

*На правах рукописи*



**Попова Татьяна Валерьевна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА  
И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА  
ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТД С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

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

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

Официальные оппоненты: **Кузма–Кичта Юрий Альфредович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор.  
**Модорский Владимир Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), заместитель декана.

Ведущая организация – **ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»**

Защита состоится «05» декабря 2016 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <http://www.mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.125.08  
д. т. н., профессор

Зуев  
Юрий Владимирович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Проблема повышения эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) связана с фактом неуклонного роста требований к экономичности авиационных двигателей и энергетических установок. Согласно экономической стратегии в России на период до 2030 г., внутренний спрос на топливно-энергетические ресурсы к 2030 г. вырастет в 1,6–1,7 раза по отношению к уровню 2005 г. Особенно актуальна данная проблема для малоразмерных ГТД. Улучшение экономичности ГТД возможно за счет регенерации тепла.

В настоящее время роль малоразмерных ГТД в энергетической и авиационной отрасли значительно расширяется. Наибольшее распространение они получили при решении задач малой энергетики. Также малоразмерные ГТД имеют большие перспективы использования в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА).

Вместе с тем эффективность регенерации тепла в значительной мере зависит от теплообменных аппаратов. Применение в малоразмерных ГТД с регенерацией тепла пластинчатых теплообменных аппаратов позволяет существенно снизить массу и габариты малоразмерного ГТД в целом.

Одним из наиболее эффективных методов повышения экономичности и эффективности ГТД с регенерацией тепла является интенсификация процессов теплообмена. Данный метод позволяет снизить габариты теплообменного оборудования и, соответственно, его стоимость.

Создание ГТД с приемлемыми массогабаритными и эксплуатационными показателями требует дальнейшего совершенствования методов расчета и проектирования компактных теплообменных аппаратов, а также анализа условий рационального согласования параметров теплообменного аппарата и двигателя. Особое значение имеет технология изготовления, поскольку от нее зависят параметры эффективности теплообменного аппарата.

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблеме разработки методики проектирования, расчета и изготовления теплообменных аппаратов и интенсификации теплообмена посвящено значительное количество исследований, в том числе численными методами, выполненных в нашей стране и за рубежом. Среди множества работ, посвященных данной проблеме, можно выделить исследования, проведенные Э.К. Калининым, Г.А. Дрейцером, И.З. Коппом, Б.С.Петуховым, Л.Г. Гениным, С.А. Ковалевым, С.А. Ярхо, Г.П. Нагогой, Ю.А. Кузма-Кичтой, К.С. Егоровым, В.Я. Модорским и др.

В данных работах рассматривается интенсификация теплообмена в трубчатых теплообменных аппаратах, процессы теплопроводности с внутренними источниками тепла; освещены вопросы конвективного теплообмена и гидрогазодинамики при движении в трубах, приводится анализ экспериментальных данных и рекомендации.

Работы ведущих ученых: Л.М. Коваленко, А.Р. Ястребенецкого, Н.В. Барановского, А.Ф. Савостина, А.М. Тихонова, В.М. Кэйса, А.Л. Лондона,

А.А. Жукаускаса, О.В. Жаднова, Г.А. Евсеева, А.Л. Емельянова, Е.В. Кожевникова и др. – посвящены проблемам создания эффективных пластинчатых теплообменных аппаратов. В этих трудах рассматриваются вопросы гидродинамики и конвективного теплообмена в потоках газов и различных жидкостей. Представлены данные теоретических и экспериментальных исследований конвективного теплопереноса. Даны практические рекомендации по тепловому и гидродинамическому расчету теплообменных аппаратов.

Несмотря на множество исследований, проведенных в данной области, остается открытым вопрос о совершенствовании методики проектирования, расчета и изготовления путем интеграции существующих знаний с учетом современных возможностей компьютерной техники и производства.

Основным недостатком существующих методов разработки являются большие затраты времени на проведение этих этапов. Решением данной проблемы может быть использование трехмерных программ расчета и проектирования, позволяющих объединить некоторые из этапов исследования, тем самым сократить время и учесть большее количество факторов влияния на процесс, представить результаты расчета в наглядном виде (поля скоростей, температур, давлений).

В современной научной литературе, посвященной исследованиям теплообменных аппаратов, часто не реализуется такой комплексный подход к изучению факторов, влияющих на процессы в теплообменном аппарате. Для совершенствования конструкции и повышения эффективности необходимо более точно представлять процессы, происходящие внутри исследуемого объекта, и учитывать все факторы, в том числе конструкционные и технологические, влияющие на исследуемые процессы в комплексе.

**Целью** настоящей научной работы является разработка методики расчета, проектирования и технологии изготовления пластинчатых теплообменных аппаратов для газотурбинных установок с регенерацией тепла.

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

- Проведение анализа конструкций теплообменных аппаратов для определения рационального выбора теплообменной поверхности.
- Определение геометрических параметров теплообменной поверхности для достижения оптимальных соотношений теплогидравлических характеристик.
- Определение технологических ограничений геометрических параметров теплообменной поверхности и выбор технологии производства теплообменного аппарата.
- Разработка алгоритма методики проектирования, расчета и изготовления теплообменного аппарата.
- Разработка геометрических моделей теплообменной поверхности и оснастки для изготовления теплообменного аппарата с использованием методов параметризации.
- Разработка алгоритма трехмерного численного расчета параметров пластинчатого теплообменника и его верификация.

- Разработка программы аналитического расчета, путем выполнения расчетного исследования и получения критериальных зависимостей.

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

1. Разработана методика, позволяющая сократить время на проектирование теплообменного аппарата для существующих схем малоразмерных ГТД.

2. Разработаны параметризованные геометрические модели пластины и оснастки теплообменного аппарата, а также теплоносителей. Данные модели учитывают технологические ограничения, и при изменении размеров пластины теплообменного аппарата автоматически формируются модели оснастки и теплоносителей, необходимые для расчетов и изготовления штампов на станке ЧПУ.

3. Разработан алгоритм трехмерного численного расчета, позволяющий решить комплексную задачу газодинамики и теплопередачи для теплообменного аппарата.

4. На основе трехмерного численного расчетного исследования получены критериальные зависимости для теплообменных поверхностей с различными углами скрещивания и высотами профиля гофра.

5. Разработана программа аналитического расчета для определения основных параметров теплообменного аппарата при задаваемых габаритных размерах пластины.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Полученные результаты позволяют прогнозировать и определять оптимальные параметры пластинчатого теплообменного аппарата для различных схем ГТД с регенерацией тепла.

Выбранная технология производства позволяет изготавливать теплообменные аппараты с приемлемыми массогабаритными и прочностными характеристиками.

Использование параметризованной геометрической модели пластины и оснастки существенно снижает время проектирования, расчета и изготовления теплообменного аппарата ГТД.

Методика трехмерного расчета позволяет провести компьютерное моделирование эксперимента и уточнить конструкцию теплообменного аппарата при заданных условиях. Программа аналитического расчета при задаваемых габаритных размерах пластины позволяет оценить целесообразность применения выбранной конструкции теплообменного аппарата для последующего точностного расчетного 3D-исследования.

Результат исследования по выбору оптимального варианта расчетной сетки позволяет снизить затраты компьютерных мощностей и времени на проектирование.

Результаты работы нашли применение в Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет) на кафедре «Технология проектирования и производство двигателей летательных аппаратов», а также используются на предприятии ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

**Достоверность результатов.** Полученные результаты исследования верифицированы по экспериментальным данным, которые проводились по стандартизированным методикам с помощью аттестованной аппаратуры. Данные результаты не противоречат опубликованным работам других авторов.

