

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МАИ)**

На правах рукописи

Попова Татьяна Валерьевна

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Силуянова Марина Владимировна

Москва – 2016



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	11
1.1. Повышение эффективности газотурбинных двигателей и установок за счет сложных термодинамических циклов.....	11
1.2. Обоснование выбора схемы теплообменного аппарата.....	20
1.4. Исследования, проведенные в области пластинчатых теплообменников с поверхностью типа Френкель	31
2. ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОФРА ПЛАСТИНЫ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА	36
2.1 Характеристики поверхностей теплообмена	36
3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКА	48
3.1. Технические требования и особенности изготовления пластинчатого теплообменного аппарата для малоразмерных ГТУ	48
3.2 Штамповка эластичными средами	50
3.3. Холодная штамповка инструментальными штампами	56
3.4 Технологические переходы изготовления теплообменного аппарата	60
3.5 Изготовление теплообменного аппарата аддитивными методами производства.....	68
3.5.1 Планирование эксперимента.....	70
3.5.2 Описание экспериментальной установки.....	73
3.5.3 Условия и порядок проведения испытаний	79
3.5.4 Анализ и обработка экспериментальных данных.....	81
4. МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА	87
4.1 Анализ оптимальных теплогидравлических и технологических параметров теплообменного аппарата.....	87
4.2. Принципы конструирования и методы расчетного исследования	88
4.2.1 Конструктивный расчет теплообменных аппаратов	91
4.2.2. Поверочный расчет теплообменных аппаратов.....	92
4.2.3. Основные уравнения теплового расчета теплообменных аппаратов.....	93
4.3. Разработка алгоритма методики проектирования и расчета теплообменного аппарата.....	98

4.3.1. Параметрическая методика проектирования пластины теплообменного аппарата и оснастки	100
Классификация методов параметрического проектирования	101
4.3.2. Применение методов параметрического проектирования к построению 3D-модели теплообменника и штампа.....	105
4.2. Метод трехмерного численного расчета	111
4.2.1.Классификация расчетных сеток 3D-моделей	112
4.2.2. Обоснование выбора физической модели расчета	115
4.3. Верификация метода трёхмерного численного расчета	120
4.3.1 Построение расчетной сетки для 3D-моделей исследуемого объекта.	120
4.3.2 Экспериментальное исследование и верификация метода трёхмерного численного расчета	125
4.4. Программа оценочного аналитического расчета.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Проблема повышения эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) возникла в связи 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. [1]. 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. На сегодняшний день в малоразмерных ГТД с регенерацией тепла применяются в основном пластинчато-ребристые теплообменные аппараты. Однако, использование пластинчатых теплообменников позволяет существенно снизить массу и габариты теплообменного аппарата.

Одним из наиболее эффективных методов повышения экономичности и эффективности ГТД с регенерацией тепла является интенсификация процессов теплообмена, позволяющая снизить габариты теплообменного оборудования и, соответственно, его стоимость. При этом повышение эффективности теплообмена на 30-40% ведет к росту сопротивления на 40-60%.

Создание ГТД с приемлемыми массогабаритными и эксплуатационными показателями требует дальнейшего совершенствования методов расчета и проектирования компактных теплообменников, анализа условий рационального согласования параметров теплообменника и двигателя.

Проблеме разработки методики проектирования, расчета и изготовления пластинчатых теплообменных аппаратов посвящено значительное количество исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом. Среди множества работ, посвященных расчету и проектированию теплообменников можно выделить работы, проведенные: Э.К. Калининым, Г.А. Дрейцером, И.З. Коппом, А.С. Мякоченным, С.А. Ярхо, Г.П. Нагога [32,33], Б.С. Петуховым, Л.Г. Гениным, С.А. Ковалевым [58] и др.

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

Работы: Коваленко Л.М., Ястребенецкого А.Р., Барановского Н.В. [9,88], Савостина А.Ф., Тихонова А.М. [80,73], Кэйса В.М., Лондона А.Л. [39], Жукаускаса А.А.[29], Жаднова О.В. [28], Евсеева Г.А. [25], Емельянова А.Л., Кожевникова Е.В. [27] и др. посвящены проблемам создания эффективных пластинчатых теплообменников. В них 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 теплообменников.

Несмотря на достаточно глубокие исследования, проведенные в данной области, остается открытым вопрос о модернизации методики проектирования, расчета и изготовления с учетом современных возможностей компьютерной техники и производства.

Основным недостатком существующих методов разработки являются большие затраты времени на его проведение. Решением данной проблемы может быть использование трехмерных программ расчета и проектирования, позволяющих объединить некоторые из этапов расчетного исследования, тем

самым сократить время и учесть большее количество факторов, влияющих на процесс, представить результаты расчета в наглядном виде (поля скоростей, температур, давлений).

В современной научной литературе, посвященной исследованиям теплообменников, часто не реализуется такой комплексный подход к изучению факторов, влияющих на процессы в теплообменнике. 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.

Объектом исследования являются:

- авиационные и энергетические малоразмерные установки мощностью до 250 кВт;
- пластинчатые теплообменные аппараты сварной конструкции;
- методы параметрического проектирования и трехмерного расчета, а также программы, в которых возможно их реализовать;

Цели и задачи работы

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

Основными задачами работы являются:

- проведение анализа конструкций теплообменных аппаратов для определения рационального выбора теплообменной поверхности;
- разработка метода трехмерного параметрического проектирования пластины и штампов для изготовления теплообменного аппарата;
- проведение экспериментального исследования пластинчатого теплообменника для верификации программы трехмерного расчета;
- разработка метода трехмерного расчета параметров пластинчатого теплообменника и его верификация;

- выполнение расчетного исследования для получения критериальных зависимостей, и разработка метода аналитического расчета;

- разработка технологии изготовления и сварки пластин теплообменного аппарата

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Реализован комплексный подход к проектированию пластинчатого теплообменного аппарата. На основании существующих методов параметризации разработана параметрическая модель пластины и оснастки теплообменника, а также расчетные параметрические модели теплоносителей. Разработана методика трехмерного расчета, характерной новизной которой является возможность решения комплексной задачи газодинамики и теплопередачи. Разработана технология изготовления и сварки пластин теплообменника. Получены критериальные зависимости на основе трехмерного расчетного исследования, и разработана программа аналитического расчета для определения основных параметров теплообменника (степень регенерации, потери давления) при заданных размерах.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

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

Результат исследования по определению оптимального варианта расчетной сетки позволяет снизить затраты компьютерных мощностей и времени.

Методика трехмерного расчета позволяет провести виртуальный эксперимент и уточнить конструкцию теплообменного аппарата при заданных параметрах. Программа аналитического расчета при заданных размерах пластины позволяет оценить целесообразность применения выбранной конструкции ТА для последующего более глубокого 3D-исследования.

Использование параметрической модели пластины и оснастки теплообменника снижает время проектирования с 8 ч. до 2-5 мин, что также способствует ускорению подготовки расчетных моделей.

Технология изготовления и сварки пластин теплообменника позволяют изготавливать теплообменники приемлемыми массогабаритными и прочностными характеристиками.

Результаты работы и методики проектирования используются на предприятии ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Методология и методы исследования

При подготовке и проведении эксперимента использованы: ГОСТ 24026-80 (Исследовательские испытания; Планирование эксперимента), методические указания РД 50-411-83 (Расход жидкостей и газов методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств).

При разработке параметрических моделей использовались методы табличной, иерархической, вариационной и геометрической параметризации.

Достоверность результатов. Полученные в результате исследования данные не противоречат опубликованным работам других авторов. Экспериментальные исследования проводились по стандартизированным методикам с помощью аттестованной аппаратуры.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: 29-ый Конгресс Международного Совета по аэроавиационным наукам (ICAS) 7-12 сентября 2014 г. (Санкт-Петербург), III Международная научно-практическая конференция: «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия», 15-16 августа 2014 (Новосибирск); 16-ая Международная научно-практической конференция «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике», 5-6 декабря 2013 г. (Санкт-Петербург), 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 (Казань), Международная научно-практической конференции «Образование и наука без границ», 7-15 декабря 2013. (г.

Пшемысль), LVIV Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок. 6-7 сентября 2012 г. (Санкт-Петербург), Девятой Всероссийской научно-практической конференции «Применение ИПИ – технологий в производстве» 18-20 ноября 2011 (Москва).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Методика расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата.
- Результаты анализа конструкций теплообменных аппаратов для определения рационального выбора теплообменной поверхности и ее геометрических параметров.
 - Результаты анализа технологий изготовления теплообменного аппарата.
 - Результаты выбора геометрических параметров, удовлетворяющих требованиям по эффективности и технологичности;
 - Геометрические параметризованные 3D-модели пластин и штампов, а также теплоносителей для расчета и изготовления теплообменного аппарата.
 - Метод трехмерного численного расчета параметров теплообменного аппарата.
 - Верификация метода трехмерного численного расчета.
 - Программа аналитического расчета для определения основных параметров теплообменника (степень регенерации, потери давления) при заданных размерах пластины.

Личный вклад соискателя

Соискательница 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 теплообменника. Принимала участие в разработке алгоритма методики расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата.

Автор принимала непосредственное участие в выполнении экспериментальных исследований по определению теплогидравлических характеристик пластинчатого теплообменного аппарата, полученного методом послойного спекания, занималась разработкой методики сбора и обработки информации. Соискательница 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 участвовала в доводке данной программы.

Разработаны: методика расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата, геометрические модели параметризованной пластины и оснастки теплообменника, а также теплоносителей. Метод трехмерного численного расчета, учитывающий особенности геометрической формы пластины и свойства теплоносителей и аналитический метод 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.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Повышение эффективности газотурбинных двигателей и установок за счет сложных термодинамических циклов

Одним из направлений дальнейшего развития газотурбинных двигателей и установок (ГТД и ГТУ) является применение сложных термодинамических циклов [45]. К ним относится цикл с регенерацией тепла. Газотурбинный двигатель с регенерацией тепла — двигатель, термодинамический цикл которого отличается от обычного двигателя наличием регенеративного охлаждения рабочего тела на выходе из газовой турбины и соответственно регенеративного подогрева воздуха за компрессором [79]. Данное мероприятие повышает экономичность ГТД, что особенно актуально для летательных аппаратов с большой продолжительностью полета. На рисунке 1 показана одна из схем ГТД с регенерацией тепла. Благодаря предварительному подогреву воздуха в теплообменнике для достижения заданной температуры газа перед турбиной требуется меньший подвод тепла в камере сгорания [80]. Из компрессора 1 сжатый воздух попадает в теплообменник 4, далее нагретый и сжатый воздух поступает в камеру сгорания 3, далее газ поступает в турбину 2, которая может быть соединена с генератором 5 (энергетическая наземная ГТУ). После расширения в турбине горячие газы проходят в теплообменник 4 и выбрасываются в атмосферу.

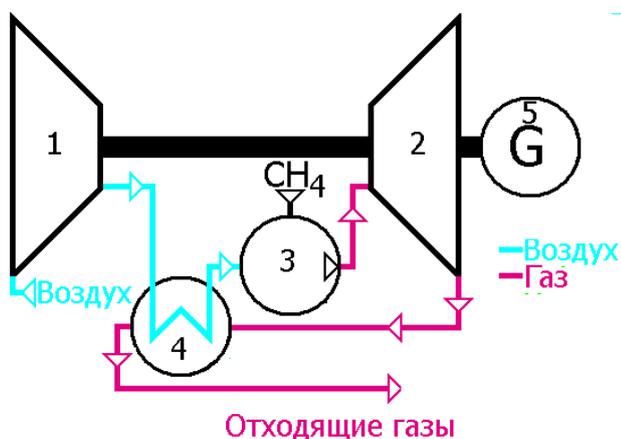


Рисунок 1 - Схема ГТД с регенерацией тепла

Применение регенерации тепла в реальных тепловых двигателях позволяет уменьшить необратимость цикла, связанную с конечной разностью температур теплоотдатчика и рабочего тела при передаче тепла от первого к последнему. Регенеративный подогрев рабочего тела устраняет (на одних участках цикла полностью, на других частично) необратимый теплообмен и снижает разность температур между теплоотдатчиком и рабочим телом [14].

Регенерация тепла является

В работах [73, 79, 80] показано, что цикл с регенерацией тепла возможно применять в целях повышения экономичности газотурбинных установок.

В настоящее время ГТД в основном используется в:

- авиационной промышленности;
- энергетическом комплексе (ГТУ больших мощностей – более до 250 кВт);
- нефтегазовой промышленности и др.

Применение сложных термодинамических циклов открывает новые перспективы использования ГТД. Так благодаря повышению КПД цикла ГТД становится конкурентоспособной заменой поршневых двигателей, которые широко применяются в:

- машиностроении (автомобили, танки);
- энергетическом комплексе (малых мощностей – до 250 кВт);
- авиации (беспилотные летательные аппараты, вертолеты) и др.

