность газотурбинных двигателей», посвящённая 100-летию со дня рождения И.А. Биргера, (Москва, 2019); 34-я Международная конференция по взаимодействию интенсивных потоков энергии с веществом - ELBRUS 2019, (п. Эльбрус, 2019); XXII школа-семинар молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», (Москва, 2019) ; Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов «Авиационные

двигатели и силовые установки», (Москва, 2019) ; 35-я международная конференция по уравнениям состояния вещества, (п. Эльбрус, 2020); III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики», (Москва, 2020), Симпозиум «Перспективы развития ВРД, комбинированных, гибридных и электрических силовых установок» на Научно-техническом конгрессе по двигателестроению (НТКД-2022) в рамках Международного форума двигателестроения (Москва, 2022), Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование процессов в современных морских транспортных системах», (Санкт-Петербург 2024).

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- Метод формирования баз данных расчетных теплогидравлических характеристик теплообменных каналов теплообменных аппаратов с использованием критериальных зависимостей, полученных CFD расчётами элементарных ячеек с оценкой краевых и нестационарных эффектов.
- Результаты теплогидравлических испытаний конвертов модельных пластин теплообменных аппаратов и визуализация распределения температуры по их поверхности при электрообогреве конвертов и внутреннем протоке рабочего тела.
- Технический облик и рациональные параметры регенератора для малоразмерного ГТД.
- Облик перспективных теплообменных аппаратов, изготавливаемых по аддитивным технологиям.

#### **Личный вклад соискателя**

Соискатель проанализировал литературные источники, посвященные теплообменным аппаратам, с целью выбора наиболее перспективных направлений.

Провёл патентный обзор новых решений в области новых конструкций теплообменников, в том числе изготавливаемых по аддитивной технологии.

Разработал подход к формированию баз данных критериальных зависимостей для гофрированной и микрохолмистой теплообменных поверхностей при различных параметрах геометрии элементарных ячеек.

Разработал оригинальный метод экспериментального исследования теплогидравлических характеристик теплообменного конверта с использованием тепловизионной аппаратуры и термо-хроматических жидких кристаллов (ТЖК).

Самостоятельно разработал и апробировал метод тарировки ТЖК в условиях эксперимента.

Представил вариант учёта влияния краевых эффектов при течении в межпластинном пространстве на теплогидравлические характеристики, влияние геометрии входа/выхода в и из межгофрового пространства, расчётными методами проанализировал влияние нестационарности течений на точность расчётов.

Получил результаты многопараметрических расчётов и выбора конструкции теплообменника на примере регенератора для малоразмерного ГТД.

Организовал и провёл экспериментальные исследования тепло-гидравлических характеристик теплообменных конвертов с использованием тепловизионной аппаратуры и термо-хроматических жидких кристаллов. Валидировал полученные расчётным путём коэффициенты критериальных зависимостей, позволяющие осуществлять многопараметрическую оптимизацию теплообменников ГТД.

Разработал и запатентовал систему охлаждения многоконтурной газотурбинной установки с перспективным теплообменным аппаратом, изготавливаемым по аддитивной технологии.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, из них 5 в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, и 3 в изданиях, рецензируемых международными системами цитирования Web of Science и/или Scopus., 1 патент, 2 публикации в других изданиях, 4 материала и 8 тезисов докладов всероссийских и международных научных конференций.

### **Структура и объём работы**

Диссертация изложена на 179 страницах и состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и 6-ти приложений. Работа включает в себя 103 рисунка, 7 таблиц. Список литературы содержит 135 источников.

### **Содержание работы**

**Во введении** показана теоретическая и практическая значимость работы. Представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту, а также охарактеризован личный вклад автора в работе над диссертацией.

**В первой главе** описывается история развития теплообменных аппаратов. Приводятся примеры использования теплообменных аппаратов в промышленности, быту и авиации. Кратко рассматриваются конструкции теплообменных аппаратов авиационных ГТД. Представлен обзор патентов и проектов авиационных двигателей сложных термодинамических циклов с использованием ТА. Проведён патентный обзор актуальных конструкций теплообменников, изготавливаемых как традиционными методами, так и с использованием аддитивных технологий.

Показано что технологии оптимального по затратам ресурсов проектирования теплообменных устройств в авиационной технике развиваются бурными темпами и задачи модернизации методов расчётов и испытаний остаются актуальными.

По результатам анализа состояния проблемы в первой главе формируются цель и задачи исследования.