#### **Апробация результатов**

Результаты исследований, изложенные в диссертации, представлены в 1 патенте, посвященном применению объекта исследования – теплообменного аппарата в ГТД сложного цикла. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: 29-й Конгресс Международного Совета по аэронавтическим наукам (ICAS) 7–12 сентября 2014 г. (Санкт-Петербург) [9]; III Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия», 15–16 августа 2014 г. (Новосибирск) [8]; 16-я Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике», 5–6 декабря 2013 г. (Санкт-Петербург) [11]; LX Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы проектирования и эксплуатации наземных объектов с газотурбинными и парогазовыми установками 24–26 сентября 2013 г. (Казань) [20]; Международная научно-практическая конференция «Образование и наука без границ», 7–15 декабря 2013 г. (г. Пшемысль) [7]; LVIV Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок, 6–7 сентября 2012 г. (Санкт-Петербург) [10]; Девятая Всероссийская научно-практическая конференция «Применение ИПИ–технологий в производстве» 18–20 ноября 2011 г. (Москва) [16].

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

- Результаты анализа технологий изготовления теплообменного аппарата и выбор геометрических параметров гофра пластины, удовлетворяющих требованиям по эффективности и технологичности.
- Методика расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата.
- Параметризованные геометрические 3D-модели пластин и оснастки, а также теплоносителей для расчета и изготовления теплообменного аппарата.
- Методика трехмерного численного расчета параметров теплообменного аппарата и его верификация.
- Программа аналитического расчета для определения основных параметров теплообменного аппарата (степень регенерации, потери давления) при оптимальных размерах пластины.

#### **Личный вклад соискателя**

Соискатель проанализировала конструкции теплообменных аппаратов с целью выбора наиболее перспективных направлений. Провела исследование геометрических параметров гофра на основе экспериментов, представленных в литературе. Участвовала в разработке технологии изготовления пластинчатого теплообменного аппарата. Принимала участие в разработке алгоритма методики расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата.

Автор Попова Т.В. принимала непосредственное участие в выполнении экспериментальных исследований по определению теплогидравлических характеристик пластинчатого теплообменного аппарата, полученного методом послойного лазерного спекания, занималась разработкой методики сбора и обработки информации. Соискатель Попова Т.В. обработала, проанализировала и обобщила данные экспериментов.

Участвовала в разработке трехмерного метода численного расчета. Разрабатывала параметризованные геометрические модели пластины, оснастки и теплоносителей и участвовала в их доводке.

Провела верификацию экспериментальных и расчетных данных. Провела серию расчетов для получения критериальных зависимостей и разработки аналитической программы расчета, а также провела доводку данной программы.

Разработаны: методика расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата, геометрические модели параметризованной пластины и оснастки теплообменного аппарата, а также теплоносителей. Метод трехмерного численного расчета, учитывающий особенности геометрической формы пластины и свойства теплоносителей. Разработан алгоритм аналитического метода расчета.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 104 наименований; изложена на 155 страницах машинописного текста, включающего 69 иллюстраций и 9 таблиц.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано **20** работ, из них **3** – в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», **1** патент, **16** материалов на основе докладов были представлены в трудах зарубежных, международных и всероссийских конференций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** поставлены цели и задачи диссертационного исследования. 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** показана актуальность создания малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД) с регенерацией тепла, эффективность которых в значительной мере зависит от теплообменных аппаратов. Представлена классификация теплообменных аппаратов. Проведен обзор литературы по данному вопросу.

На сегодняшний день в литературе практически не представлено информации, связанной с проблемой совершенствования методики проектирования, расчета и изготовления теплообменных аппаратов. Эти вопросы и определили перечень основных задач настоящей работы, решение которых требует выполнения исследовательских, расчетных и экспериментальных работ.

Применение сложных термодинамических циклов (регенерация тепла) в авиационной и энергетической отрасли обосновано увеличением топливной эффективности и уменьшением необратимости цикла.

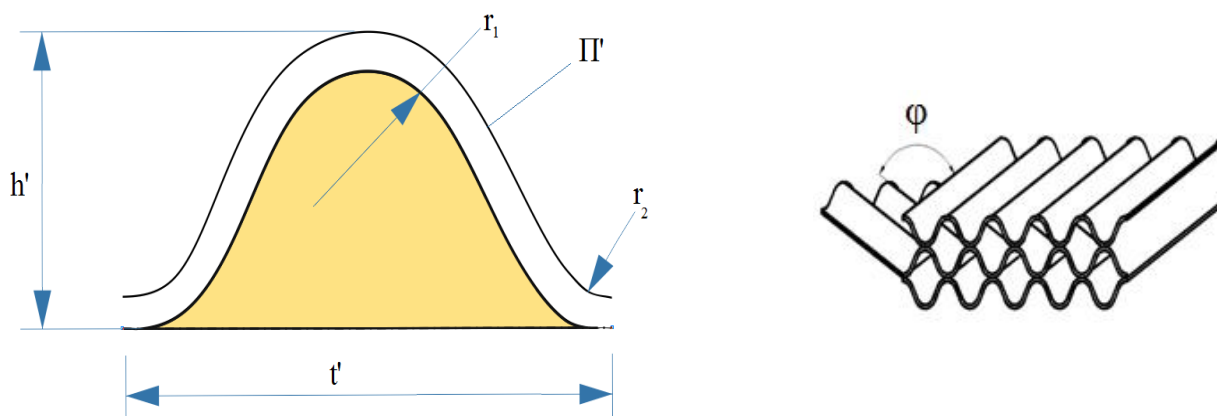
Основным узлом, определяющим эффективность регенерации, является теплообменный аппарат, поэтому необходимо установить требования, которым данный узел будет удовлетворять. К главным требованиям относятся: работа при высоких температурах (до 1000 К) и давлениях (до 400 кПа), а также минимальные массогабаритные показатели. Наиболее полно требованиям соответствуют пластинчатые теплообменные аппараты с теплопередающей поверхностью типа «набивки Френкеля».

Проведённое сравнение интенсивности теплообмена в гладком канале и при угле скрещивания в  $37^\circ$  поверхности теплообмена типа «набивки Френкеля» показывает, что увеличение угла скрещивания пластин ведет к возрастанию в 1,4–1,6 раза числа  $Nu$  и коэффициента потерь давления в 1,5–1,7 раза по сравнению с гладким каналом.

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

**Во второй главе** проведено исследование по определению диапазона геометрических характеристик гофра, при условии максимальной эффективности и компактности. Исследование проводилось на основе экспериментальных данных, представленных в литературе.

Характеристики поверхностей теплообмена в значительной мере определяют массово-габаритные показатели теплообменных аппаратов. В данном разделе рассмотрены теплогидравлические характеристики поверхностей теплообмена по типу «набивки Френкеля» и вариация данной поверхности, представляющей собой непрерывные волнистые гофры. На рисунке 1 представлены обозначения геометрических параметров.