Идея применять в автомобиле- и танкостроении газотурбинные двигатели возникла давно. Но лишь за последние несколько лет их конструкция достигла той степени совершенства, которая дает им возможность на существование. Высокий уровень развития теории лопаточных двигателей, металлургии и техники производства обеспечивает возможность создания надежных газотурбинных двигателей, способных с успехом заменить на автомобиле поршневые двигатели внутреннего сгорания [66]. В работе [21], например, предложена конструктивная схема и отмечены преимущества автомобиля с ГТД, к которым относятся: сниженный вес, более простая конструкция, легкость

запуска. В данной схеме также использован цикл с регенерацией тепла. Примером применения регенерации тепла в танкостроении является

Особенную роль играет сложный цикл в энергетическом комплексе в нише малых мощностей (до 250 кВт). Только благодаря использованию цикла регенерации использование микрогазотурбинных установок (МГТУ) становится оправданным, поскольку КПД МГТУ без цикла регенерации составляет ~24 %, а при регенерационном цикле 28 – 32 % [62,63]. Следует отметить, что на основе регенерационного цикла во ФГУП ЦИАМ им. Баранова была разработана схема с внешним подводом тепла, которая позволяет МГТУ использовать не только жидкое и газообразное топливо, но и твердое топливо (древесину) [61-65].

Необходимо отметить, что использование регенерации тепла в газотурбинных двигателях более актуально и перспективно, это также открывает возможность использования одинаковых технологий в энергетических и авиационных двигателях. Кроме того, при сравнении ГТД и поршневых двигателей (ПД), можно выделить следующие преимущества ГТД (для всех областей применений):

1. Низкий уровень эмиссии NO_x (при использовании низкоэмиссионных камер сгорания);
2. Возможность применения газообразного, жидкого и твердого топлива (МГТУ с внешним подводом тепла);
3. Высокие эксплуатационные характеристики:
 - минимальное потребление масла (в перспективе без масла). Примером служит микротурбинная установка фирмы Capstone, использующая систему воздушных подшипников;
 - быстрый запуск установки в любых климатических условиях ($\pm 50^\circ\text{C}$);
4. Длительная работа в диапазоне от режима холостого хода до 100% нагрузки с одновременной выработкой электроэнергии и тепла;
5. Более высокие параметры экономичности;
6. Возможность эксплуатации, как автономном режиме, так и параллельно с сетью;

7. Уровень вибраций ГТД существенно ниже, чем у ПД;
8. Ресурс до капитального ремонта в среднем в 2,5÷4 раза выше (40÷60 тыс. против 15÷20 тыс.ч.);
9. Затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию в 1,5÷6 раз ниже (0,3центов за 1 кВт•ч против 1,5÷2 у ПД);
10. Интервал между техническими обслуживаниями около 8 тыс., против 750÷1500 ч. у ПД [61].
11. Вес установки ниже, чем у ПД.
12. Простая конструкция, свободная от дополнительного оборудования [21].

ГТД с регенерацией тепла

Разработки ГТД с регенерацией известны с середины прошлого века, так одной из первых попыток создания авиационного двигателя с регенерацией тепла была предпринята фирмой «Бристоль Сиддли». Спроектированный этой фирмой двигатель «Тезей» с трубчатым теплообменником не нашел, однако, практического применения из-за неудовлетворительных габаритно-массовых показателей. Далее фирма «Аллисон» (США), приняв за основу турбовинтовой двигатель Т56-А-7, построила полноразмерный опытный двигатель мощностью 3680 кВт. В ходе экспериментального исследования опытного двигателя была подтверждена эффективность регенеративного цикла: удельный расход топлива при использовании теплообменника снизился на 36 % [80].

В настоящее время ГТД с регенерацией тепла находят применение в энергетической области. Особенно целесообразно применение регенерации тепла в малогабаритных ГТД – микротурбинах. Из-за низкой эффективности данный вид энергетического оборудования не сможет быть конкурентоспособным. Примером микротурбин с регенерацией тепла может стать компания «Capstone Turbine Corporation» (США). Двигатели широкого модельного ряда С15-С1000 соответствуют микротурбинам мощностью от 15 до 1000 кВт, широко используются во многих странах. Рекуператор использует тепловую энергию выхлопа для предварительного нагрева воздуха в камере сгорания, что позволяет снизить объем потребляемого топлива практически в два раза [46].

Ряд компаний также работает в данном направлении. Одна из таких компаний — «Honeywell Power Systems». Одна из ее микротурбин Parallon 75 имеет максимальную электрическую мощность 75 кВт и тепловую мощность 90 кВт [73]. К сожалению, российские аналоги, находятся в стадиях разработки.

В связи с этим можно заключить, что работы в этом направлении остаются перспективными. ГТД имеет в настоящее время широкое применение в энергетике и авиации [80], но применение регенерационных циклов будет способствовать прогрессу многих других отраслей промышленности. Однако, для качественной реализации конструктивных схем ГТД со сложных циклов необходимо провести ряд исследований в области используемых технологий.

Одной из ключевых технологий является теплообменный аппарат, причина этого в значительной степени заключается в том, что использование теплообменника приводит к значительному усложнению конструкции двигателя, увеличению его размеров и массы, снижению эксплуатационной надежности [80]. Именно от этого узла также будут зависеть степень регенерации и суммарные потери. Значимость этого узла также обусловлена тем, что именно он определяет окончательную стоимость установки.

Значительное число зарубежных публикаций и докладов по ГТД с промежуточным охлаждением и регенерацией посвящено исследованию в рамках программы «Component validator for Environmentally friendly Aero Engine» (CLEAN), предусматривающей разработку узлов и деталей экологически чистого двигателя с приводом вентилятора через редуктор и применением цикла с промежуточным охлаждением [67].

Целью программы CLEAN является снижение расхода топлива на 20%, уровней эмиссии CO₂ на 20% и NO_x на 80% относительно норм ICAO 1996 г. Работы по этой программе сосредоточены на разработке технологий для двигателей, ввод в эксплуатацию которых предполагается не ранее 2010...2015 гг. Руководит работами французская компания SNECMA Moteurs, в международную рабочую группу входят MTU Aero Engines (MTU), Fiat Avia, Eldim, Avio, Techspace Aero и Volvo Aero, а также два института: ESIL, Ирландия и CEPB,

Франция. Схематический разрез двигателя-демонстратора, разрабатываемого по программе CLEAN и распределение работ приведены на рисунок 2.

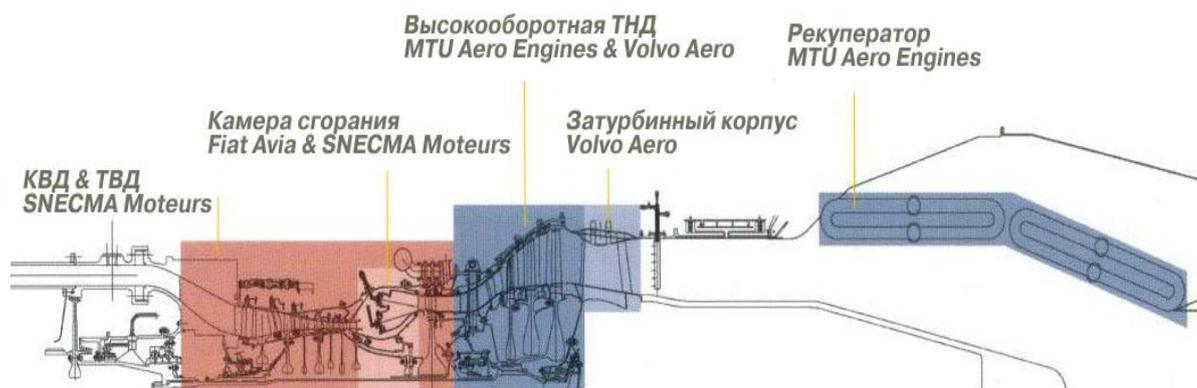


Рисунок 2 -Схема двигателя-демонстратора и распределение работ по программе CLEAN

По проекту CLEAN разработаны и испытаны:

- система активного управления помпажом;
- высокоэффективный высоконагруженный компрессор высокого давления;
- малоэмиссионная камера сгорания со ступенчатым горением и предварительным смешением и испарением топлива;
- высокотемпературная турбина высокого давления;
- высокооборотная турбина низкого давления;
- затурбинный корпус с применением новых жаростойких материалов;
- теплообменник-рекуператор.

По оценкам европейских исследователей, применение промежуточного охлаждения и регенерации тепла за турбиной позволит улучшить экономичность двигателей на 4...6%.

Одной из основных проблем, решаемых в программе CLEAN, является создание рекуператора для авиации, обладающего низкой массой. Минимальная масса является одной из ограничивающих характеристик рекуператора. Основным недостатком рекуператора MTU (рисунок 3), разработанного в рамках программы CLEAN, является большой вес ~1000 кг, что существенно снижает выигрыш от использования регенерации тепла. Поэтому работа по оптимизации рекуператора будет продолжена [2]. В 2005 г. руководство программы CLEAN

считало, что при сохранении финансирования проводимых работ такой рекуператор может быть создан фирмой MTU и ее партнерами через 10...15 лет.

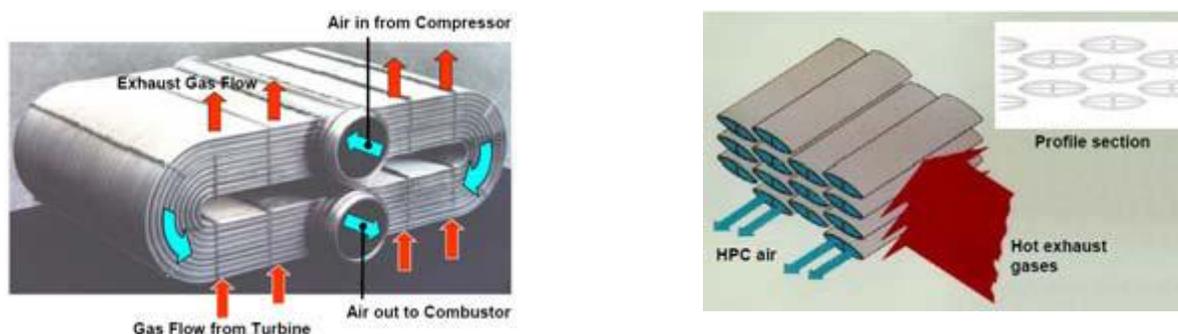


Рисунок 3 - Рекуператор MTU с профилированными трубками.

В ходе выполнения работ по программе CLEAN была выработана концепция Intercooled Recuperated Aeroengine (IRA) по разработке ГТД с промежуточным охлаждением и регенерацией тепла.

В 2003 г. компания MTU показала на авиационном салоне в Ле-Бурже изготовленный теплообменник-рекуператор и макет двигателя IRA. К концу 2003 г. планировалось изготовить и собрать двигатель, а весной 2004 г. провести первые испытания. Однако затем сроки были сдвинуты и испытания демонстрационного двигателя были проведены в марте 2005 г. Конструктивная схема ГТД (рисунок 4) была представлена в докладе представителя MTU в 2005 г. [90].

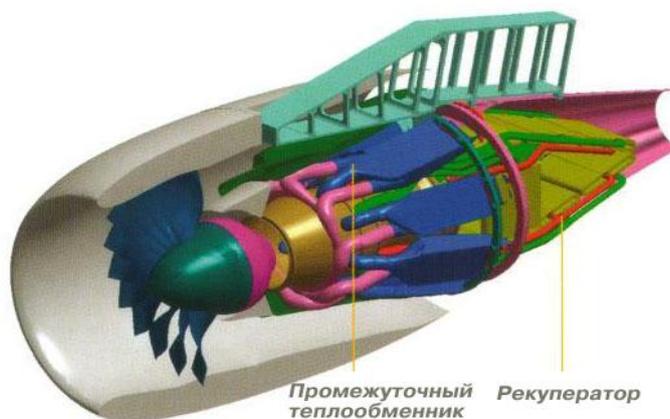


Рисунок 4 - Конструктивная схема перспективного двухконтурного ГТД с промежуточным охлаждением и регенерацией тепла за турбиной

Из имеющихся в открытом доступе материалов по концепции IRA видно, что рекуператор состоит из нескольких секций, выполненных по схеме MTU.

По конструктивному исполнению промежуточного охлаждения информации практически нет. На ГТД разработки MTU, как следует из представленных схем, промежуточный охладитель - теплообменник пластинчатого типа, состоящий из модулей, установленных в канале наружного контура.

Успешная реализация концепции IRA, начатая в программе CLEAN, была продолжена в следующей программе NEWAC (New Aero Engine Core Concept) под руководством MTU. Концепция IRA была положена в основу программы как одно из четырёх направлений развития (рисунок 5).