**Во второй главе** представлен результат расчётных исследований каналов пластинчатых теплообменных аппаратов. В частности, проведена первичная валидация CFD моделей по ранее известным результатам, разработан метод параметрического построения расчётных моделей для течения воздуха в межпластинном пространстве для различных геометрических форм образующих поверхностей, проанализирована феноменология течений в межгофровом пространстве при различных углах перекрещивания и относительных высотах гофр. Характерный вид распределения скоростей в ячейке представлен на Рисунке 1.

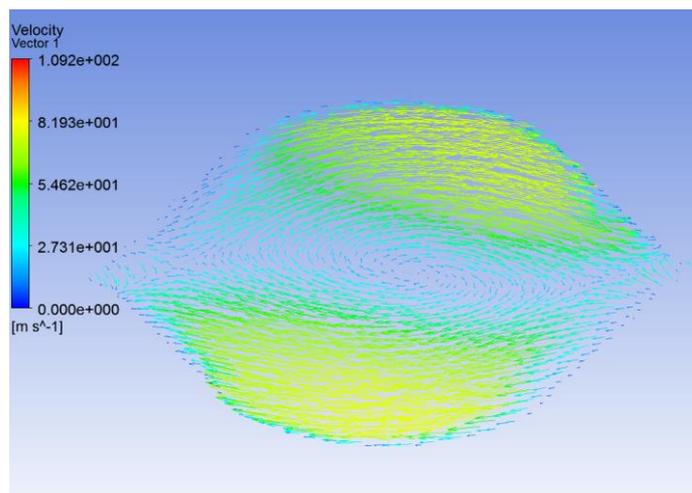


Рисунок 1. Распределение скорости в сечении гофра перпендикулярном главному направлению течения (ГНТ) для  $Re=3200$

В главе описан вариант учёта расчётными методами влияния краевых эффектов при течении в межпластинном пространстве на теплогидравлические характеристики, влияние геометрии входа/выхода в/из межгофрового пространства, проанализировано влияние не стационарности течения. Изучены локальные особенности течений в межпластинном пространстве для различных вариантов геометрий пластинчатых каналов и влияние на них геометрических параметров и режимов течения.

При анализе эффективности гофрированных ТА с точки зрения теплогидравлики были выявлены недостатки гофрированных пластин, такие как: неравномерность вытяжки по осям, существенная неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи, концентрации напряжений в точках контакта. Попытки устранить недостатки при сохранении достоинств и поиск лучшего решения как с позиции технологичности, так и с позиции прочностных и теплогидравлических характеристик привели к формированию нового типа пластин - микрохолмистых.

Был проведен анализ течений в межпластинном пространстве микрохолмистой теплообменной поверхности (МХТП) и проведено сравнение с гофрированной теплообменной поверхностью (ГТП). Результаты представлены на Рисунке 2.

Расчётные исследования показали, что в микрохолмистом теплообменном канале при аналогичных массе и габаритах в изученном ряде случаев удается достичь лучшей теплопередачи при снижении гидрпотерь по сравнению с гофровым каналом. Создан метод расчёта параметров штампа для микрохолмистой поверхности под сворачивание теплообменника в спираль для оптимального заполнения объёма кольцевого канала пластинами.

Характерный размер при расчёте числа  $Re$  определяется по формуле:

$$d_r = \frac{4V}{F_{то}}, \quad (1)$$

где  $V$  – объём занимаемый теплоносителем в элементарной ячейке, а  $F_{то}$  – площадь теплообмена в элементарной ячейке.

Уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления МХТП по сравнению с ГТП достигает 30% в области ламинарного и переходного течения. В области развитого турбулентного течения ( $Re=3000...7000$ ) этот положительный эффект уменьшается и составляет 15...8% соответственно. Увеличение критерия Нуссельта  $Nu$  при переходе от ГТП к МХТП во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса  $Re$  составляет 16...17 %. Таким образом, расчетные исследования показывают, что при использовании сходных по некоторым геометрическим параметрам МХТП и ГТП удастся достичь лучшей теплоотдачи при меньших гидравлических потерях.