**Рисунок 1 – Геометрические параметры гофра**

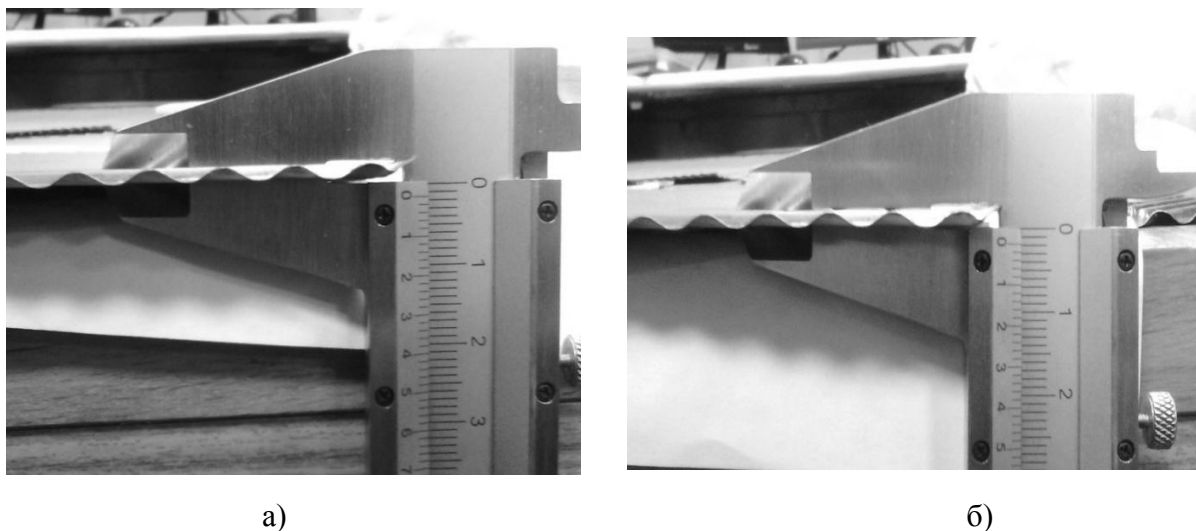
В результате анализа сделан вывод, что эквивалентный диаметр  $d_e$  не оказывает заметного влияния на теплоотдачу. Более заметное воздействие на интенсивность теплообмена оказывает высота профиля пластины. Также на интенсивность теплоотдачи оказывает влияние угол скрещивания гофров на смежных листах  $\phi$ . При увеличении угла  $\phi$  от  $0$  до  $96^\circ$  коэффициент теплоотдачи возрастает в 3,8...4,2 раза, а коэффициент сопротивления в 11–18 раз. Для поверхности теплообмена с волнистыми непрерывными каналами отмечены те же факторы влияния. В результате исследования получен диапазон геометрических



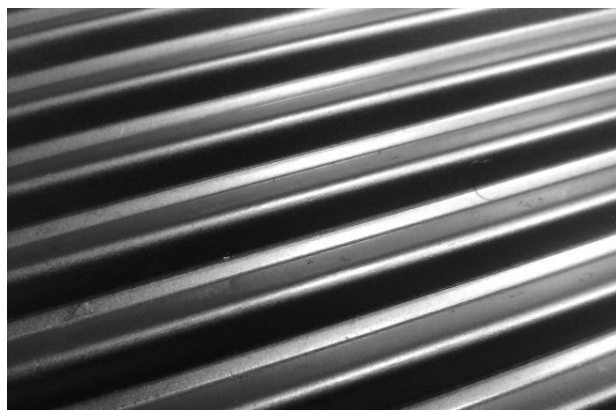
параметров, удовлетворяющих требованиям эффективности и компактности теплообменного аппарата.

Таким образом, целесообразно выполнять пластины со следующими геометрическими размерами: высотой профиля гофра в пределах  $h' = 0,84 \dots 2,5$  мм, угол скрещивания гофров лежит в диапазоне  $\varphi = 65^\circ \dots 100^\circ$ , шаг гофра  $t' = 2 \dots 2,6$  мм.

**В третьей главе** рассмотрены технологии изготовления теплообменного аппарата, а именно: штамповка упругой средой, штамповка инструментальными штампами и метод послойного спекания. Выбрана технология сварки пластин в конверты и конвертов в матрицу. Изготовлены экспериментальные образцы, определен диапазон технологических ограничений геометрических параметров гофра пластины теплообменного аппарата. Проведен эксперимент образца теплообменного аппарата, изготовленного методом послойного спекания. Выбрана технология, максимально удовлетворяющая требованиям по эффективности. Из рассмотренных технологий изготовления пластин теплообменного аппарата штамповка эластичными средами является одной из самых экономически выгодных, поскольку при этом одна из частей штампа заменена на эластичную среду. Несмотря на преимущества, данная технология не обеспечила верхний предел из выбранного диапазона высоты профиля гофра – 2,0 мм. Максимальная высота, полученная при использовании данной технологии, обеспечила высоту профиля гофра 1,4 мм. По сравнению со штамповкой эластичными средами, штамповка на инструментальных штампах позволяет получить следующие величины высоты профиля гофра: 1,6 мм, 2 мм, 2,1 мм. В эксперименте рассматривалась пластина из стали 20Х23Н18, толщиной 0,2 мм. На рисунках 2, 3 представлены результаты штамповки пластины до высот 1,6 мм и 2,0 мм. В процессе эксперимента образцы с высотой профиля гофра свыше 2,1 мм имели разрывы материала. Учитывая необходимость выполнения требований по прочности, в качестве максимально достижимой была принята высота профиля пластины 2,0 мм. В данной работе использовалась лазерная резка, которая отличается отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал.



**Рисунок 2 – Пластина с высотой профиля: а) 1,6 мм; б) 2,0 мм**



**Рисунок 3 – Пластина с высотой профиля 2,0 мм. Вид сверху**

В связи с этим возникают минимальные деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания. Подготовка заготовок производилась пескоструйной очисткой и травлением. Сварка отштампованных пластин производилась попарно в ложементе (рисунок 4) на машине точечной сварки.



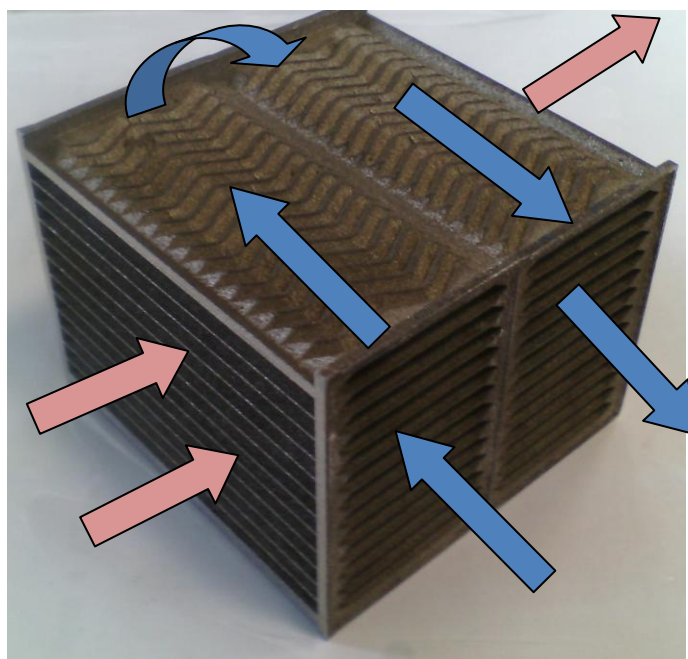
**Рисунок 4 – Приспособление формы для сварки пластин (ложемент)**

Сварку собранного конверта и теплообменной матрицы производили ручной микроплазменной сваркой. Для сборки конвертов с корпусом использовался кондуктор (рисунок 5).