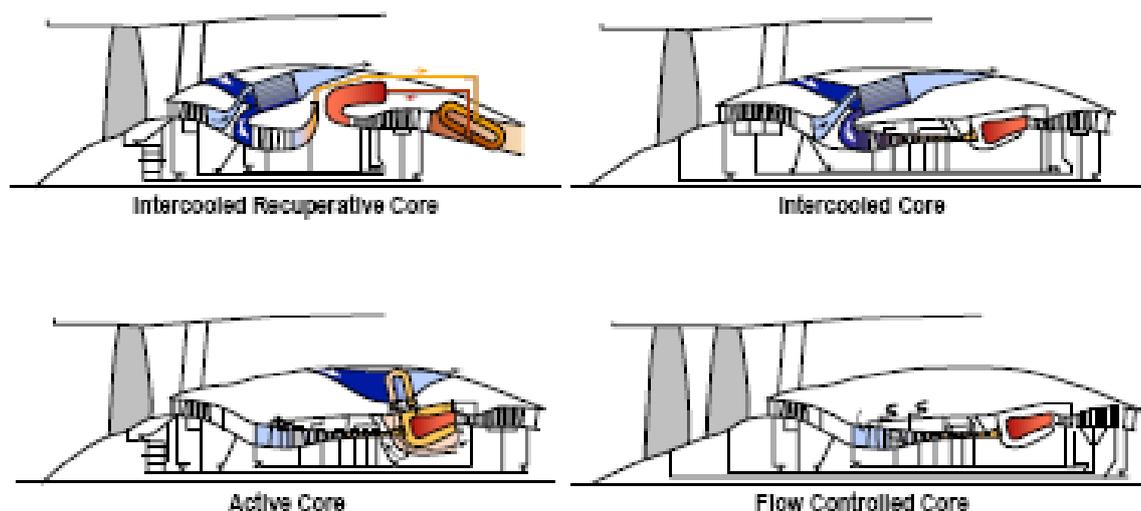


Рисунок 5 - Концепции развития двигателей по программе NEWAC

В рамках программы NEWAC разрабатывается ГТД с промежуточным охлаждением, центробежной последней ступенью компрессора и регенерацией тепла. Схема ГТД по программе NEWAC, развивающего концепцию IRA, представлена на рисунке 6.

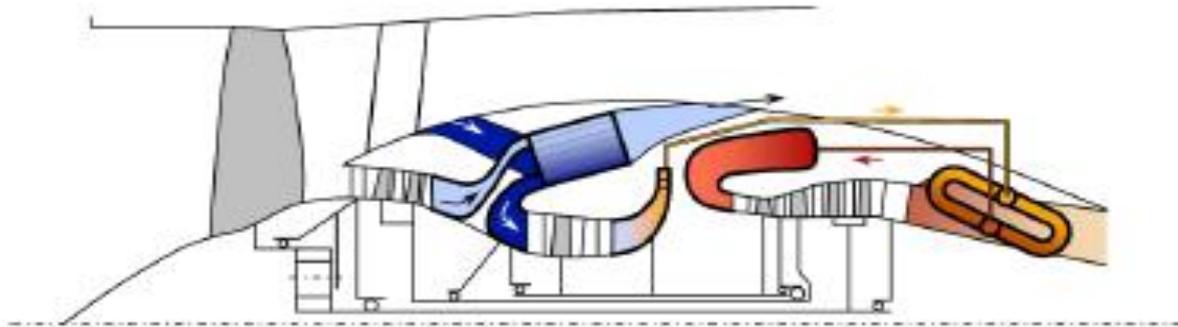


Рисунок 6 -Схема ГТД с промежуточным охлаждением, центробежной последней ступенью компрессора и регенерацией тепла по программе NEWAC

В стационарных ГТД также используются сложные термодинамические циклы. Стационарная установка значительно снижает требования к конструкции теплообменника, особенно по массе, но взамен требует многократного увеличения ресурса.

Наиболее широкое распространение сложные термодинамические циклы получили в микротурбинах. Эти простые одновальные установки имеют малые размеры и мощность, что приводит к большим относительным потерям. При работе в простом цикле микротурбины имеют низкий КПД (15...20 %). Переход на сложный цикл повышает КПД выше 30 %. Промежуточное охлаждение не применяется из-за использования простого одноступенчатого центробежного компрессора.

Большой интерес в понимании эффективности применения теплообменников в газотурбинном двигателестроении представляет опыт зарубежных фирм в создании микротурбинных установок. Термодинамический КПД таких установок увеличивается более чем в два раза (с 12...15 до 30...35 %) при использовании рекуператора.

Микротурбинные установки с рекуперацией становятся конкурентоспособными при эффективности рекуператора 88...90 % и

относительных суммарных потерях давления в нем в пределах 5...6 %. При разработке рекуператоров основное внимание уделяется газовому тракту, поскольку его аэродинамическое сопротивление влияет на КПД значительно, чем сопротивление воздушного тракта.

Конструкция рекуператора должна обеспечивать ресурс не менее 40 тыс. часов в агрессивной среде продуктов сгорания с водяными парами и выдерживать не менее 20 тыс. термических циклов при перепаде давления между газовым и воздушным трактами до 400 кПа. При проектировании важно обеспечить высокую плотность упаковки рабочей поверхности теплообменника и низкую стоимость.

1.2. Обоснование выбора схемы теплообменного аппарата

Разработка более эффективных компактных теплообменных аппаратов (ТА) направлена на снижение затрат энергии и материалов, а следовательно и стоимости. Работа в данном направлении является весьма важной, поскольку теплосиловое оборудование зачастую составляет до 50% стоимости всего агрегата.

ГТД сложного цикла характеризуются высокими требованиями к теплообменникам. Прежде всего, это высокие давления и температуры. Теплообменный аппарат должен работать при температурах до 1000 К и давлениях до 400 кПа. Для таких условий подходят цельносварные и (с ограничениями) паяные матрицы теплообменников.

Жесткие требования по массе и габаритам накладывают множество ограничений на конструкцию, крепление и эксплуатацию теплообменников. Прежде всего, это минимальная толщина рабочей поверхности, корпуса и трубопроводов. Также для облегчения конструкции теплообменники или отдельные секции теплообменников должны выполняться неразборными с минимумом разборных стыков. Конструкция матриц должна воспринимать внутренние усилия без передачи на корпус ГТД.

Материал матрицы должен противостоять выгоранию и иным повреждениям в течение всего срока службы теплообменника.

Основными критериям при выборе типа и схемы теплообменника являются высокие характеристики теплопередачи при минимальных гидравлических потерях.

Из всего многообразия типов теплообменников для использования в ГТД сложного цикла интерес представляют два: пластинчатые и трубчатые рекуператоры. Эти теплообменники герметичны и обладают удовлетворительными массой и габаритами конструкции.

Принцип действия рекуператора – потоки теплоносителей разделены стенкой (рабочей поверхностью), через которую и происходит обмен теплом, в пределах до полного выравнивания температур теплоносителей. Все остальные элементы конструкции теплообменника вспомогательные и предназначены для правильной организации подвода/отвода теплоносителей к рабочей поверхности.

Тип теплообменника определяет конструктивное исполнение рабочей поверхности. В трубчатом теплообменнике один теплоноситель идёт по трубам (трубному пучку), а другой в межтрубном пространстве. В пластинчатом теплообменнике оба теплоносителя проходят через пакеты, образованные пластинами [8].

Выбор теплопередающей поверхности (и типа теплообменника) – один из важнейших этапов разработки теплообменников. Поскольку в ГТД используются теплообменники типа «газ-газ», следует учитывать, что для обеспечения необходимой эффективности такие теплообменники требуют в десятки раз большие поверхности теплообмена по сравнению с теплообменниками типа «жидкость – жидкость». Этот факт привел к разработке множества методов конструирования развитых теплообменных поверхностей для газовых теплообменников, характеризующихся большим отношением площади к объёму [39].

Одним из основных критериев определяющих выбор теплопередающей поверхности является тепловая эффективность, то есть способность передавать максимальное количество тепла с единицы площади рабочей поверхности. Из этого очевидны два пути повышения тепловой эффективности теплообменников:

интенсификация теплообмена путём повышения тепловой эффективности рабочей поверхности и повышение плотности упаковки, т.е. площади рабочей поверхности в единице объёма теплообменника. Компактность теплообменника важный параметр, компактные теплообменники обеспечивают большой удельный теплоотвод при сравнительно малом их объеме и весе[29].

Отношение к температурному напору равняется

Исходя из:

$$Q/\Delta t = k\beta V \quad (1)$$

Где Q - тепловая нагрузка аппарата, Δt – температурный напор, k - коэффициент теплопередачи, β - отношение поверхности теплообмена на одной стороне пластинчатого теплообменника к объему между пластинами на этой же стороне, V – общий объем теплообменника.

В общем случае при одинаковом коэффициенте теплопередачи k , чем компактнее теплообменник, тем больше тепла отводится от удельного его объема. Компактность сама по себе является залогом высокой эффективности теплообменной поверхности, так как сечения каналов компактной поверхности малы, а коэффициент теплоотдачи всегда изменяется обратно пропорционально эквивалентному диаметру канала [29].

Актуальной является задача интенсификации процесса теплообмена и создания высокоэффективных теплообменных аппаратов. Для интенсификации процессов теплообмена применяют следующие приемы:

- Искусственная турбулизация потока. При низких скоростях потоков теплоносителей течение вдоль гладкой поверхности становится ламинарным, пристеночный слой теплоносителя быстро обменивается теплотой с рабочей поверхностью и другим теплоносителем и в дальнейшем ухудшает теплопередачу от удалённых слоёв потока теплоносителя. Профилирование рабочей поверхности обеспечивает искусственное перемешивание (турбулизацию) теплоносителя для поддержания температуры пристеночного слоя теплоносителя. Возможно, обеспечить естественную турбулизацию потока, но для этого требуются высокие

скорости течения (на порядок больше используемых), приводящие к большим гидравлическим потерям.

- Оребрение поверхности теплообмена. Оребрение увеличивает площадь рабочей поверхности [39]. Использовать оребрение целесообразно как для повышения эффективности, так и для снижения массы теплообменника. Площадь оребрения, до 10 раз превосходящая площадь рабочей поверхности, не подвержена одностороннему давлению, а поэтому ребра можно выполнять более тонкими, и этим достичь значительного снижения массы теплообменника.

При выборе поверхности теплообмена стоит помнить о важности влияния на конструкцию теплообменника затрат энергии на преодоление трения, в связи с этим в теплообменниках «газ-газ» стремятся уменьшить затраты энергии на преодоление трения [39].

Рассмотрим характеристики рабочих поверхностей пластинчатого и трубчатого теплообменника.

Пластинчатый теплообменник напоминает пакет из плоских пластин, между которыми находятся соединяющие ребра [39]. Потoki теплоносителей проходят между пластинами, образующими рабочую поверхность, как показано на рисунке 7. Пластины, собранные в единый пакет, образуют между собой каналы, по которым протекают теплоносители, обменивающиеся тепловой энергией [46]. Поэтому технологическую единицу расчётной поверхности образует смежная пара пластин, образующая один внутренний канал.

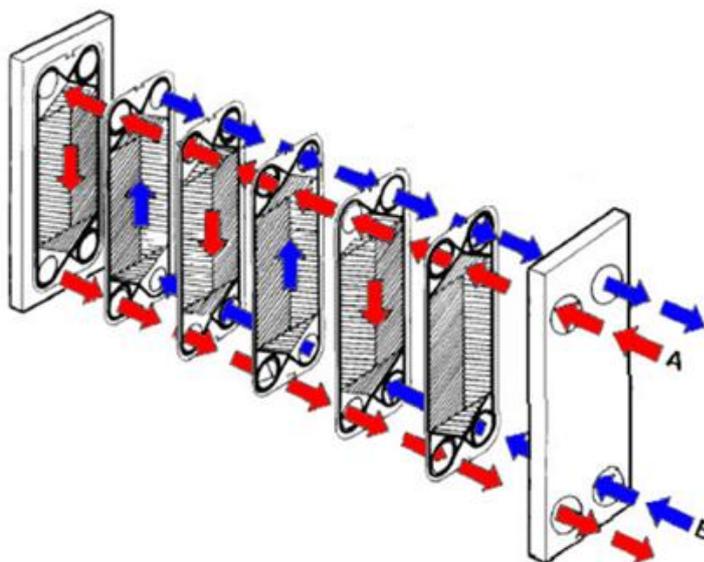


Рисунок 7 - Течение в пластинчатом теплообменнике

Специфическая поверхность теплообменника обеспечивает сильную турбулентность теплоносителей при движении их по каналам [53]. Для интенсификации (турбулизации) теплообмена, как правило, применяют «поверхность Френкеля» («набивку Френкеля») (рисунок 8), образованную двумя одинаковыми гофрированными пластинами, сложенными так, чтобы гофры образовывали угол φ .