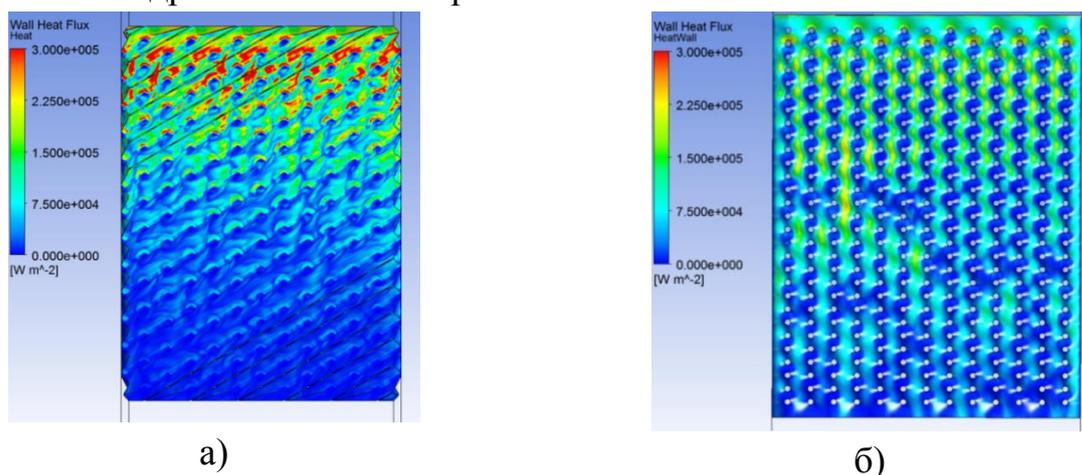


Рисунок 2. Распределение тепловых потоков на поверхностях пластин различного вида: а) - ГТП, б) - МХТП

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию пластинчатых теплообменных поверхностей. Электрический нагрев является одним из способов

управляемого задания теплового потока на теплообменной поверхности. Схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 3. Фотографии исследуемых пластин представлены на Рисунке 4.

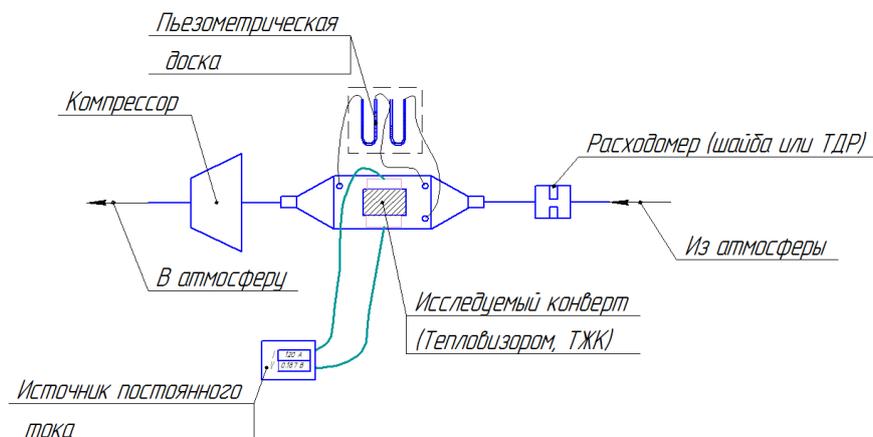
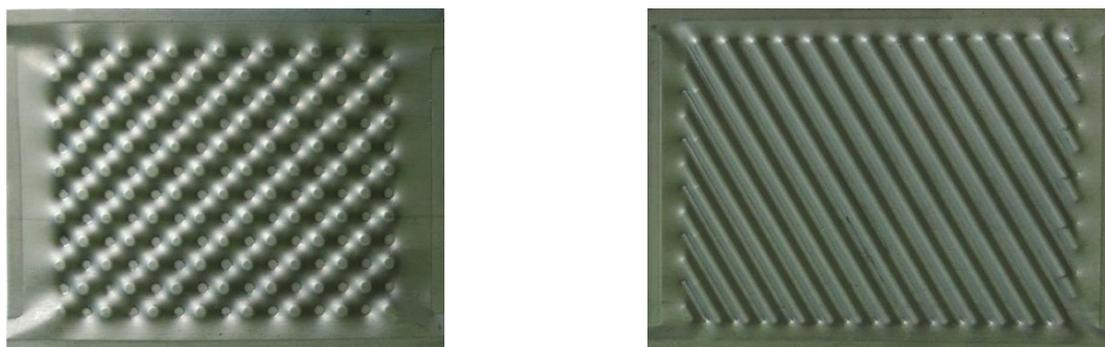


Рисунок 3. Схема установки экспериментального исследования полей температуры на конверте пластин



а)

б)

Рисунок 4. Фотографии микрохолмистой и гофрированной теплообменных поверхностей: а) - МХТП, б) - ГТП

Получение информации о распределении температуры поверхности в эксперименте осуществлялось с использованием тепловизионной аппаратуры и листов термо-хроматических жидких кристаллов как показано на Рисунке 5.

В главе описан метод тарировки цветового отклика ТЖК в условиях эксперимента по показаниям термопары. На Рисунке 6 представлены результаты тепловизионной съёмки.