**Рисунок 5 – Кондуктор для сварки элементов теплообменной матрицы между собой и фланцем**

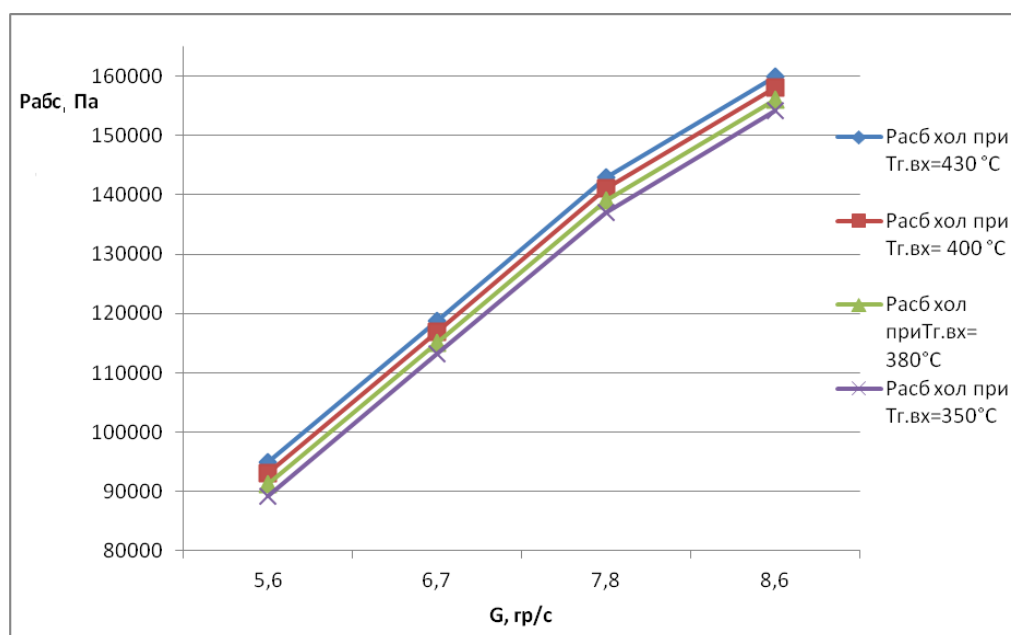
Изготовлен теплообменный аппарат методом лазерного спекания (рисунок 6).



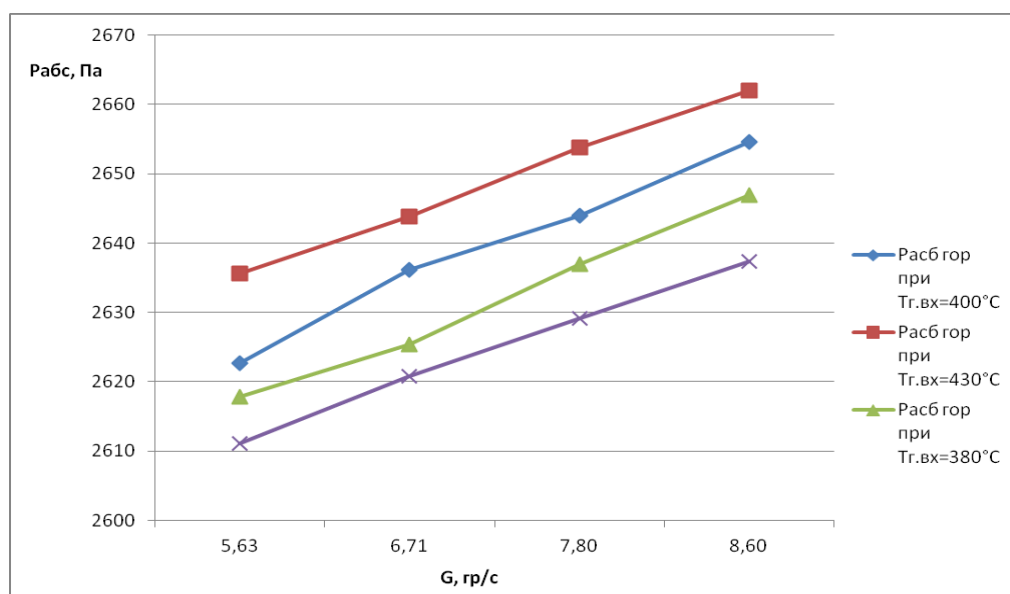
**Рисунок 6 – Теплообменный аппарат, изготовленный методом лазерного спекания**

Проведен эксперимент для определения теплогидравлических характеристик. Исследованы параметры теплообменного аппарата при расходах 5 гр/с, 6 гр/с, 7 гр/с, 8 гр/с и температурах 350; 380; 400; 430 К. Обработаны результаты исследования, построены графики зависимостей исследуемых

параметров, а именно: абсолютных потерь  $P_{абс}$  от расхода  $G$  и температуры на выходе из горячего и холодного контуров от расхода  $G$  (рисунки 7, 8, 9, 10).



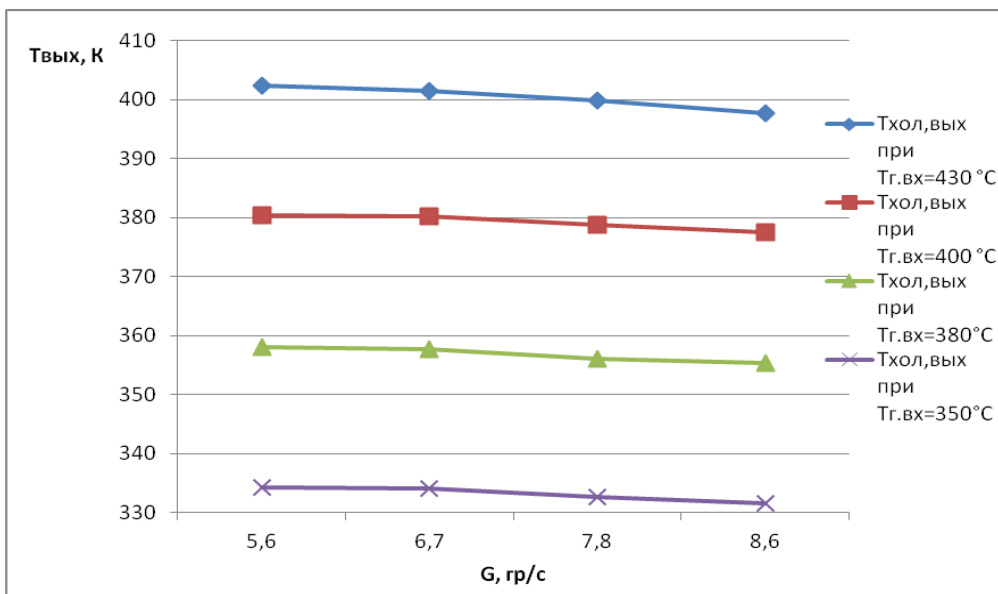
**Рисунок 7 – Зависимость абсолютного давления от расхода при различных  $T_{вх}$  для холодного теплоносителя**



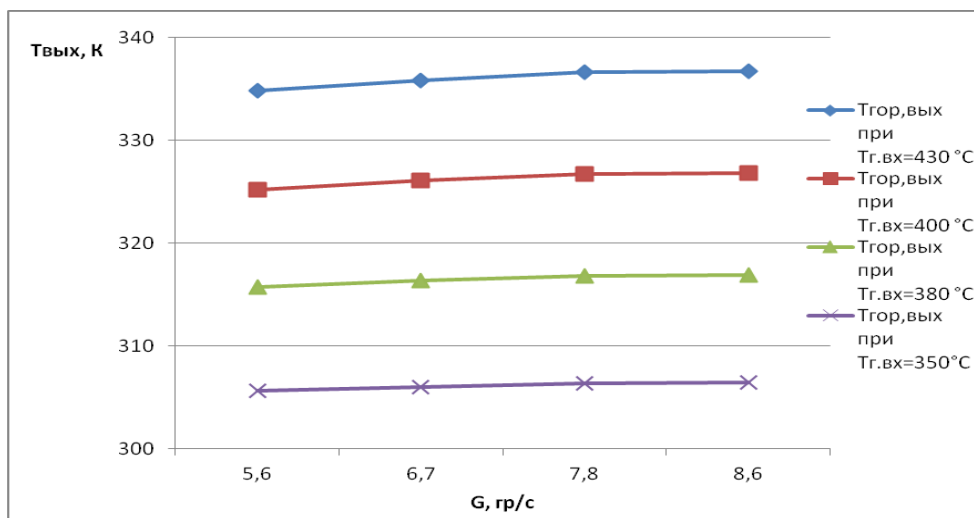
**Рисунок 8 – Зависимость абсолютного давления от расхода при различных  $T_{вх}$  для горячего теплоносителя**

Объяснением больших потерь давления по холодному тракту является проблема в технологии изготовления образца, которая обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, что допускает некоторое отклонение от рисунка за счет прилипания частиц к напечатанной поверхности. Более того, из-за сложности геометрии экспериментального образца внутри тракта теплообменного аппарата остается порошок, служащий в процессе

изготовления поддержкой. Данный порошок не удается удалить из полости теплообменного аппарата.