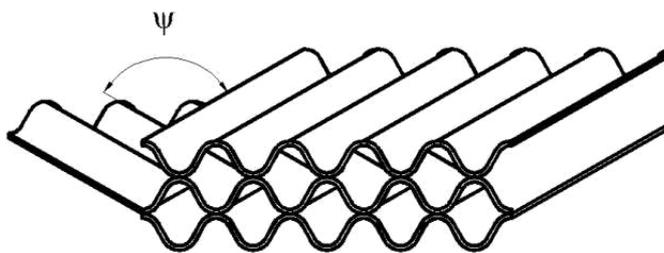


Рисунок 8 - Поверхность Френкеля

В точках пересечения гофров пластины соприкасаются и тем самым образуют опорную сетку для тонкостенных пластин, нагруженных давлением теплоносителей. Несколько таких точек выделены красным цветом на рисунке 9.

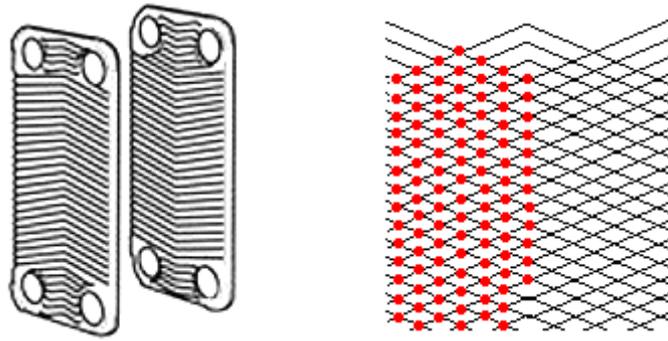


Рисунок 9

Рисунок 9 - Взаимная ориентация пластин и опорная сетка

Интерес также представляет вариант поверхности Френкеля, где прямолинейный гофр заменён зигзагообразным (синусоидальным), что позволяет лучше интенсифицировать процесс и увеличить время пребывания в теплообменном аппарате теплоносителей, а, следовательно, повысить степень регенерации. В теплообменнике из таких пластин угол между гофрами по ходу потока постоянно меняется от $-\varphi$ до φ .

Трубчатый теплообменник представляет собой трубную решетку (трубный пучок), по которому проходит один из теплоносителей. Другой теплоноситель проходит через межтрубное пространство (рисунок 10) [36].

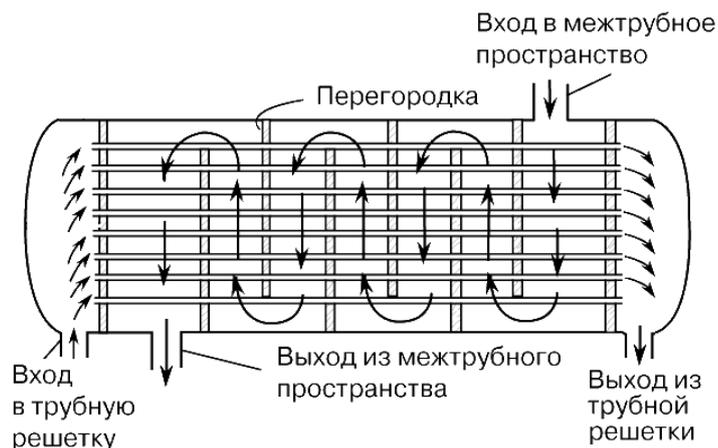


Рисунок 10 - Схема трубчатого теплообменника

Кожух (корпус) кожухотрубчатого теплообменника представляет собой трубу, сваренную из одного или нескольких стальных листов. Кожухи различаются главным образом способом соединения с трубной доской и

крышками. К цилиндрическим кромкам кожуха приваривают фланцы для соединения с крышками или днищами. На наружной поверхности кожуха прикрепляют опоры аппарата [36]. Внутри труб, образующих пучок, течение ламинарное, поэтому для интенсификации теплообмена трубы часто делаются оребренными. Характер течения в межтрубном пространстве может быть как ламинарным, так и турбулентным и определяется шагом труб, их формой и скоростью потока теплоносителя.

Наиболее высокими показателями компактности и технологичности обладают пластинчатые теплообменные аппараты. Сравнение различных поверхностей по удельной теплопередаче показало наибольшую эффективность поверхности Френкеля, обладающей также минимальным весом и объемом при прямом сопоставлении поверхностей [39, 29].

Схемы течения в теплообменных аппаратах

Характеристики теплообменника, кроме типа, определяются схемой течения потоков относительно друг друга. Существует три основных схемы течения потоков: прямоток, противоток, перекрестный ток и сложный.

При прямотоке течения оба теплоносителя подводятся к теплообменнику с одной и той же стороны, и движутся параллельно друг другу в направлении другой стороны (рисунок 11). В таком теплообменнике разность температур теплоносителей уменьшается от входов к выходам. Температуры теплоносителей на выходе теплообменника в пределе выравниваются на средней величине, определяемой параметрами теплоносителей [53].

В схеме противотока теплоносители подводятся с разных сторон и движутся навстречу параллельно друг другу (рисунок 11). Разность температур теплоносителей практически постоянна по всей длине теплообменника. Для близких по свойствам теплоносителей, при достаточном размере теплообменника и относительно небольших расходах возможен полный теплообмен. Таким образом первый теплоноситель на выходе из теплообменника будет иметь ту же температуру, как второй на входе и наоборот.

В перекрёстном токе теплоносители движутся поперек друг друга, как показано на рисунке 11 (для каждого отдельного промежутка между перегородками). Разность температур теплоносителей меняется не только по ходу, но и по ширине потока. Температуры теплоносителей на выходе теплообменника средние между прямоток и противотоке в зависимости от организации потоков.

Схема теплообменника определяет процесс передачи тепла и соотношение температур на выходе теплообменника.

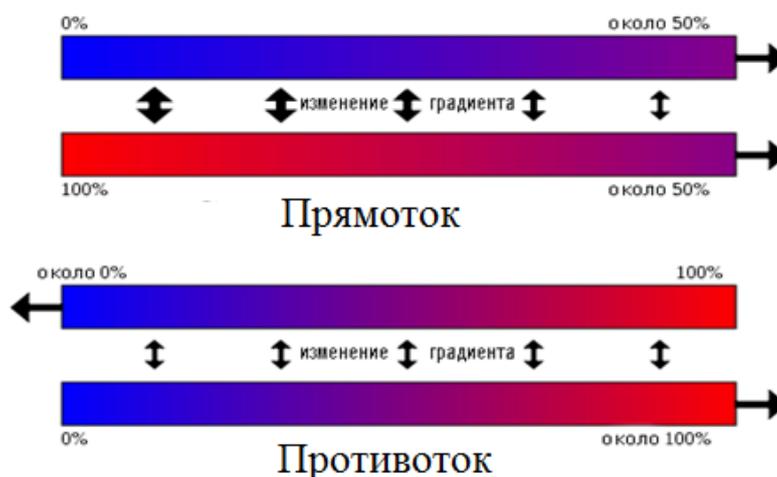


Рисунок 11 - Схема прямоток и противотока

Для применения в качестве промежуточного охладителя и рекуператора из-за высоких требований к эффективности наиболее пригодны теплообменники с противотоком. Так как и пластинчатый и трубчатый теплообменники в общем виде являются перекрестноточными, для получения требуемых характеристик применяются конструктивные мероприятия. Пластинчатый теплообменник вместо наиболее рациональной квадратной формы делается прямоугольным. В трубчатом теплообменнике также увеличивают отношение длины к диаметру трубного пучка. Кроме того, теплообменники выполняются многосекционными, так что в каждой секции изменение параметров невелико независимо от схемы, а параметры теплообменника в целом соответствуют требуемым [27].

В некоторых рекуперативных ТА передача теплоты происходит при изменении агрегатного состояния одного из теплоносителей (испарители и

конденсаторы холодильных машин, паровые подогреватели вязких нефтепродуктов и пр.) [76].

Конструкция трубчатого теплообменного аппарата с плотной упаковкой и использованием тонкостенных трубок (0,1...0,2 мм) для обеспечения необходимых параметров по прочности и высокой степени регенерации сложна в изготовлении. Это связано с трудностью сварки трубок с решеткой, которая имеет толщину в несколько раз больше, чем толщина трубки. Плотная упаковка вызывает опасность прожечь соседние трубки. Касательно трубчатых теплообменников необходимо также отметить то, что тонкостенные трубки малого диаметра из жаропрочных сталей, которые требуются для создания теплообменника, имеют высокую стоимость по сравнению с металлической лентой для изготовления пластин. Использование трубчатых поверхностей нагрева в компактных теплообменниках связано также с технологическими трудностями, так как при диаметре трубок 1-2 мм количество их в теплообменнике может исчисляться тысячами штук [80].

Однако, также существует проблема выбора вида сварки пластин теплообменного аппарата в конверт. При работе двигателя с регенерацией тепла в теплообменном аппарате должна быть обеспечена высокая прочность соединений. Соединения пластинчатого теплообменника должны работать при высоких температурах и давлениях. При таких температурах невозможно использовать паянные и разборные конструкции. Анализ открытых источников показал, что, несмотря на несомненные преимущества пластинчатых теплообменных аппаратов над другими типами, а именно:

- Протекание среды тонким слоем с сильной турбулизацией потока обеспечивает высокую теплопередающую способность теплообменник;

- Гофрированная поверхность пластины позволяет получить турбулентный поток при сравнительно невысоких скоростях протекания потока;

- Величина недогрева при расчетных режимах может достигать 1-2 °С, в то время как для лучших образцов кожухотрубных теплообменников эта величина составляет 5-10 °С.

Сопоставление опытных данных (для пластинчатого аппарата) и расчетных (для двухтрубного) при одинаковых числах Re показало существенное преимущество пластинчатого аппарата перед трубчатым теплообменником (двухтрубным). Так, при $Re \approx 2000$ безразмерный коэффициент теплоотдачи $Nu/Pr^{0,43}$ пластинчатого аппарата более чем в 18 раз выше двухтрубного [43].

В связи с этим, наиболее целесообразным вариантом является использование пластинчатого теплообменника. Из всего множества теплообменных поверхностей, разработанных для пластинчатых теплообменных аппаратов, широкие возможности для интенсификации теплообмена представляет поверхность типа «набивка Френкеля». Данная поверхность теплообмена может быть образована гофрированными листами, у которых гофры на смежных пластинах направлены под некоторым углом друг к другу. При течении рабочей среды по углублениям пластин взаимодействие скрещивающихся струек воздуха/газа приводит к турбулизации потоков, увеличению теплоотдачи и гидравлического сопротивления. Меняя угол взаимного наклона гофров, можно в широких пределах изменять интенсивность теплообмена.

Учитывая отмеченные выше положительные качества поверхностей типа «набивки Френкеля» проведем сравнение интенсивности теплообмена при различных углах скрещивания. Подробные экспериментальные исследования «набивки Френкеля» проведены в [73]. Основываясь на экспериментальных результатах, сравним при всех прочих равных условиях поверхность теплообмена с гладкими каналами (с углом скрещивания 0°) и при угле скрещивания в 37° (рисунок 12, 13). В работе [73] отмечается, что при угле скрещивания от 0 до 37° наблюдается наиболее благоприятное соотношение между ростом критерия подобия Нуссельта Nu и коэффициента гидравлического сопротивления ξ . Автор отмечает, что данный коэффициент для компактных поверхностей теплообмена определяется преимущественно экспериментально. По каналу постоянного сечения S движется жидкость, параметры которой (давление p , температура T , величина и профиль скорости ω) соответствуют средним значениям и по длине канала не меняются.