Представлен проектный расчёт установки для исследований поверхностного распределения температур по электрообогреваемому конверту пластинчатого теплообменника с внутренним протоком воздуха. Проведен сравнительный анализ результатов CFD-расчетов и эксперимента для испытанных вариантов микрохолмистой и гофрированной пластин.

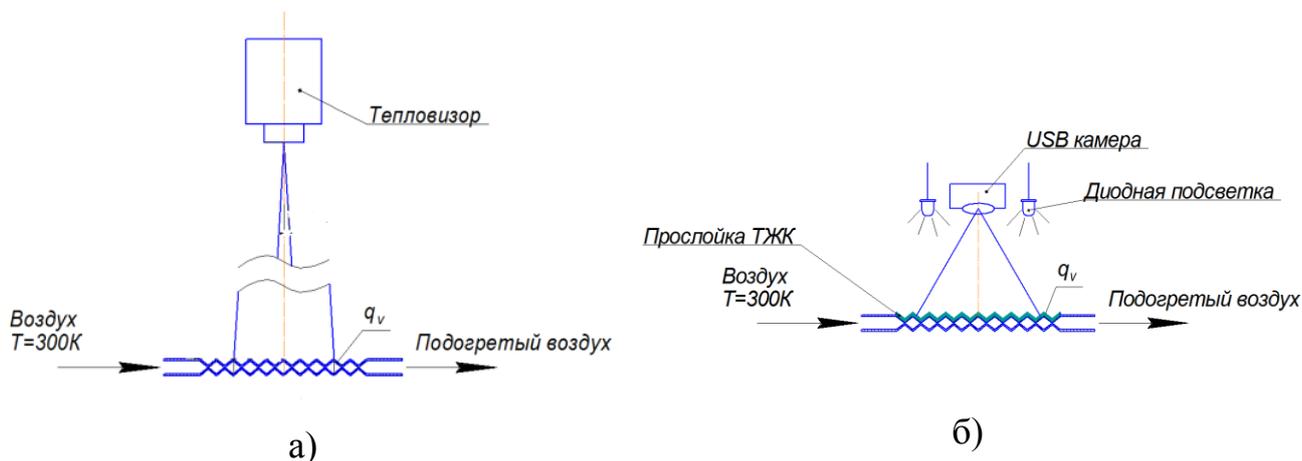


Рисунок 5. Схемы анализа распределений температур: а) - тепловизирувание, б) - наблюдение за цветом ТЖК