**Рисунок 9 – Зависимость температуры выхода от расхода при различных температурах входа для холодного теплоносителя**



**Рисунок 10 – Зависимость температуры выхода от расхода при различных температурах входа для горячего теплоносителя**

По сравнению с холодным, горячий контур имеет гораздо более выгодную для очистки геометрию. Потери по горячему контуру практически не меняются.

Анализ результатов показал, что штамповка на инструментальных штампах в данном случае является оптимальным вариантом.

**В четвертой главе** определен диапазон геометрических параметров, удовлетворяющий требованиям эффективности и технологичности. Разработан алгоритм методики расчета, проектирования, изготовления теплообменного аппарата, рассмотрены методы параметрического проектирования и разработана

параметризованная геометрическая модель пластины, оснастки и теплоносителей. Разработан и верифицирован метод трёхмерного численного расчета. Проведено расчётное исследование для определения критериальных зависимостей и разработана программа аналитического расчета.

Исходя из технологических возможностей и учитывая максимальные показатели эффективности и компактности, определен диапазон геометрических параметров, в котором целесообразно проводить дальнейшее исследование: высота профиля гофра в пределах  $h' = 0,84 \dots 2,0$  мм; угол скрещивания гофров  $\varphi = 65^\circ \dots 100^\circ$ ; шаг гофра  $t' = 2 \dots 2,6$  мм; толщина пластины  $0,1 \dots 0,2$  мм.

При проектировании ГТД сложного цикла целесообразно вписывать теплообменный аппарат в уже существующую конструкцию, поскольку это сократит материальные и временные затраты на проектирования нового ГТД с улучшенными параметрами. Однако существующие методы расчета теплообменных аппаратов отталкиваются от эффективности, которую необходимо получить для ГТД, вычисляя затем требуемую площадь поверхности теплообмена. В данной ситуации целесообразно исходить из площади поверхности теплообмена, так как изначально задан ограниченный объем, в который требуется вписать теплообменный аппарат. Таким образом, появится возможность варьировать размеры и КПД теплообменного аппарата. На рисунке 11 представлен алгоритм методики, учитывающей особенности проектирования теплообменного аппарата для существующих схем малоразмерных ГТД.

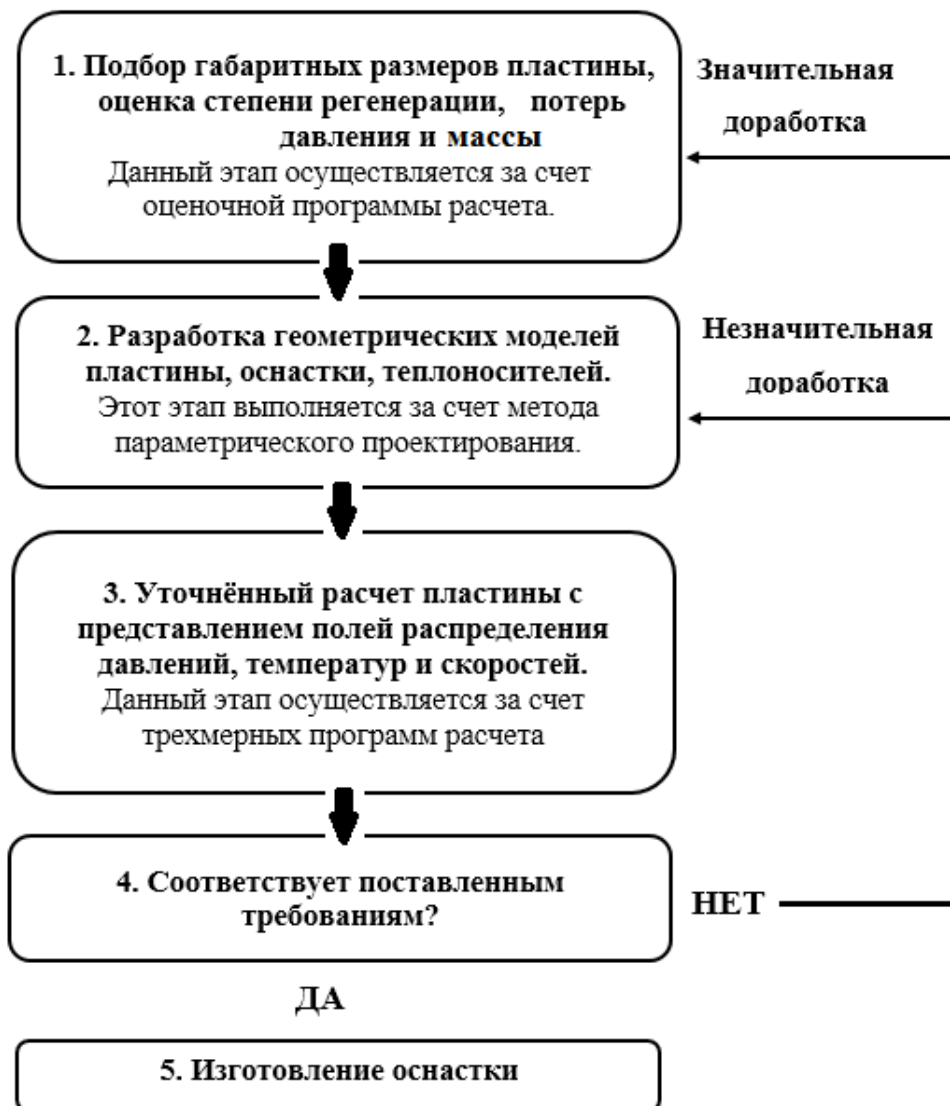
Исходя из этого можно сформулировать основные задачи, которые необходимо решить при разработке методики:

1. Разработка параметризованных геометрических моделей пластины, оснастки и расчетных моделей теплоносителей.
2. Разработка метода трехмерного численного расчета сопряженной задачи теплопередачи и газодинамики.
3. Верификация метода трехмерного численного расчета.
4. Проведение расчетного 3D-исследования для получения критериальных зависимостей и разработка оценочной программы расчета на их основе.

Разработана параметрическая модель, которая представляет собой набор зависимостей и задаваемых параметров, сведенных в таблицу. При изменении одного из параметров модель перестраивается автоматически. Время создания 3D-модели для исследований существенно сократилось по сравнению с обычной 3D-моделью.

Разработан метод трёхмерного численного расчета, базирующийся на модели турбулентности SST (модель Ментера), которая относится к численному методу RANS. Выбор обоснован тем, что данная модель приспособлена к описанию ламинарных и турбулентных потоков.