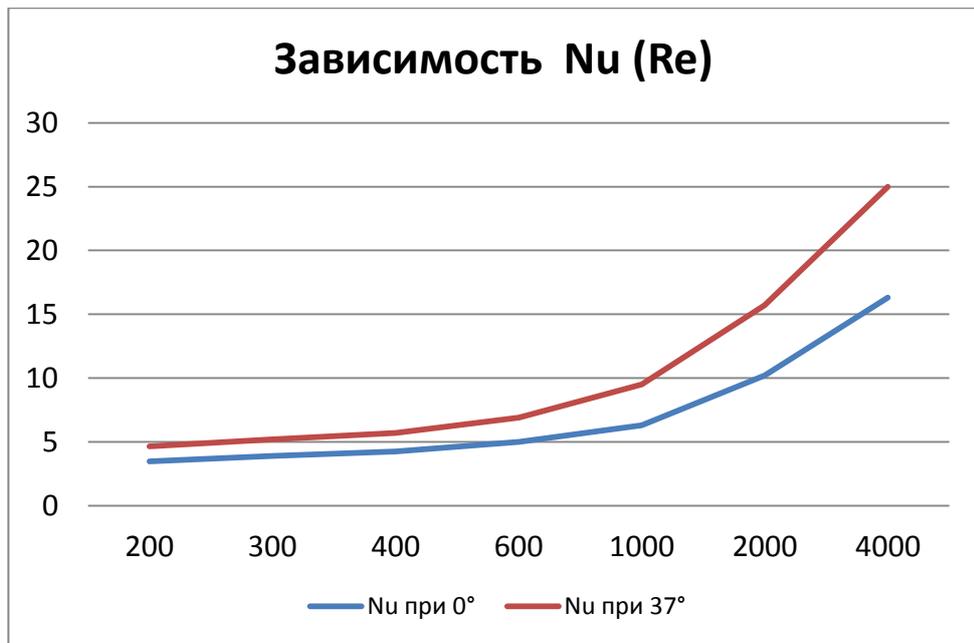


Рисунок 12 – Зависимость Nu (Re)

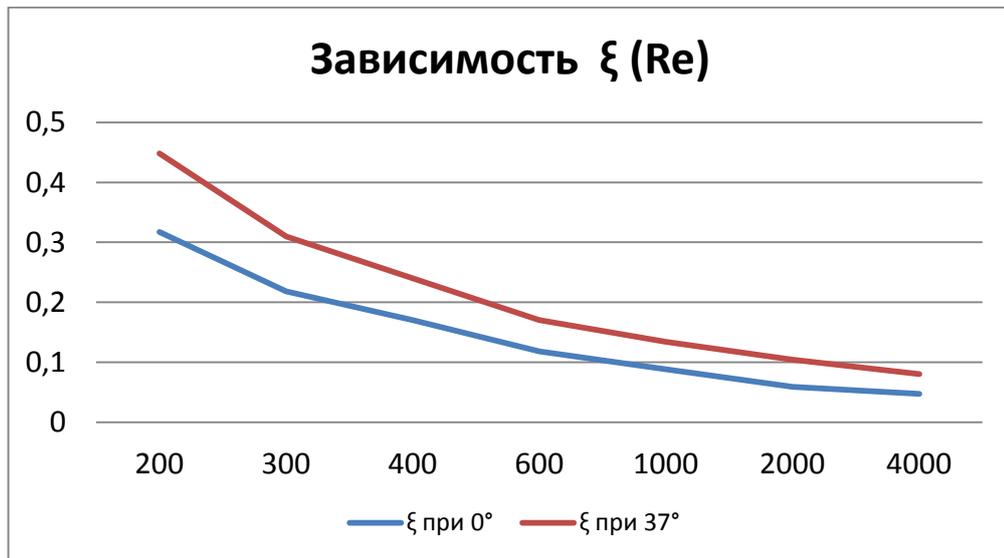


Рисунок 13 – Зависимость ξ(Re)

Трение струек жидкости между собой и о стенки канала, вихреобразование на шероховатой поверхности или турбулизирующих выступах приводит к потерям давления, которые на длине канала L составляют $\Delta p_{\text{пов.}}$. На основании этих данных рассчитывается коэффициент гидравлического сопротивления ξ .

Из графиков видно, что с увеличением угла скрещивания пластин критерий Нуссельта возрастает в 1,3-1,5 раза и в 1,2-1,5 коэффициент потерь давления ξ по сравнению с гладким каналом (при угле скрещивания 0°).

1.4. Исследования, проведенные в области пластинчатых теплообменников с поверхностью типа Френкель

Рассмотрено несколько экспериментальных исследований, которые представлены в литературе для поверхности типа «набивка Френкеля» и других похожих геометрий. В работе, Савостина и Тихонова [73] представлены данные по эффективности теплопередачи и потерь давления при числах Рейнольдса от 200 до 4000 и углах скрещивания гофра φ от 0 до 144° и при отношении шага гофр к высоте канала гофра $P/H_1 = 2,2$. Также в экспериментальном исследовании полученные данные для угла $\varphi = 30^\circ$ при P/H_1 от 0,8 до 2,3. Средний коэффициент теплоотдачи определялся путем измерения разности температуры воздуха, проходящего через экспериментальную секцию, которая охлаждалась водой и включающего порядка 10-20 областей скрещивающихся гофр (ячеек) в направлении потока. Авторы отметили, что числа Нуссельта значительно увеличивается с увеличением угла скрещивания гофр, особенно при числах Рейнольдса выше 600 (по их предположению это связано с усилением турбулизации потока). Наиболее высокие значения, как по числам Нуссельта, так и по потерям давления достигнуты при самых высоких значениях отношения P/H (при 2), в то время как теплопередача и гидравлические сопротивления снижаются на 15% при снижении P/H с 2 до 1. Авторы пришли к выводу, что для данной геометрии пластины, тепловая энергия и потери на трение с возрастанием угла скрещивания гофр от 0 до 35-45° дает возможность значительно уменьшить теплопередающую поверхность и размеры теплообменника. Данные результаты на 30-40% снижают вес и стоимость. При дальнейшем увеличении угла скрещивания возможно получить более низкие значения площади теплопередающей поверхности и объема теплообменника. Однако, в связи с уменьшением допустимой скорости в поперечном сечении, площадь на входе резко увеличивается.

В.В. Фокке, Дж. Оливье и др. авторы [91] использовали метод электрохимического массопереноса, технику «диффузионного ограничения тока» (DLCT), для определения локальных коэффициентов массопереноса в воде

для $P/H_1 = 2$, при числах Рейнольдса от 10^2 до 10^5 , при углах скрещивания гофр φ от 0 (гофр выровненных к основному потоку, теплоноситель протекал в параллельных прямых каналах синусоидального сечения) до 180° (гофр, расположенных нормально к основному потоку). В Работе также измерено давление у стенки. Исследуемая секция включала несколько десятков ячеек. Массовые коэффициенты переноса представлены в работе как среднее значение J -фактора: $J \equiv Sh/(Re \cdot Sc^{1/2})$, где Sh – число Шервуда (аналог Нуссельта) и Sc – число Шмидта (аналог Прандтля). Потери давления оценивались с помощью критерия f , представляющего собой следующее соотношение: $f = \frac{|\Delta P| \cdot D_{эк}}{\rho \cdot \Delta a \cdot \frac{V^2}{2}}$, где $|\Delta P|$ – потери давления в одной ячейке, $D_{эк}$ – эквивалентный диаметр, ρ – плотность теплоносителя, Δa – длина ячейки, V – средняя скорость. Авторы наблюдали монотонное возрастание и критерия f и J – фактора при углах скрещивания гофр от 0 до 160° . После этих значений данные параметры медленно снижались и минимум достигался при 180° . Наблюдаемое повышение более выражено для перепада давления, чем для массопереноса; например, при увеличении φ с 30° до 160° критерий f увеличивался приблизительно 20-30 раз, в то время как J увеличился только в 2-2,5 раза (в зависимости также и от числа Рейнольдса). Одним из наиболее значимых результатов этого исследования являются зависимости параметров f и J как функций от Re для различных углов гофр. При $\varphi = 0$, переход от ламинарного течения к турбулентному четко виден по резкому скачку f и J при $Re = 6000 - 10\ 000$. С увеличением угла скрещивания, рост f и J замедляется и при соответствующем числе Рейнольдса уменьшается; рост прекращается при угле скрещивания $\varphi > \sim 60^\circ$.

В работе Б.В. Перепелица [57] приведены результаты экспериментального исследования распределения температуры на поверхности теплообменника сложной формы, а именно типа Френкель. Автор рассматривал сечения треугольной формы при числах Рейнольдса от 800 до 19 000. Исследуемая секция содержала более 10 ячеек, в исследовании рассматривался лишь один угол скрещивания – 90° и $P/H_1 = 2,4$. Однако, интерес представляет то, что автор

рассматривает вариант конверта пластин с зазором между ними (0,1 мм, 2,2 мм, 2,6 мм), а также случай замены одной из пластин на гладкую пластину. Основными выводами из данной работы является то, что при контакте пластин наиболее заметное влияние числа Рейнольдса на распределение температуры наблюдается в верхней части гофрированного канала, а с ростом величины зазора между пластинами эта зависимость исчезает, при этом интенсивность теплоотдачи в этой области падает. В случае замены одной гофрированной пластины на гладкую характерные особенности в распределении температуры по периметру канала гофра сохраняются. С ростом числа Рейнольдса интенсивность теплоотдачи в вершине синусоиды повышается, автор связывает это явление с образованием вихря в этой области.

В еще одном исследовании В.В. Фокке [92] использован электрометрический рН метод, с использованием о-крезолфталеина в качестве индикатора, для визуализации структуры потока между скрещивающимися гофрами пластины. Геометрия была такой же, как в описанной работе Фокке выше; авторы ограничиваются исследованием низких чисел Рейнольдса (10-1000), исследовался конверт из двух пластин, пластины устанавливались с разными углами скрещивания по отношению к основному направлению потока.

Г. Гайзер и В. Коттке [94-95] проводили исследование зависимости чисел Нуссельта и критерия f для гофр с углом скрещивания $\sim 60-160^\circ$ и соотношение шага к высоте гофра P/H от 1,78 до 7,12, а также при числах Рейнольдса 2000. Рабочим телом являлся воздух, исследуемая секция содержала 100 ячеек, что позволяет говорить о развитом характере течения. Местные коэффициенты массопереноса замеряются в данном исследовании благодаря использованию химической реакции между реагентом добавленному в газообразной форме к воздуху, который поглощается в влажной бумагой, которой покрыта одна из стенок. Затем они были преобразованы в значения чисел Nu , используя аналогию между массо- и теплопереносом. Потери давления измерены датчиками давления у стенки. Авторы приводят распределение местных коэффициентов теплопередачи и средних значений Nu , а также приводят значения критерия f как

функцию от угла скрещивания гофр ϕ . При равных условиях значения критерия f имеют хорошую сходимость с исследованиями Фокке [92] и других авторов. Сравнение чисел Nu не было проведено.

В 80-х гг. XX в. сотрудниками Ленинградского технологического института холодильной промышленности (ЛТИХП) было выполнено экспериментальное исследование теплообмена при вынужденной конвекции в каналах пластинчатого теплообменника, скомпонованного из пластин размером $0,5 \times 2$, потоков вода–вода и вода–раствор бромистого лития концентрации 58,2 % [55]. В результате исследования выведена эмпирическая зависимость, авторы исследования рекомендуют использовать ее для расчета теплоотдачи при развитом турбулентном течении, которое для данного пластинчатого аппарата наблюдается при $Re \geq 100$.

В работе [38] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований тепло- и массообмена в одно- и двухфазных средах, сепарации гетерогенных систем. Исследования проведены в целях повышения безопасности и эффективности энергетических установок и позволили разработать новые методы интенсификации тепло- и массообмена, сформировать новые научные направления, создать принципиально новые аппараты гидроциклонного типа, математические модели процессов и инженерные методы их расчета.

В работе [26] рассматривается постановка задачи по исследованию теплогидравлических характеристик высококомпактных пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена со смещенным ребром.

В рассмотренных работах достаточно подробно рассмотрены вопросы исследования поверхностей и выбора наиболее эффективных поверхностей теплообмена, однако вопросы разработки методики расчета и проектирования с использованием трехмерных программ практически не исследованы. В работах Дж. Стейсик, М.В. Коллинс, М. Чиофало, Р. Е. Чу [103] рассмотрена верификация трехмерной методики расчета с использованием программы Fluent ANSYS. Однако в данной работе рассматривается лишь один вид сетки, что исключает

возможность выбора наиболее оптимального варианта построения расчетной сетки при минимальных затратах времени и компьютерных мощностей. В данной работе также не рассмотрены реальные условия создания пластин и штампов для их изготовления, не рассмотрены вопросы соединения пластин в конверты и пакеты.

ВЫВОДЫ

1. Направлением работы является актуальная на сегодняшний день разработка ГТД с регенерацией тепла. Применение сложных термодинамических циклов (регенерация тепла) в авиационной и энергетической отрасли обосновано увеличением топливной эффективности (до 36

2. Выбрана ключевой узел, необходимый при разработке ГТД с регенерацией тепла – теплообменный аппарат. Рассмотрены характеристики поверхностей теплообмена и выбраны наиболее подходящие варианты. Учитывая требования, предъявляемые к теплообменному аппарату для ГТД с регенерацией тепла, а именно: работа при высоких температурах (до 1000 К) и давлениях (до 400 кПа), а также минимальные массогабаритные показатели, сделан выбор в пользу пластинчатых теплообменных аппаратов с теплопередающей поверхностью типа «набивки Френкеля».

3. Проведено сравнение интенсивности теплообмена при различных углах скрещивания поверхности теплообмена типа «набивки Френкеля». Основываясь на экспериментальных результатах, выполненных в работе [80], сравнивались при всех прочих равных условиях поверхность теплообмена с гладкими каналами (с углом скрещивания 0°) и при угле скрещивания в 37° . Результаты показали, что увеличение угла скрещивания пластин ведет к возрастанию в 1,3-1,6 раза числа Nu и в 1,4-1,6 коэффициент потерь давления ξ по сравнению с гладким каналом.