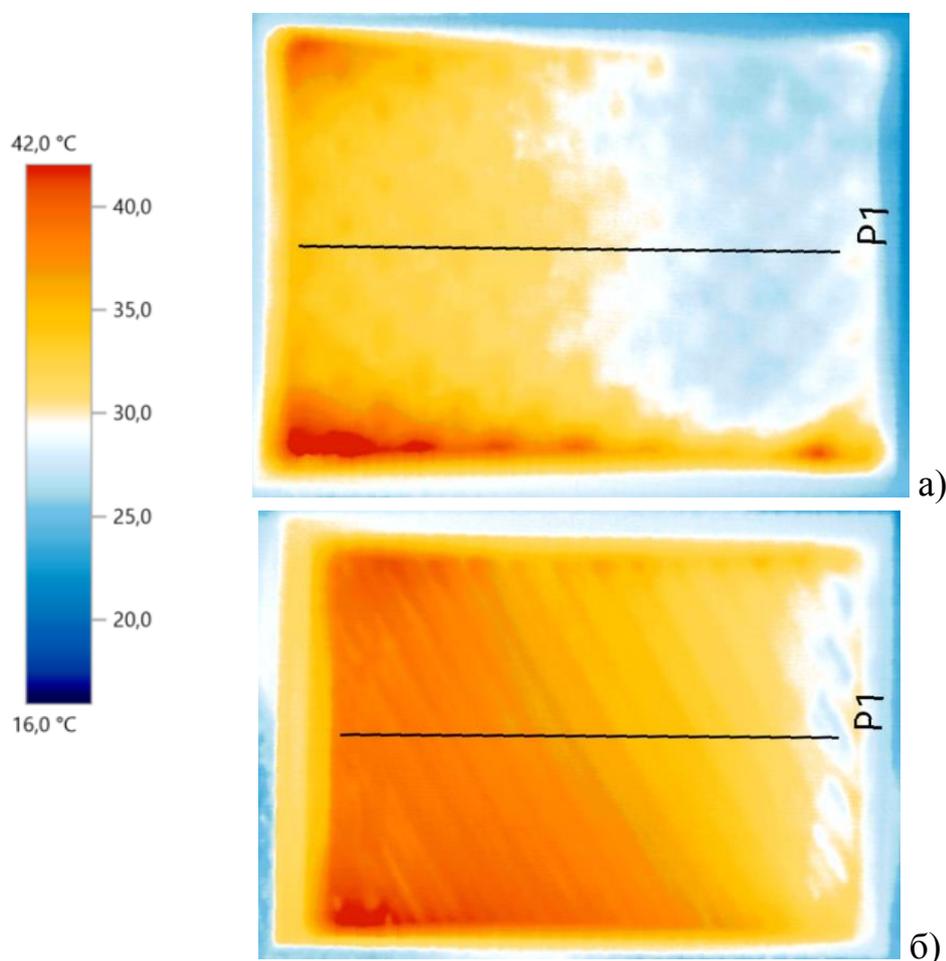


Рисунок 6. Характерное тепловизионное распределение температур на пластинах при испытаниях на  $Re_h = 2000$  с характерной линией P1, по которой проводилось осреднение температуры: а) - МХТП, б) - ГТП

Экспериментально получены критериальные зависимости для микрохолмистой и гофрированной пластин. Валидационное сравнение

экспериментальных и расчетных теплогидравлических характеристик микрохолмистой и гофрированной поверхностей в виде  $Nu_h(Re_h)$  и  $Eu(Re_h)$  показано на Рисунке 7.

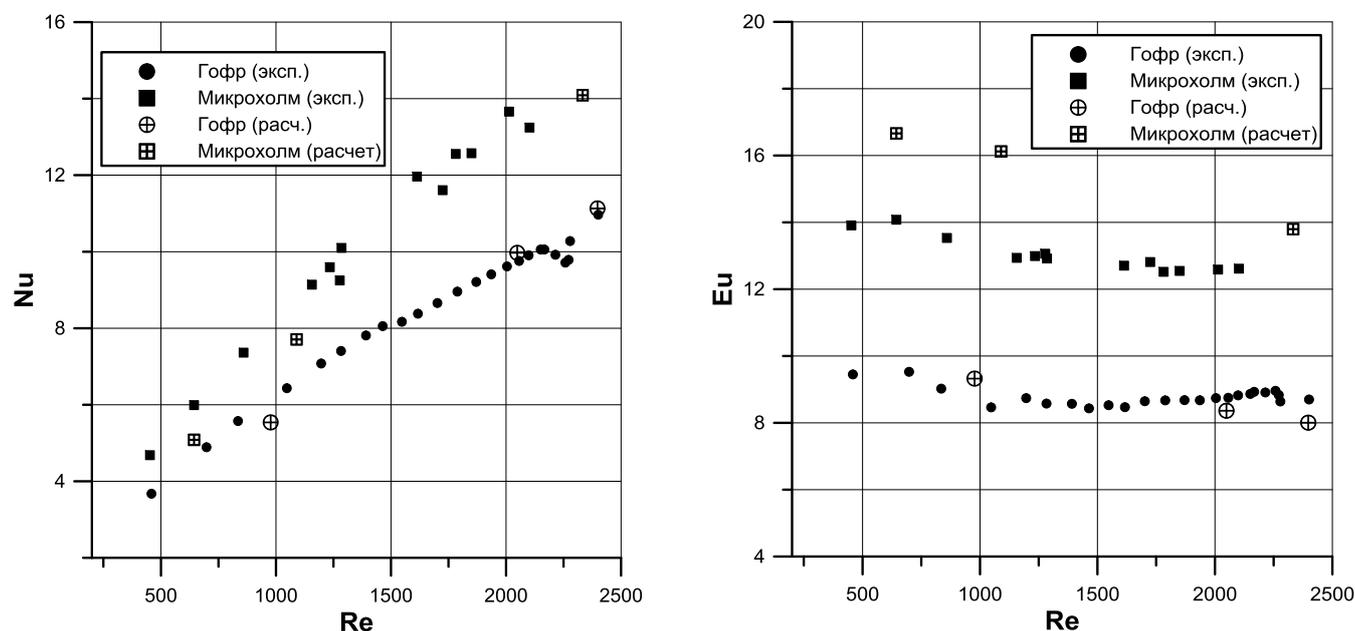


Рисунок 7. Валидация 3D-расчета теплогидравлических характеристик по экспериментальным данным

Коэффициенты критериальных эмпирических зависимостей типа

$$Nu_h = A \cdot Re_h^B \quad (2)$$

$$Eu = C \cdot Re_h^D \cdot L, \quad (3)$$

где  $L$  –общая длина пластины теплообменной матрицы в направлении течения, приведённая к 1 м,  $A, B, C, D$  - коэффициенты,  $Re = v * h * \rho / \mu$  – число Рейнольдса, приведенное к высоте гофра или холма. Зависимости были единообразно получены на базе валидированных расчётных 3D-моделей и использовались при проектировании.