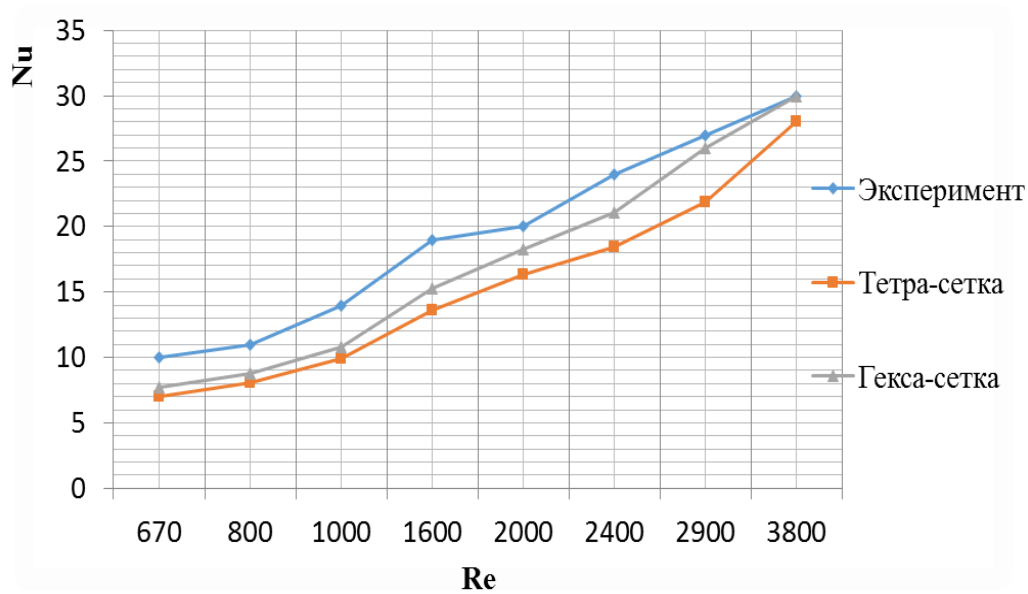
Разработан расчетный трёхмерный метод для исследуемого объекта, главным преимуществом которого является возможность качественной оценки температурных, скоростных полей, а также полей давления, определения застойных зон, мест возможного перегрева. Данная методика позволяет обосновать выбор конструкции, снизить риск ошибки при натурных испытаниях.



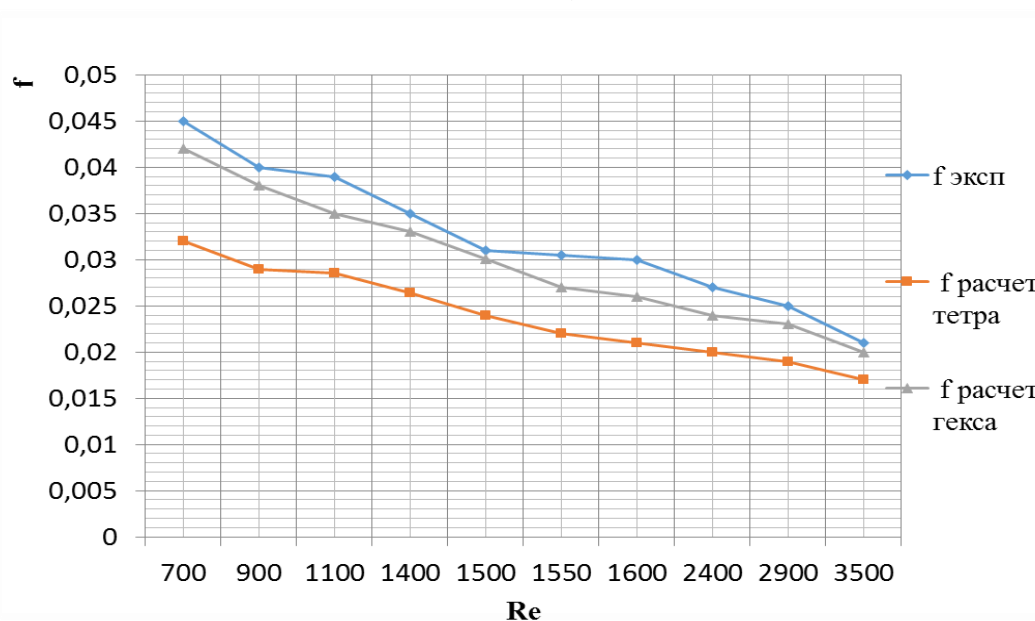
**Рисунок 11 – Алгоритм методики расчета, проектирования и изготовления**

Проведена верификация данного метода при помощи эксперимента, описанного в литературе. Построены графики критериальных зависимостей (рисунок 12). Проведено сравнение структурированной гекса- и неструктурированной тетра-сеток, которое показало, что для получения более точных расчетных результатов (в пределах 5–10%) необходимо использовать гекса-сетку. Расхождение экспериментальных и расчетных данных при числах Рейнольдса меньше 2000 составляет ~20% у гекса-сетки и 25–27% у тетра-сетки. При более высоких числах Рейнольдса расхождение составляет у гекса-сетки 1–8% и 9–15% у тетра-сетки.

Анализируя график зависимости коэффициента потерь давления от числа Рейнольдса, можно отметить хорошую сходимость результатов. Здесь гекса-сетка имеет более низкое расхождение: не выше 12%, тетра-сетка — 20-27%.



а)



б)

**Рисунок 12 – Верификация расчетных и экспериментальных данных:**

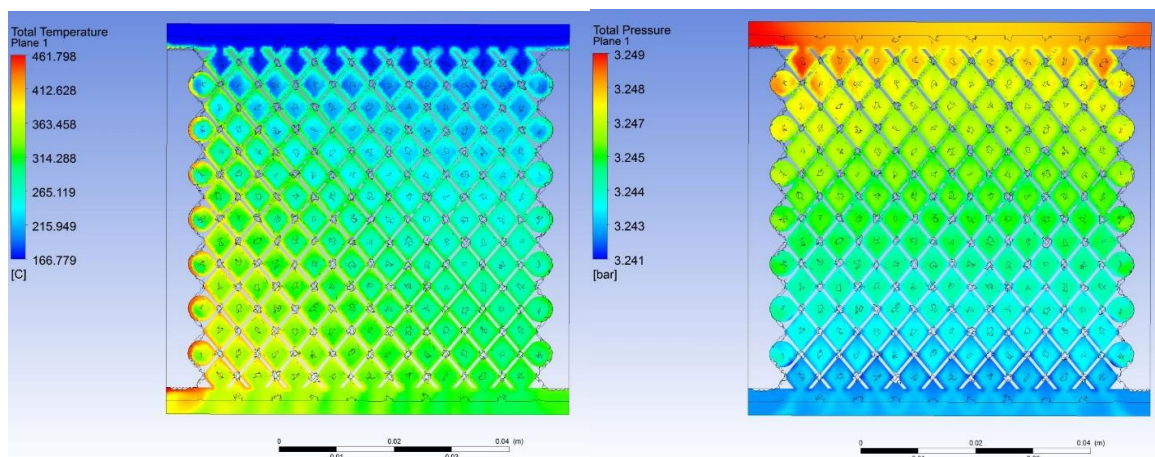
а) зависимость  $Nu(Re)$  при угле скрещивания гофра  $60^\circ$ ;

б) зависимость  $f(Re)$  при угле скрещивания гофра  $60^\circ$

Тетра-сетка показывает приемлемую точность результатов и является более удобным для практики вариантом, так как построение занимает меньше времени. В связи с этим тетра-сетка выбрана как наиболее рациональный вариант.

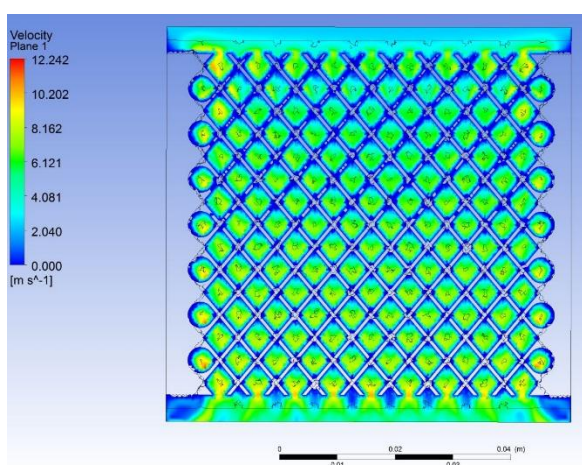
Трехмерный метод расчета пластин теплообменного аппарата с различными углами скрещивания и высотами профиля пластины позволил провести расчетное 3D-исследование, результаты которого представлены на рисунке 13. Полученные в результате расчета критериальные зависимости легли в основу программы аналитического расчета (рисунок 14).