5. Проанализированы работы, проведенные в области теплообменных аппаратов с «набивкой Френкеля». Выявлены основные актуальные направления, требующие дополнительного исследования и совершенствования.

2. ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОФРА ПЛАСТИНЫ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

2.1 Характеристики поверхностей теплообмена

В работах [26, 38, 39, 43, 47, 49, 73, 80 и др.] показано, что значительная степень интенсификации наблюдается при взаимодействии скрещивающихся струек жидкости, что реализовано в теплопередающей поверхности типа «набивки Френкеля». Такого рода поверхность представляет собой гофрированные листы, смежные пластины которых имеют практически точечный контакт по вершинам гофров, таким образом, образуют каналы сложной формы для движения теплоносителей [80].

Характеристики поверхностей теплообмена в значительной мере определяют массогабаритные показатели теплообменников. Подбор поверхностей теплообмена с увеличенной, по сравнению с гладкими поверхностями, интенсификацией теплообмена позволяет в ряде случаев получить существенное уменьшение потребной площади поверхности теплообмена, тем самым снизить массу и объем теплообменного аппарата.

В данном разделе будут рассмотрены теплогидравлические характеристики поверхностей теплообмена по типу набивки Френкеля.

Поверхность типа набивки Френкеля предоставляет обширные возможности для интенсификации теплообмена в неоребрённых теплопередающих матрицах. Данная поверхность теплообмена может быть образована гофрированными листами, у которых гофры на смежных пластинах направлены под некоторым углом φ друг к другу [73]. В качестве определяющего размера взята высота профиля гофра, а коэффициент теплоотдачи отнесен к поверхности плоских пластин. Турбулизация при течении теплоносителя по сложному каналу пластин достигается за счет взаимодействия скрещивающихся струек жидкости, что приводит к увеличению теплоотдачи. Варьируя угол наклона гофров φ можно в широких пределах изменять интенсивность теплообмена.

Как показали исследования, проведенные К. П. Говардом, интенсификация теплоотдачи в поверхностях типа набивки Френкеля возможна при весьма малых размерах поперечного сечения каналов, что является необходимым условием создания компактного теплообменника. Исходя из данных работ [80, 73, 38, 39, 43, 47, 49, 26 и др.] были проанализированы геометрические размеры гофра пластинчатого теплообменника с поверхностью по типу Френкеля. Во всех работах сделаны похожие эксперименты с подобными геометрическими размерами, в связи с этим целесообразно положить в основу несколько исследований, наиболее удовлетворяющих по теме исследования и размерам пластины. В настоящей работе используются исследования, изложенные в работах [73,80,39], поскольку рассматриваемые параметры теплообменных пластин ориентированы на ГТД сложного цикла. Геометрические параметры испытанных образцов приведены в таблице 1, а принятые обозначения величин — на рисунке 14.

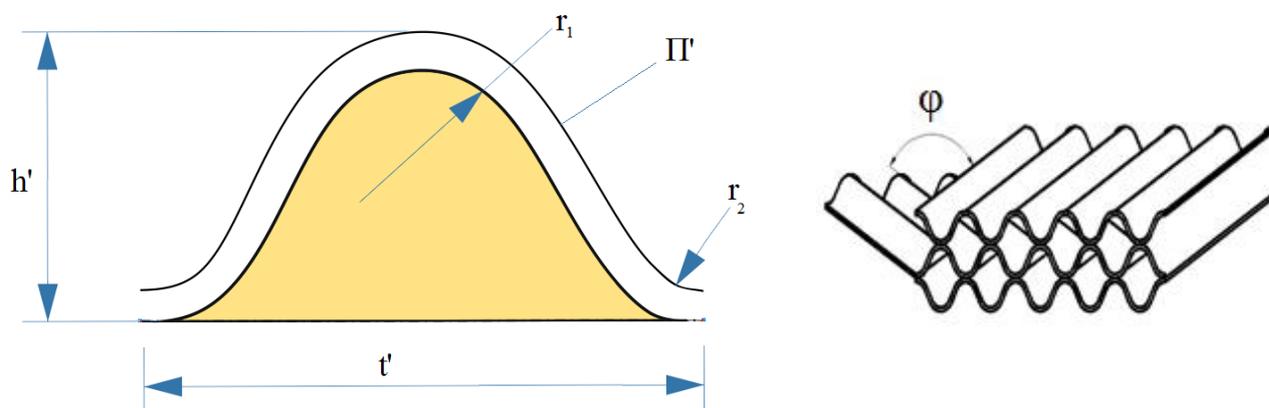


Рисунок 14 - Обозначение величин гофра

Результаты испытаний представлены в таблице 2 и на рисунке 15. Основным фактором, определяющим интенсивность теплоотдачи, является угол скрещивания гофров на смежных листах φ , как видно из рисунка 15, при увеличении угла φ от 0 до 96° коэффициент теплоотдачи возрастает в 3,8...4,2 раза, а коэффициент сопротивления в 11 - 18 раз [73,80].

Таблица 1 - Геометрические параметры экспериментальных образцов [80]

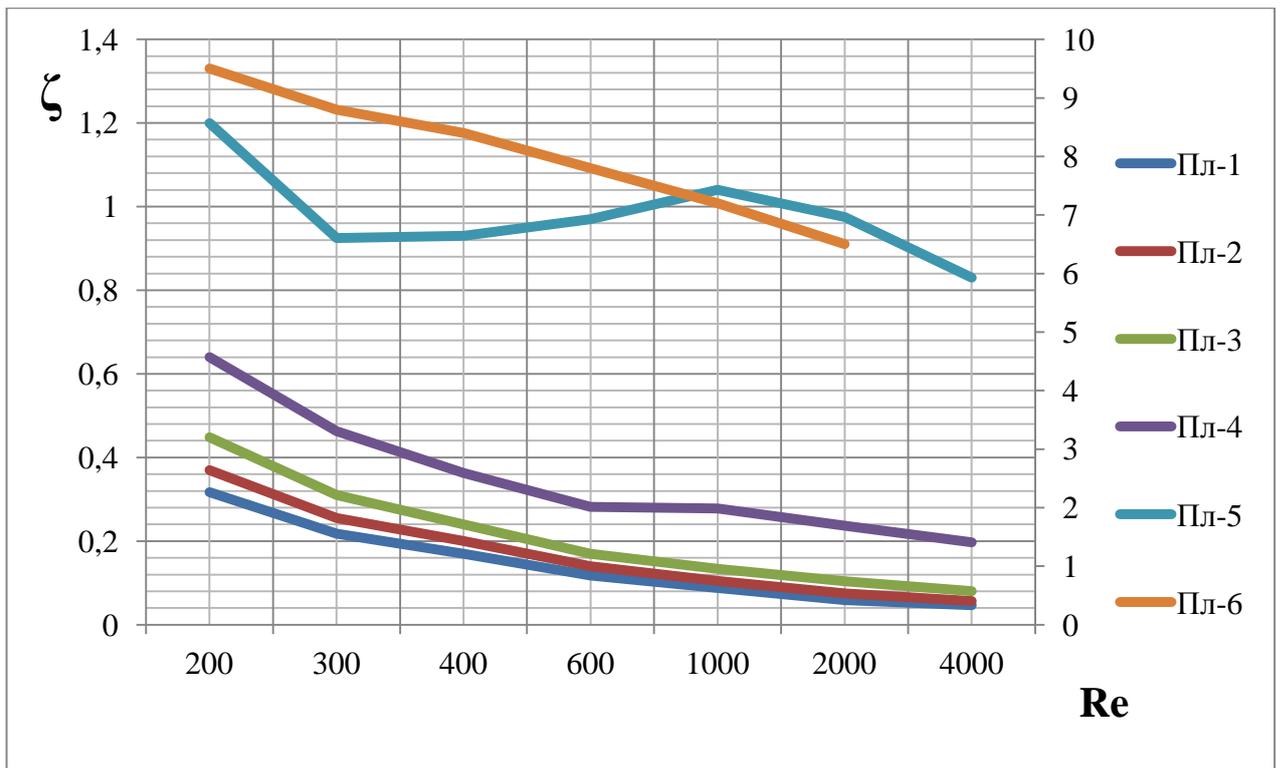
Образец	φ град	d_3 мм	L/d_3	h' мм	t' мм	S' , мм ²	Π'/t'	δ , мм	r_1 мм	r_2 мм
Пл-1	0	1,72	46,4	1,29	2,57	1,46	1,48	0,1	0,6	0,6
Пл-2	20	1,54	51,0	1,30	2,57	1,47	1,49	0,1	0,6	0,6
Пл-3	37	1,54	52,9	1,29	2,57	1,46	1,48	0,1	0,6	0,6
Пл-4	66	1,53	50,5	1,27	2,57	1,44	1,47	0,1	0,6	0,6
Пл-5	96	1,54	49,2	1,29	2,57	1,46	1,48	0,1	0,6	0,6
Пл-6	144	1,49	27,2	1,22	2,57	1,38	1,44	0,1	0,6	0,6
Пл-7	0	1,70	86,2	1,23	2,57	1,39	1,44	0,1	0,6	0,6
Пл-8	14	1,50	97,5	1,23	2,57	1,39	1,44	0,1	0,6	0,6
Пл-9	22	1,50	96,3	1,22	2,57	1,38	1,43	0,1	0,6	0,6
Пл-10	35	1,49	96,5	1,21	2,57	1,37	1,43	0,1	0,6	0,6
Пл-11	21	1,54	50,7	1,29	2,57	1,46	1,48	0,1	0,6	0,6
Пл-12	21	3,14	47,2	2,44	5,07	5,87	1,46	0,1	1,1	1,1
Пл-13	21	0,97	36,7	0,84	1,6	0,56	1,44	0,1	0,3	0,3
Пл-14	21	2,52	59,5	1,9	4,83	3,89	1,28	0,22	0,5	0,5
Пл-15	29	1,60	49,0	1,34	2,40	1,43	1,19	0,12	0,35	0,30
Пл-16	29	1,78	48,3	1,99	2,42	2,12	1,97	0,12	0,35	0,35
Пл-17	31	2,14	47,4	3,27	2,56	3,75	2,73	0,12	0,12	0,12
Пл -18	29	1,34	59,1	1,97	2,42	1,60	1,97	0,12	0,12	0,60
Пл -19	29	2,18	53,5	1,90	2,44	2,56	1,93	0,12	0,69	0,12

Таблица 2 - Экспериментальные данные [73,80]