Как видно на Рисунке 7, экспериментально полученные значения числа Эйлера для микрохолмистой пластины при малых числа Рейнольдса оказались на 10..15 % ниже расчётных, при том значения критерия  $Nu$  оказались в среднем на 3..4 % выше. Расхождение является приемлемым для теплотехнических расчётов. Коэффициенты зависимостей представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициенты критериальных зависимостей для различных теплообменных поверхностей, полученные в численном эксперименте.

Тип пов-ти и гл. угол в элем. ячейке	Высота канала, мм	Шаг по потоку, мм	Шаг, поперек потока, м	A	B	C	D
Гофр 60°	1,6	4,8	2,66	0,0949	0,6629	1346	-0,446
Гофр 120°	1,6	2,66	4,8	0,4411	0,5092	692,1	-0,093
Микрохолм 90°	1,6	4,71	4,71	0,0251	0,8093	88,9	-0,078
Микрохолм 60°	1,6	6,2	3,58	0,3666	0,49	71,2	-0,302
Микрохолм 120°	1,6	3,58	6,2	0,1774	0,6029	53,2	-0,134

Полученные коэффициенты валидированных критериальных зависимостей позволяют осуществлять оптимизацию теплообменников.

**В четвёртой главе** представлен метод формирования баз данных для гофрированной и микрохолмистой теплообменных поверхностей при различных параметрических описаниях их геометрической формы. Показан пример проектирования полноразмерных теплообменных аппаратов по имеющимся критериальным зависимостям для элементарных ячеек с использованием авторской программы теплогидравлического расчета.

Проведены многопараметрические расчёты и подбор варианта конструкции теплообменника на примере регенератора для малоразмерного ГТД. Значения основных параметров представлены в Таблице 2. В ней тепловая эффективность рассчитывалась как:

$$Eff = \frac{T_{ГВХ} - T_{ГВЫХ}}{T_{ГВХ} - T_{ХВХ}}, \quad (4)$$

где  $T_{ГВХ}$  – температура горячего воздуха на входе,  $T_{ГВЫХ}$  – температура горячего воздуха на выходе,  $T_{ГВХ}$  – температура горячего воздуха на входе,  $T_{ХВХ}$  – температура холодного воздуха на входе.

Характерные рассмотренные варианты геометрических форм теплообменных пластин представляются в таблице, а поведение Парето-фронта в координатах «суммарные гидравлические потери – тепловая эффективность» при ограничении массы (до 15 кг) и геометрических характеристик кольцевого канала (диаметры 0.25..0.6 м, ширина блока не более 13 см) для данных вариантов представлено на Рисунке 8.

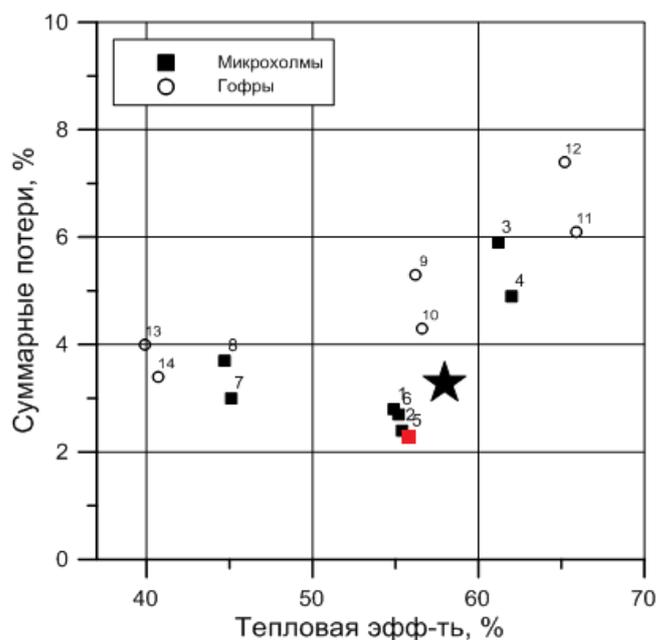


Рисунок 8. Теплогидравлические характеристики проектируемого теплообменника с различными вариантами теплообменных пластин (метки точек – расчётные номера вариантов),  
 ■ - вариант обеспечивающий минимальные суммарные потери,  
 ★ - окончательно выбранный вариант,)

Комплексный подход к расчётно-экспериментальным исследованиям показан на примере пластинчатых теплообменных поверхностей путём получения теплогидравлических характеристик элементарных ячеек. Данный подход применим в том числе к элементарным ячейкам теплообменных аппаратов, изготавливаемых по аддитивной технологии. Примеры показаны на Рисунке 9.