а)

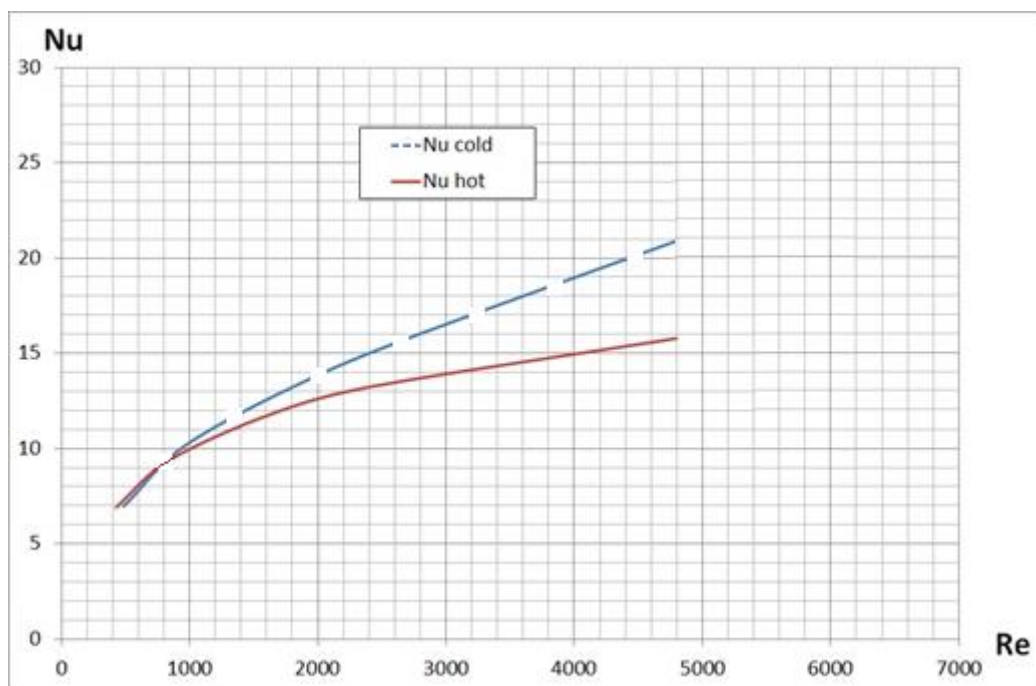
б)



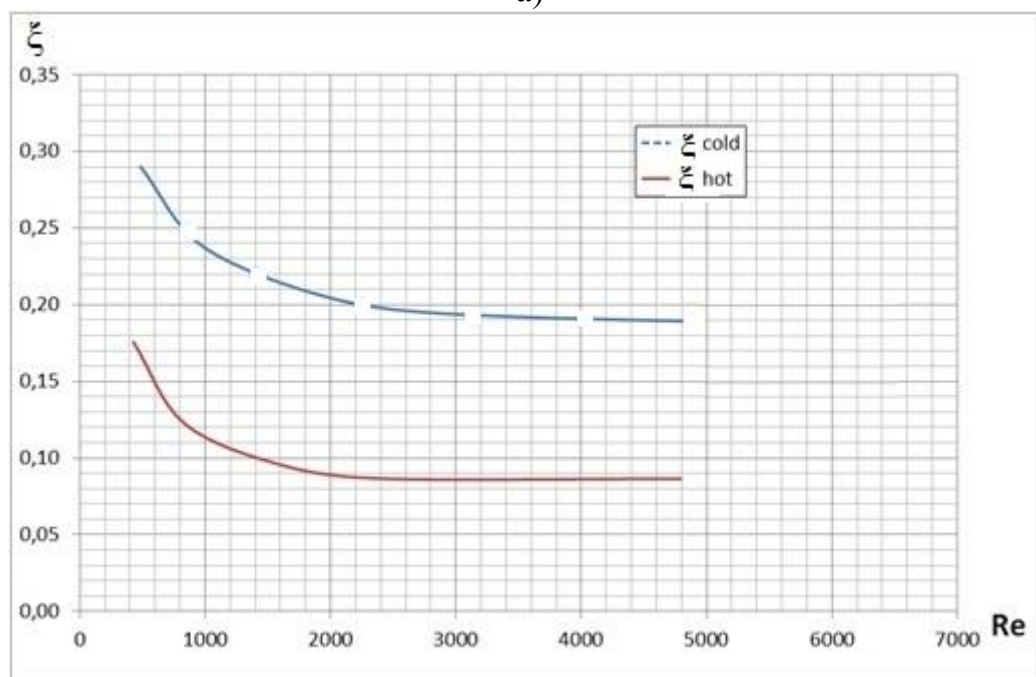
в)

**Рисунок 13 – Значения 3D-расчета для пластины с поверхностью Френкеля:**

- а) поле температур для одного из теплоносителей;
- б) поле давлений для одного из теплоносителей;
- в) поле скоростей для одного из теплоносителей



а)



б)

**Рисунок 14 – Пример критериальных зависимостей для угла скрещивания в 100°:**

а) зависимость  $Nu(Re)$ ;

б) зависимость  $\xi(Re)$

Расчет позволяет провести оценку конструкции пластины с заданными габаритами, входными и выходными параметрами, такими как: температура, давление, расход. Это дает возможность вписывать теплообменный аппарат в существующую конструкцию ГТД. Основными результатами расчета являются степень регенерации и потери давления. При помощи программы можно оценить

в первом приближении конструкцию пластины для дальнейшего, более точностного изучения трехмерным методом расчета.

Данная методика использована для разработки ГТД сложного цикла, на который получен патент. Основной задачей при разработке данного ГТД являлось:

- повышение эффективности ГТД на 15–20%;
- снижение расхода топлива на 25–30% по сравнению с двигателем без теплообменного аппарата;
- обеспечение компактности конструкции ГТД;
- минимальное увеличение габаритных размеров по сравнению с двигателями без теплообменных аппаратов.

В конструкции данного ГТД жаровые трубы камеры сгорания и модули теплообменного аппарата интегрированы в единый узел. Модули теплообменного аппарата и жаровые трубы равномерно расположены по окружности, причем жаровые трубы размещены между модулями теплообменного аппарата.

В процессе проектирования были рассмотрены две поверхности теплообмена: с непрерывными волнистыми гофрами и поверхность типа «набивка Френкеля». Благодаря программе аналитического расчета удалось подобрать оптимальные размеры пластины и удовлетворить требованиям по потерям давления и эффективности. Метод параметрического проектирования позволил получить геометрические 3D-модели для изготовления штампов и подготовить модели пластины и теплоносителей для 3D-исследования. Проведенное компьютерное моделирование эксперимента показало целесообразность использования поверхности типа «набивка Френкеля».

Таким образом, реализация предложенной методики позволяет решить поставленные задачи для ГТД с регенерацией тепла при минимальных материальных затратах в короткие сроки, а также создать модельный ряд высокоэффективных теплообменных аппаратов различной размерности и назначения. Следует отметить, что разработанная методика применима для различных поверхностей теплообмена, однако, при рассмотрении других поверхностей необходима корректировка программы оценочного расчета, технологии изготовления и параметризованных моделей геометрии теплообменного аппарата.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ конструкций теплообменных аппаратов для определения рационального выбора теплообменной поверхности и ее геометрических параметров. Обоснован выбор теплообменной поверхности по типу «набивки Френкеля». Определены геометрические параметры гофра, обеспечивающие максимальные значения эффективности при условии приемлемых потерь давления.