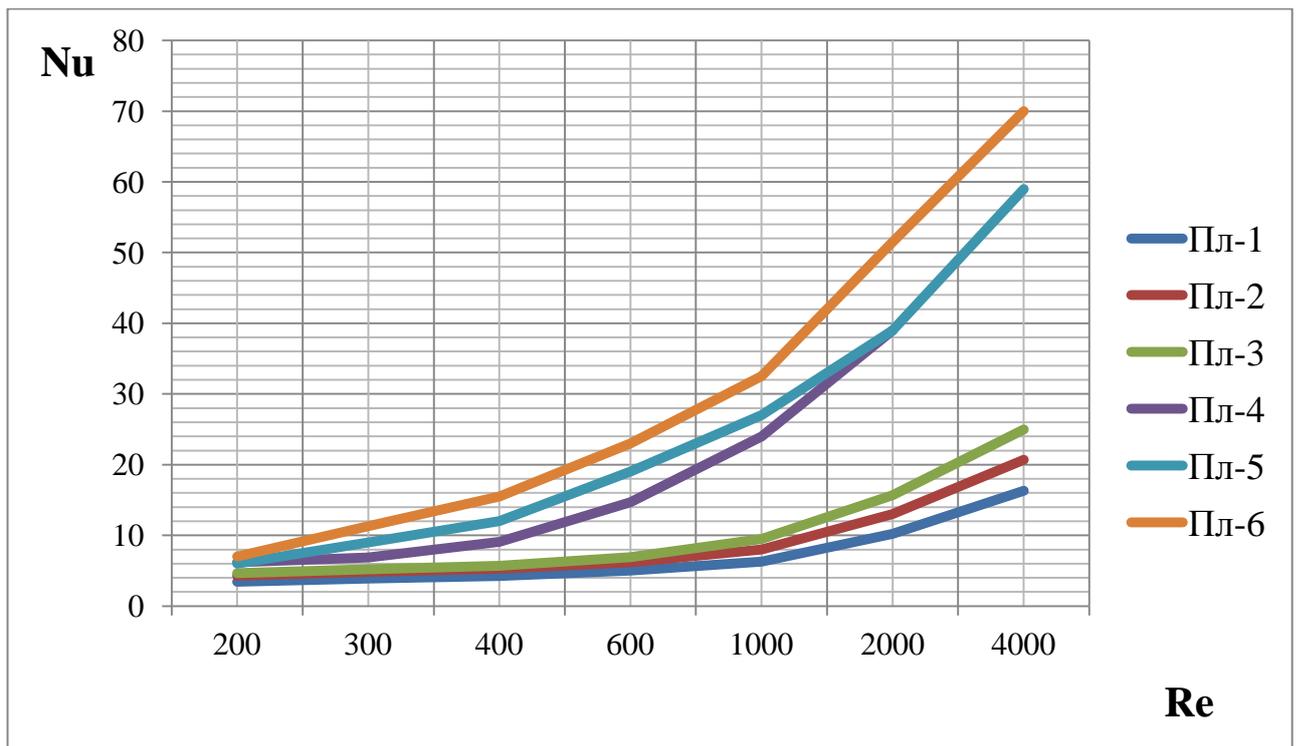
Образец		Re						
		200	300	400	600	1000	2000	4000
Пл-1	Nu	3,46	3,9	4,24	5,0	6,3	10,2	16,3
	ζ	0,317	0,218	0,170	0,118	0,088	0,059	0,047
Пл-2	Nu	4,3	4,82	5,3	6,2	8,0	13,0	20,7
	ζ	0,37	0,255	0,200	0,140	0,105	0,075	0,057
Пл-3	Nu	4,65	5,2	5,7	6,9	9,5	15,7	25,0
	ζ	0,448	0,310	0,240	0,170	0,134	0,104	0,08
Пл-4	Nu	-	6,2	6,85	9,1	14,7	24,0	39,0
	ζ	0,640	0,463	0,363	0,282	0,278	0,237	0,197
Пл-5	Nu	-	-	-	19,0	27,0	39,0	59,0
	ζ	1,2	0,925	0,93	0,97	1,04	0,975	0,83
Пл-6	Nu	7,0	11,3	15,5	23,0	32,5	51,5	-
	ζ	9,5	8,8	8,4	7,8	7,2	6,5	-
Пл-7	Nu	-	-	3,65	4,1	5,0	8,3	15,8
	ζ	-	0,2	0,154	0,108	0,076	0,055	0,048
Пл-8	Nu	-	-	-	5,1	7,1	11,4	18,4
	ζ	-	0,25	0,195	0,138	0,101	0,072	0,056
Пл-9	Nu	-	-	-	5,9	7,9	12,6	20,2
	ζ	-	0,257	0,21	0,148	0,113	0,085	0,068

Продолжение таблицы 2

Пл-10	Nu	-	-	-	6,8	9,5	15,0	24,2
	ζ	-	0,30	0,235	0,165	0,145	0,104	0,084
Пл-11	Nu	4,3	4,8	5,2	6,1	7,9	12,6	19,5
	ζ	0,37	0,25	0,20	0,146	0,107	0,079	0,062
Пл-12	Nu	-	5,5	5,9	6,8	9,0	14,2	22,0
	ζ	0,39	0,27	0,217	0,155	0,120	0,082	0,062
Пл-13	Nu	-	5,5	5,9	6,8	9,0	14,2	22,0
	ζ	0,42	0,29	0,228	0,166	0,133	0,103	-
Пл-14	Nu	-	5,2	5,55	6,4	8,2	13,0	20,3
	ζ	0,40	0,28	0,225	0,160	0,120	0,083	0,064
Пл-15	Nu	-	-	5,9	7,2	10,2	15,8	23,3
	ζ	-	0,35	0,268	0,185	0,14	0,097	0,073
Пл-16	Nu	-	-	5,5	6,8	9,40	14,4	21,2
	ζ	-	0,275	0,214	0,155	0,117	0,081	0,06
Пл-17	Nu	-	-	5,3	6,5	8,7	13,2	19,3
	ζ	-	0,275	0,214	0,155	0,117	0,084	0,06
Пл-18	Nu	-	-	4,55	5,65	7,8	12,8	19,8
	ζ	0,31	0,24	0,195	0,150	0,115	0,086	0,066
Пл-19	Nu	-	-	5,7	7,4	10,2	15,8	23,2
	ζ	0,480	0,340	0,270	0,200	0,150	0,120	0,086



а)



б)

Рисунок 15 - Характеристики неоребранных поверхностей типа набивки Френкеля [34,38]

а) Зависимость $\zeta(Re)$ б) Зависимость $Nu(Re)$

В работе [80] показано, что к заметному увеличению интенсивности теплообмена приводит, и установка пластин под умеренными углами: при $\varphi = 37^\circ$ значения Nu и ζ возрастают в 1,4-1,6 раза по сравнению с $\varphi=0$. Следует отметить благоприятное соотношение между ростом Nu и ζ в области $\varphi = 0...37^\circ$: коэффициент увеличивается приблизительно пропорционально критерию Nu . Увеличение относительной длины каналов L/d_3 с 50 до 100 приводит к незначительному изменению характеристик. В этом можно убедиться, если сравнить приведенные в таблица 2 результаты испытаний образцов ПЛ-1- ПЛ-3 ($L/d_3 \approx 50$) и ПЛ-7-ПЛ-10 ($L/d_3 \approx 100$) [73,80].

Часть каналов опытных конвертов не имела сквозного протока рабочей жидкости. Эта часть каналов одним из своих концов упиралась в боковые стенки, вследствие наклонного расположения гофров. Однако, оценка результатов испытаний образца ПЛ-11, который отличается от образца ПЛ-2 вдвое меньшей шириной фронтальной поверхностью, показала, что увеличение вдвое относительного числа глухих каналов практически не повлияло на характеристики образцов (таблица 2). Расхождение в значениях Nu и ζ для обеих поверхностей не превышает погрешности их определения (4 -7%) [73,80].

Интерес представляют опытные образцы ПЛ-12 и ПЛ-13, имеющие эквивалентные диаметры каналов: $d_3=0,97$ мм у ПЛ-13 и $d_3=3,14$ мм у ПЛ-12. Как показали результаты испытаний этих образцов (таблица 2), характеристики их практически совпадают. Однако, геометрические величины шага гофра и высоты профиля гофра значительно различаются. Высота профиля гофра ПЛ-12 составляет $h'=2,44$ мм, шаг гофра $t'= 5,07$ мм, в свою очередь $h'=0,84$ мм $t'= 5,07$ мм у ПЛ-13. Если взять одну из геометрий пластины со следующими параметрами: высота профиля гофра $h'=8,75$ мм, шаг гофра $t'=32$ мм и $d_3=13,14$ мм из экспериментальной работы [103], и сравнить с ПЛ-4 с параметрами высоты профиля гофра $h'=1,27$ мм, шаг гофра $t'= 2,57$ мм $d_3=1,53$ мм то, можно проследить то же явление. Отсюда можно сделать вывод, что рост теплоотдачи можно достичь до определенного значения d_3 , после чего, его увеличение не окажет заметного действия на теплоотдачу.

Однако, рассматривая пластины Пл15-Пл-19 можно проследить влияние высоты профиля гофра. Здесь при практически равных шагах гофра $t' \approx 2,42$ мм наблюдаются не значительные изменения в коэффициенте ζ , хотя увеличение высоты гофра h' приводит к снижению числа Nu . По результатам испытаний этих образцов, имевших примерно одинаковый угол скрещивания гофров $\varphi \approx 29^\circ$ видно, что с увеличением относительной высоты профиля гофров теплоотдача и гидравлическое сопротивление уменьшаются. Из этого следует, что в узких и глубоких каналах возмущение потока, возникающее в зоне взаимодействия скрещивающихся струек жидкости, затухает быстрее[80]. Таким образом, наиболее целесообразно изготавливать пластины с высотой профиля гофра в пределах от 0,84...2,0 мм.

Наибольшее влияние на интенсификацию оказывает угол скрещивания гофров. Сравнивая образцы Пл-1-Пл-6, имеющие практически одинаковые t' и h' , можно отметить, что с ростом угла наблюдается рост теплоотдачи. Исходя из требований к ГТД, допустимые потери в теплообменном аппарате, выражаемые в коэффициенте потерь ζ , не должны превышать 3%. В связи с этим наиболее подходящим является диапазон в $65 \dots 100^\circ$.

Шаг гофра t' также оказывает влияние, анализируя результаты эксперимента Пл-12, Пл-14, Пл-16, можно сказать, что увеличение шага негативно влияет на теплоотдачу и потери. В диапазоне от 2...2,6 мм наблюдаются наиболее благоприятные соотношения теплоотдачи и потерь давления.

В работе [39] рассмотрена вариация поверхности типа набивки Френкеля со скрещивающимся волнистым гофром, который представлен на рисунке 16.

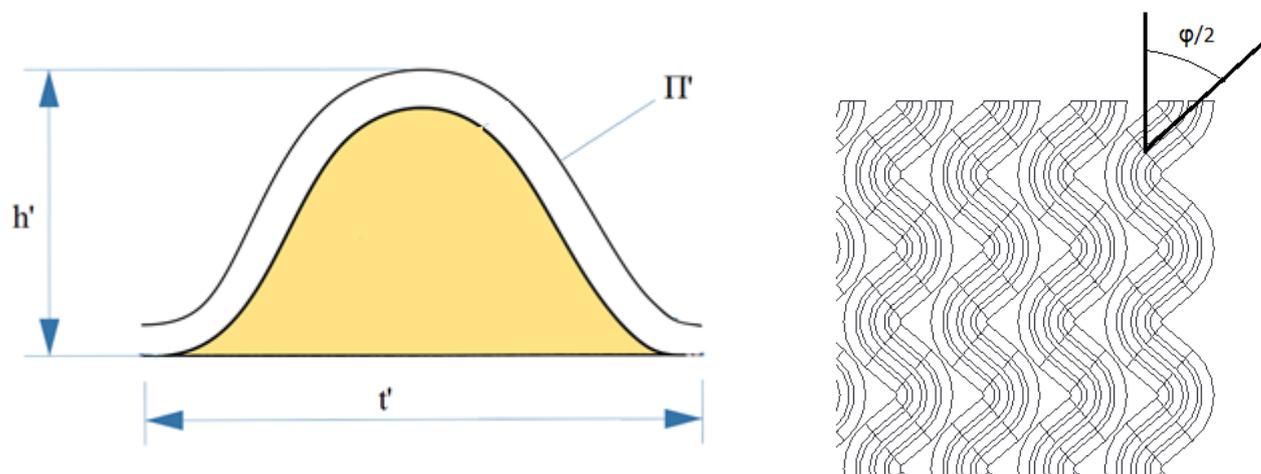


Рисунок 16 - Вариация поверхности по типу Френкеля с волнистым гофром

В таблице 3 представлены геометрические параметры экспериментальных образцов.

Таблица 3 - Геометрические параметры испытанных образцов [80]

Образец	d_0 мм	h' мм	t' мм	Π'/t'	φ град
BP-1	3,23	10,5	4,44	5,5	42
BP-3	2,12	10,5	2,8	8,25	42

Экспериментальные данные поверхностей BP-1 — BP-4 приведены в таблице 4

Таблица 4 - Экспериментальные данные [80]

Образец		Re			
		600	1000	2000	4000
BP-1	Nu	9,3	15	23	33
	ζ	0,4	0,29	0,26	0,19
BP-3	Nu	8,2	12	18,2	30,9
	ζ	0,27	0,25	0,17	0,14

Поверхности ВР-1 [39] и ВР-3 [39] представляли собой пластины с непрерывными волнистыми гофрами с одинаковой длиной и амплитудой волны. Угол поворота потока в канале составлял $\varphi = 42^\circ$. Отличались эти поверхности плотностью ребрения, что нашло свое выражение в величине шага ребер t' [34]. На графике (рисунок 17) показано, что такие поверхности могут иметь высокие числа Nu (в 2,4—2,6 раза выше, чем у поверхности с гладкими каналами).