а)



б)

Рисунок 9. Образцы аддитивных ТА – демонстраторов технологии:  
 а) - AlSi10Mg б) - Фотополимер

В главе продемонстрирована применимость методического подхода расчёта элементарных ячеек к взаимно-пористым ячейкам аддитивных теплообменных аппаратов. Представлены первые образцы ТА – демонстраторы технологии с взаимно-пористой теплообменной структурой и древовидными каналами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны параметризованные модели элементарных ячеек теплообменных поверхностей в САД пакетах.

2. Проведена адаптация методов расчётов и экспериментального подтверждения теплогидравлических характеристик пластинчатых поверхностей ТА. Учтены краевые эффекты при течении в межпластинном пространстве, влияния геометрии входа/выхода в и из межгофрового пространства на гидравлические потери. Проанализировано влияние нестационарности течений на точность расчётов, составившее не более 10% по потерям давления и 5% по перепадам температур.

3. Сформирована база данных критериальных зависимостей путём численного моделирования теплообменных каналов с различными геометрическими параметрами (более 40 вариантов геометрий), состоящими из минимального и при этом достаточного числа элементарных ячеек при различных параметрах геометрических форм.

4. Получены результаты многопараметрических расчётов и выбора конструкции теплообменника на примере регенератора для малоразмерного ГТД, обеспечивающего суммарные гидравлические потери менее 2.3 % и тепловую эффективность более 55.8%.

5. Обобщены подходы к расчётно-экспериментальным исследованиям пластинчатых теплообменных поверхностей. Разработан метод экспериментального исследования тепло-гидравлических характеристик теплообменной поверхности с использованием тепловизионной аппаратуры и ТЖК. Получены и валидированы коэффициенты критериальных зависимостей, позволяющие осуществлять многопараметрический расчёт теплообменников. Изготовлен аддитивный ТА-демонстратор системы охлаждения многоконтурной газотурбинной установки, конструкция которого защищена патентом.

### **Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:**

1. Вербанов И.С. Визуализация полей температур в модельных пластинчатых теплообменных элементах // Прикладная физика и математика. 2018. №5. С. 3-8. (0.68 п.л.)

2. А. Л. Светлаков, И. А. Гулимовский, И. С. Вербанов, Д. В. Маслова. Теплообменники на базе поверхностей Шварца типа Р, адаптированные к аддитивному производству. // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97, №3. С. 608-618. (0.2 п.л./0.63 п.л.)

3. Система охлаждения многоконтурной газотурбинной установки: а.с. 2680636 РФ / И.С. Вербанов, И.А. Гулимовский; заявл. 14.05.2018; опубл. 25.02.2019. Бюлл.№ 6. (0.5 п.л./ 0.9 п.л.)

4. Verbanov I.S., Gulimovskiy I.A., Svetlakov A.L., Lepeshkin A.R. Comparative analysis of the results of experimental and numerical studies of thermal and

hydraulic characteristics of microhilly and corrugated plate surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1683. 022104. (0.15 п.л./0.35 п.л.)

5. Lepeshkin A.R., Verbanov I.S., Ilinskaya O.I., Fetisov M.V. et al. Investigations of heat exchanger elements at tests // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1683. 022107. (0.1 п.л./ 0.25 п.л.)

6. Вербанов И.С., Гулимовский И.А. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и численных исследований теплогидравлических характеристик микрохолмистой и гофрированной пластинчатых поверхностей // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. 2018. №11. С. 20-24. (0.28 п.л./0.56 п.л.)

7. Гулимовский И.А., Вербанов И.С., Светлаков А.Л. Численное исследование теплогидравлических характеристик микрохолмистой и зигзагообразной поверхностей повышенной турбулентности // Промышленная энергетика. 2018. №3. С. 26-31. (0.25 п.л./0.68 п.л.)

8. Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Волков С.А., Волков М.Е., Чепурнов В.Ж., Вербанов И.С., Заикин С.В., Белов С.В. Перспективные применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных ГТД и ПВРД // Вестник Самарского Университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Том 18, №3. С. 81-98. (0.15 п.л./ 1.1 п.л.)

9. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Вербанов И.С. и др. Методика исследований элементов теплообменников с использованием индукционного нагрева // Промышленная энергетика. 2020. №12. С. 17-21. (0.05 п.л./0.25 п.л.)

10. Светлаков А.Л., Вербанов И.С., Маслова Д.В. и др. Развитие методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения // Авиационные двигатели. 2019. 4(5). С. 37-44. (0.15 п.л./0.44 п.л.)