2. Проанализированы технологии изготовления теплообменного аппарата. Технология штамповки на инструментальных штампах наиболее полно удовлетворяет требованиям по эффективности и компактности. В результате определены геометрические параметры гофра, которые возможно получить при выбранной технологии изготовления.

3. Разработан алгоритм методики расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата, позволяющий сократить время на разработку теплообменного аппарата и малоразмерного ГТД в целом.

4. Разработаны геометрические параметризованные 3D-модели пластины, оснастки и теплоносителей, позволившие значительно сократить время расчета и подготовки к изготовлению теплообменного аппарата.

5. Разработан метод трехмерного численного расчета параметров теплообменного аппарата, позволяющий оценить теплогидравлические параметры теплообменного аппарата. Данный метод позволяет визуализировать результаты расчета, таким образом, построить поля температур, давлений и скоростей теплоносителей.

6. Проведена верификация разработанного метода трехмерного численного расчета. В процессе верификации были рассмотрены структурированная гекса-сетка и неструктурированная тетра-сетка. Основываясь на максимальном сокращении времени расчета, предпочтение отдано неструктурированной сетке, поскольку при минимальных временных затратах возможно получить приемлемую сходимость результатов. Погрешность расчета составляет до 15%.

7. Выполнено расчетное 3D-исследование с целью получения критериальных зависимостей для разработки программы аналитического расчета. Данная программа является первоначальным этапом методики расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата и позволяет получить оценку эффективности и потерь давления в зависимости от размеров и геометрии пластины теплообменного аппарата.

8. Апробация разработанной методики проектирования, расчета и изготовления теплообменного аппарата при разработке малоразмерного ГТД с регенерацией тепла позволила подтвердить ее работоспособность.

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

***Публикации в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:***

1. Попова Т.В., Силуянова М.В. Исследование теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла [Электронный ресурс]. – Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56934>

2. Попова Т.В., Ситников С.А., Ломазов В.С. Технологическое обоснование программы аналитического расчета пластинчатого теплообменного аппарата // Технология металлов. М.: Наука и Технология, 2015. № 8. С. 37.

3. Попова Т.В., Силуянова М.В. Разработка методики проектирования и расчета теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла

[Электронный ресурс]. – Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56934>.

**Публикации в других изданиях:**

4. Пат. 2563079 Российская Федерация, МПК7 F02С7/10 (2006.01). Малоразмерный газотурбинный двигатель с регенерацией тепла [Текст] / Попова Т.В., Ломазов В.С., Князев А.Н., и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». – № 2014120770/06; заявл. 23.05.2014; опубл. 20.09.2015. – 7 с.: ил.

5. Попова Т.В., Силуянова М.В. Разработка стационарной микрогазотурбинной теплоэлектростанции на твердом возобновляемом топливе // Сервис в России и за рубежом: науч.-техн. и теор. журнал. 2011. № 5. С. 23–30.

6. Попова Т.В., Силуянова М.В. Инженерно-экономическое обоснование и разработка маркетинговой стратегии инновационного проекта // Труды вольного экономического общества. М.: ГОУ ВПО «МАТИ»; РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2011. Т. 155. С. 454.

7. Попова Т.В., Силуянова М.В., Дробыш М.В., Князев А.Н., Ломазов В.С. Использование схем сложных термодинамических циклов микротурбин // Образование и наука без границ: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., 7–15 декабря 2013 г. Пшемьсль: Наука и студия, 2013. С. 24–27.

8. Попова Т.В., Данилов М.А. и др. Методика параметрического проектирования применительно к пластинчатому теплообменнику // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: материалы III МНПК, 15–16 августа 2014 г. Новосибирск: International Scientific Institute «Educatio», 2014. С. 111–113.

9. Дробыш М.В., Попова Т.В., Ломазов В.С. Разработка ключевых технологий для малоразмерных газотурбинных двигателей с регенерацией тепла [Электронный ресурс]. – Материалы 29 Конгресса Международного Совета по авиационным наукам (ICAS), 7–12 сентября 2014 г., г. Санкт-Петербург. URL:

[http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014\\_1007\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_1007_paper.pdf)

10. Анализ микротурбин со сложными термодинамическими циклами Российская академия наук РАН по газовым турбинам // LVIV Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок. Конкурс молодых специалистов, 6–7 сентября 2012 г., г. Санкт-Петербург: тезисы докладов. СПб.: РЭП Холдинг, 2012. С. 132–138.

11. Попова Т.В., Силуянова М.В., Дробыш М.В., Ломазов В.С. Разработка методики оценочного расчета пластинчатого теплообменника // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: сб. ст. 16-й междунар. науч.-практ. конф., 5–6 декабря 2013 г. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. С. 260–262.

12. Попова Т.В., Силуянова М.В. Применение методики параметрического 3D-моделирования при выполнении НИОКР // Перспективы развития науки и образования: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф.,

29 ноября 2013 г. В 7 ч. Ч. IV / Мин-во обр. и науки. М.: АР-Консалт, 2013. С. 64–66.

13. Рощин А.В., Попова Т.В., Силуянова М.В. Исследование и оптимизация конструктивно-технологических решений современных газотурбинных установок // Перспективы развития науки и образования: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф., 29 ноября 2013 г. В 7 ч. Ч. IV / Мин-во обр. и науки. М.: АР-Консалт, 2013. С. 67–69.

14. Попова Т.В., Силуянова М.В. Проектирование параметрической 3D-модели пластины теплообменного аппарата // XXXIX Гагаринские чтения: науч. тр. Междунар. молодеж. конф.: в 9 т. Москва, 9–13 апреля 2013 г. М.: МАТИ, 2013. Т. 2. С. 266–267.

15. Попова Т.В., Силуянова М.В. Методика сквозного параметрического проектирования деталей ГТД // XL Гагаринские чтения: науч. тр. Междунар. молодеж. конф.: в 9 т. Москва, 7–11 апреля 2014 г. М.: МАТИ, 2014. Т. 2. С. 307.

16. Попова Т.В., Силуянова М.В., Дробыш М.В. Применение CALS-технологий для создания энергетических ГТУ со сложными термодинамическими циклами малой мощности // Применение ИПИИ-технологий в производстве: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф., 18–20 ноября 2011 г. М.: МАТИ, 2011. С. 159.

17. Попова Т.В., Силуянова М.В., Маркеев И.М. Критические технологии для повышения топливной эффективности газотурбинных двигателей // Новые материалы и технологии – НМТ-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 20–22 ноября 2012 г. М.: МАТИ, 2012. С. 187–188.

18. Попова Т.В., Силуянова М.В., Исаенков А.А. Исследование параметров газотурбинных двигателей с применением сложных циклов и разработка 3D-моделей теплообменных аппаратов // Новые материалы и технологии – НМТ-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 20–22 ноября 2012 г. М.: МАТИ, 2012. С. 199–200.

19. Попова Т.В., Силуянова М.В. Инженерно-экономическое обоснование и разработка маркетинговой стратегии инновационного проекта // Маркетинг и современность: сб. науч. ст. М.: Палеотип, 2012. С. 48.

20. Попова Т.В., Дробыш М.В. Исследование пластинчатого теплообменного аппарата с волновой поверхностью // Научно-технические проблемы проектирования и эксплуатации наземных объектов с газотурбинными и парогазовыми установками: LX науч.-техн. сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок: тезисы докладов, Казань, 24–26 сентября 2013 г. Казань: ОАО «ВТИ», 2013. С. 163–167.