11. Вербанов И.С., Гулимовский И.А. Расчетные исследования теплообменных пластинчатых поверхностей для перспективных авиационных силовых установок // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2017-2018). М.: ЦИАМ, 2018. С. 99-101. (0.06 п.л./0.12 п.л.)

12. Вербанов И.С., Гулимовский И.А. Расчёт и проектирование элементов перспективных теплообменных поверхностей, изготовленных по аддитивной технологии // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2017-2018). М.: ЦИАМ, 2018. С. 101-103. (0.06 п.л./ 0.12 п.л.)

13. Вербанов И.С. Нестационарные течения в теплообменных поверхностях Френкеля // Новые решения и технологии в газотурбиностроении.: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. 2015. С. 132-133. (0.12 п.л.)

14. Вербанов И.С. Современные теплообменные аппараты в авиационной технике // Авиация и космонавтика.: Тез. докл. Международн. конф. Москва. 2018. С. 67-68. (0.12 п.л.)

15. Вербанов И.С., Светлаков А.Л., Маслова Д.В. и др. Применение 3D моделирования в разработке высокоэффективных теплообменных аппаратов // Авиадвигатели XXI.: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. С. 50-51. (0.04 п.л./ 0.12 п.л.)

16. Вербанов И.С., Лепешкин А.Р. Расчётно-экспериментальные исследования пластинчатых теплообменников // Проблемы газодинамики и

теплообмена в энергетических установках.: Тез. докл. школа-семинар. Москва. 2019. С. 213-215. (0.1 п.л./ 0.18 п.л.)

17. Лепешкин А.Р., Вербанов И.С., Ильинская О.И. и др. Моделирование теплового состояния охлаждаемых деталей ГТД и теплообменников при испытаниях // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках.: Тез. докл. школа-семинар. Москва. 2019. С. 215-216. (0.02 п.л./ 0.125 п.л.)

18. Вербанов И.С. Перспективные теплообменные аппараты авиационных ГТД // Авиационные двигатели и силовые установки.: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. С. 38. (0.06 п.л.)

19. Вербанов И.С., Светлаков А.Л., Лепешкин А.Р. Снижение шероховатости поверхностей и испытания на герметичность теплообменных аппаратов, изготавливаемых по аддитивной технологии // Энерго и ресурсосбережение – XXI век.: Материалы Международн. конф. Орёл. 2019. С. 149-153. (0.15 п.л./ 0.25 п.л.)

20. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Вербанов И.С. и др. Комплексные исследования ресурсосберегающей электротехнологии нанесения разных теплостойких слоев для теплонапряженных деталей турбин ГТД // Энерго и ресурсосбережение – XXI век.: Материалы Международн. конф. Орёл. 2019. С. 119-124. (0.06 п.л./ 0.31 п.л.)

21. Вербанов И.С., Гулимовский И.А., Лепешкин А.Р. Численные и экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик микрохолмистой и гофрированной пластинчатых поверхностей // Современные проблемы теплофизики и энергетики.: Материалы Международн. конф. 2020 г. Москва. 2020. С. 50-51. (0.05 п.л./ 0.12 п.л.)

22. Лепешкин А.Р., Вербанов И.С., Ильинская О.И. и др. Исследования элементов теплообменников при испытаниях // Современные проблемы теплофизики и энергетики.: Материалы Международн. конф. 2020 г. Москва. 2020. С. 168-169. (0.03 п.л./ 0.12 п.л.)

23. Вербанов И.С. Настоящее и будущее в проектировании теплообменных аппаратов // Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом.: Тез. докл. Международн. конф. Эльбрус. 2019. С. 287. (0.06 п.л.)

24. Вербанов И.С., Лепешкин А.Р., Светлаков А.Л. Влияние гидроабразивной и электролитно-плазменной обработки на шероховатость поверхностей теплообмена, изготовленных с применением аддитивной технологии // Уравнения состояния вещества.: Тез. докл. Международн. конф. Эльбрус. 2020. С. 197. (0.05 п.л./0.06 п.л.)

Подписано в печать: 22.04.2025  
Заказ № 20730. Тираж 100 экз.  
Бумага офсетная. Формат 60x90/16.  
Типография «Автореферат.ру»  
ОГРНИП 320774600073831  
119313, Москва, ул. Марии Ульяновой, д.3, к.1  
(977) 518-13-77 (499) 788-78-56  
[www.avtoreferat.ru](http://www.avtoreferat.ru)      [riso@mail.ru](mailto:riso@mail.ru)