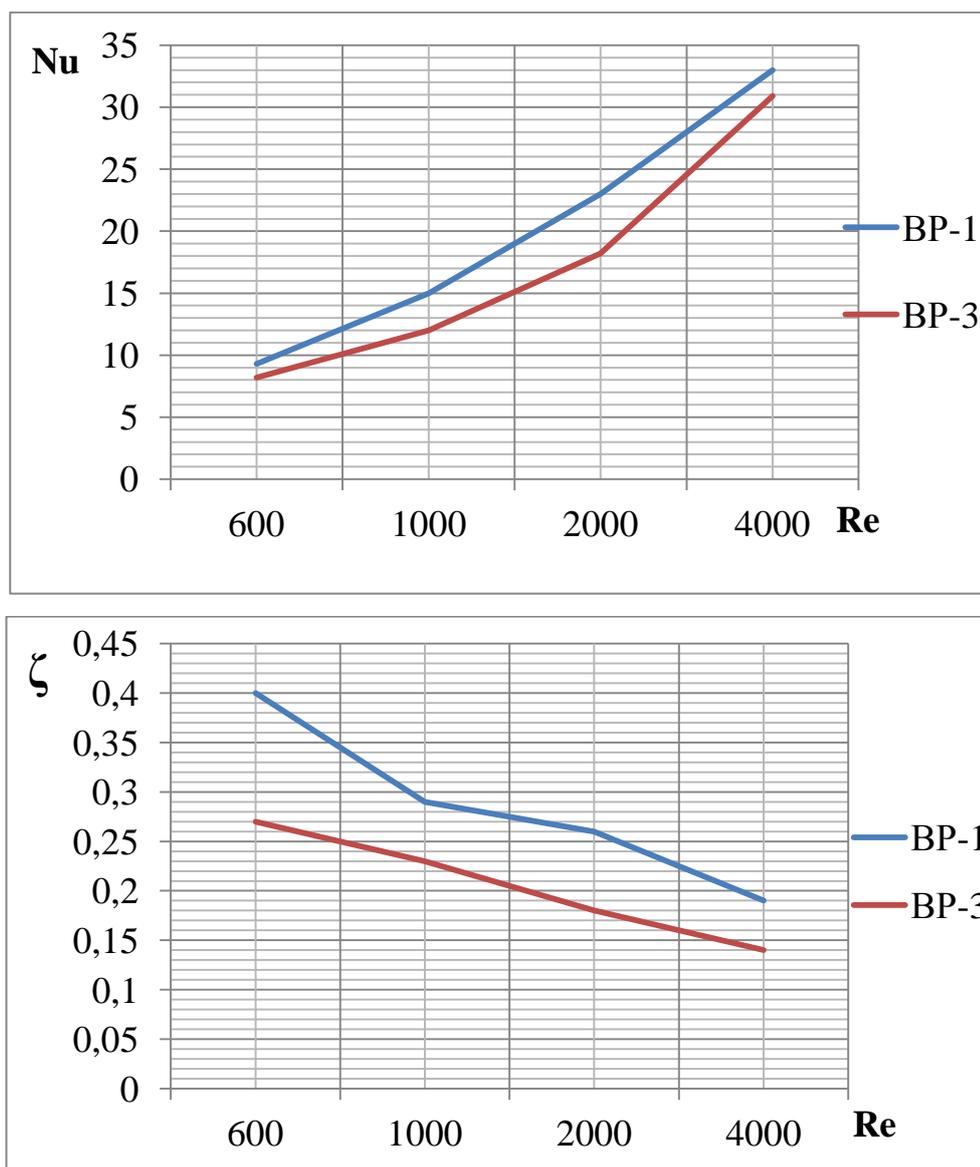


Рисунок 17 - Графики для пластинчато-ребристых поверхностей с волнистыми ребрами ВР-1 [39] и ВР-3 [39]

Однако, вместе с интенсификацией теплообмена наблюдается значительный рост потерь давления в каналах (в 3-4 раза по сравнению с гладкими каналами)

[39]). Можно предположить, что как и в пластинах Пл, здесь будет наблюдаться увеличение интенсивности теплообмена при увеличении угла ϕ , на который периодически изменяется направление движения теплоносителей.

Здесь также можно заметить негативное влияние увеличения шага гофра t' на потери давления. Из рассматриваемого графика видно, что поверхность ВР-3, в сравнении с поверхностью ВР-1, при небольших различиях по числам Nu имеет более благоприятные соотношения теплоотдачи и потерь давления. Из этого следует, что геометрические параметры гофра, определенные для поверхности Пл (с прямыми скрещивающимися гофрами) применимы и для этой поверхности.

При сравнении рассмотренных поверхностей теплообмена можно отметить следующее:

- в пластинчатых поверхностях типа набивки Френкеля (рисунок 14) увеличение угла скрещивания гофров ϕ до 37° и даже до 96° оказывает благоприятное влияние на объем и массу теплообменника. Важно, что при этом площадь фронта изменяется незначительно [34].

- в поверхностях ВР-1 [39] и ВР-3 [39] осуществляется более резкая интенсификация теплообмена, что приводит к большему снижению объема и массы, но при увеличении площади фронта

Таким образом, рассмотренные поверхности являются наиболее перспективными из всех, рассмотренных в работах [39, 34, 38-42, 47, 49, 50, 72, 106, 107].

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование устанавливающее зависимость геометрических параметров и интенсификации теплообмена. Рассмотрены две поверхности теплообмена: поверхность типа «набивки Френкеля», вариация данной поверхности, представляющая собой поверхность с непрерывными волнистыми гофрами с одинаковой длиной и амплитудой волны.
2. В результате исследования получен диапазон геометрических параметров, удовлетворяющих требованиям эффективности и компактности теплообменного аппарата. Таким образом, целесообразно выполнять

пластины со следующими геометрическим 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.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКА

3.1. Технические требования и особенности изготовления пластинчатого теплообменного аппарата для малоразмерных ГТУ

Рабочие температуры теплообменников для ГТУ сложного цикла достигают 1000 К с кратковременными забросами до 1050 К и при давлениях до 400 кПа [1].

Основными требованиями, предъявляемые у теплообменникам, при этом являются:

- Конструкция должна выдерживать не менее десяти тысяч термических циклов без потери герметичности.

- Конструкция теплообменника должна противостоять вибрации.

- Материал матрицы должен противостоять выгоранию и иным повреждениям в течение всего срока службы теплообменника. Максимальное выгорание материала должно находиться в пределах до 0,005 мм на 10 000 часов.

- Теплообменник должен обладать минимальным весом и высокой степенью технологичности. При высокой стоимости материала технология изготовления теплообменника должна обеспечивать максимальный коэффициент использования материала и относительную простоту изготовления.

При сравнении теплообменников пластинчатого и кожухотрубного типов, следует отметить, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

К достоинствам кожухотрубных теплообменников относятся высокая прочность и стойкость к циклическим и вибрационным нагрузкам, низкое гидравлическое сопротивление и возможность использования капиллярных трубок с толщиной стенки до 0,1 мм при давлениях до 10 Бар. К недостаткам относится сложность заделки трубок в трубную решетку (температурные нагрузки до 1000 К выдерживает только метод раскатки без применения сварки). Как следствие этой технологической особенности – ограничение по минимальному диаметру трубки. Минимальный диаметр трубки ограничивается 5 мм.

К достоинствам пластинчатых теплообменников относятся сравнительно простая конструкция, технологичность, возможность сварки всего теплообменника таким образом, что он будет иметь сварные швы равнопрочные основному материалу. Эффективность пластинчатого теплообменника на 15...25% выше трубчатого. К недостаткам относятся большая, чем у трубок, толщина материала матрицы и работа при меньших давлениях (до 4 бар) [2, 3].

Для заданных условий работы наиболее подходят цельносварные матрицы пластинчатых теплообменников. Для удовлетворения требованиям по температуре пластины теплообменной матрицы необходимо выполнять из жаропрочных сплавов на основе никеля с высоким содержанием хрома. В настоящей работе пластины выполнялись из жаропрочного сплава 20Х23Н18, но также существуют другие сплавы отечественного производства с удовлетворительными характеристиками.

Большое значение имеет технологическая и конструктивная проработка конструкции. Правильный выбор присадочного материала, режимов сварки и после сварочной термообработки позволит исключить образование горячих трещин и обеспечит сохранение жаропрочных свойств сплава в зоне сварки. Замкнутые кольцевые швы, выполненные микроплазменной сваркой, исключают возможность появления концентраторов. Роликовая шовная сварка, применявшаяся в данной работе для сборки пластин теплообменника в конверты, позволяет исключить повышенные напряжения металла из-за узкой зоны термического влияния таких швов. Эти и другие меры многократно увеличивают стойкость конструкции ТА к вибрации и тепловым циклам.

В настоящее время наиболее технологичным способом изготовления гофрированных пластин является штамповка. Однако, штамповка тонких листов металла (0,2 мм) представляет сложный процесс, требующий детальной проработки. Существуют и другие способы создания пластинчатых теплообменников, одним из которых является метод лазерного спекания (3D-печать). Рассмотрим данные способы изготовления теплообменного аппарата.

3.2 Штамповка эластичными средами

Одной из целей является отработка технологии, позволяющей изготовить пластину теплообменника за один технологический переход.

Для изготовления пластинчатого теплообменника требуются специальные методы и, поскольку штампуются тонколистовой материал толщиной 0,2 мм (фольга). Была рассмотрена технология штамповки с помощью эластичной среды. Одним из преимуществ такой технологии является сниженные затраты на изготовлении оснастки, поскольку требуется только одна формующая часть.

Ранее применение этого способа штамповки вызывало затруднения из-за проблем, связанных с изготовлением формующей части. Особую сложность при изготовлении вызывало сопряжение гофра с плоскостью с соблюдением требуемых радиусов сопряжения элементов формующей части (не менее 0,1 мм). В настоящее время имеется необходимый набор технологического оборудования, который позволяет изготовить жесткий пуансон, выполнив в точности необходимую геометрию. Другая проблема штамповки пластин заключается в проведении термообработки. Заготовки для пластин получают из ленты, которая после прокатки не проходит отжиг. Для получения требуемой пластичности никелевого сплава требуется отжиг с выдерживанием температуры с точностью 10°C. Имевшееся ранее оборудование не обеспечивало требуемую точность поддержания температуры при термообработке, что приводило к частому браку при штамповке.

Одним из наиболее распространенных технологических процессов для изготовления листовых деталей является метод листовой штамповки. Данные технологические процессы реализованы за счет инструментальных штампов. К ним относятся операции вырубki-пробивки, вытяжки, гибки и формовки [30,31].

По конструктивному признаку инструментальные штампы подразделяются на специальные, специализированные и универсальные. Специальные штампы предназначены для изготовления конкретной детали; специализированные - для выполнения одной операции, при этом детали могут быть разными.

Универсальные штампы позволяют с помощью сменных рабочих блоков осуществлять различные операции и получать различные детали [19].

Рассмотрим одну из технологических схем процесса штамповки эластичными средами - «штамповку в закрытом объеме» [19]. На рисунке 18 представлена одна из технологических схем процесса штамповки эластичными средами [31, 60, 69, 72].

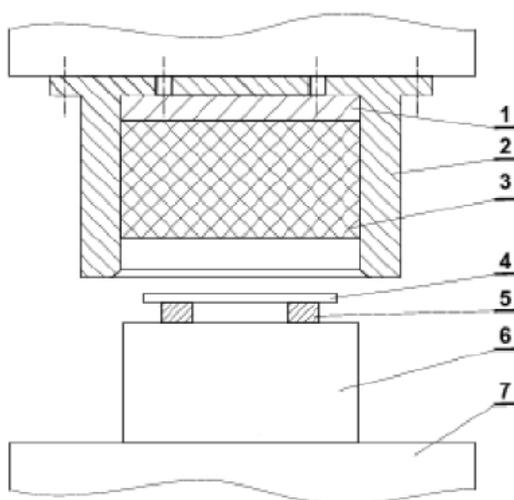


Рисунок 18 - Схема штамповки с закрытым объемом эластичной среды:

- 1 - верхняя плита; 2 - контейнер; 3 - эластичная среда;
4 - заготовка; 5 - инструмент; 6 - подштамповая плита;
7 - нижний стол пресса**

К верхней плите 1 гидравлического пресса крепится контейнер 2 с размещенной внутри него эластичной средой 3 (эластичный блок), например, резиной или полиуретаном.

На нижнем столе пресса 7 размещается подштамповая плита 6, на которой располагаются соответствующие инструмент 5 и заготовка 4.

Для осуществления операции вырубki-пробивки инструментом является «вырезной шаблон», повторяющий контур готовой детали, при гибке, рельефной формовке - «формблок». Внутренний диаметр контейнера равен наружному диаметру подштамповой плиты. При ходе ползуна пресса подштамповая плита 6 входит в рабочее пространство контейнера 2. Эластичный блок 3 (подушка) оказывается в замкнутом (закрытом) объеме.

Резина, полиуретан, как и жидкость, практически несжимаемы. Поэтому, оказавшись в замкнутом объеме, эластичная среда передает силовое деформирующее воздействие на заготовку.

Вытяжка, пробивка отверстий и обрезка могут производиться на полиуретановой матрице, высокая прочность которой позволяет вырезать детали толщиной до 2 мм при давлении до 700 МПа. Этого давления вполне достаточно для качественной вырезки тонколистовых деталей и пробивки отверстий. Вырезанные полиуретаном детали не имеют заусенцев и не требуют последующей доработки контура. Полиуретановый блок, заключенный в обойму (контейнер), является универсальной матрицей. Роль пуансона выполняет вырезной шаблон (копир), имеющий форму детали со всеми отверстиями. Давление, необходимое для вырезки детали, зависит от механических свойств и толщины штампуемого металла, а также от толщины вырезного шаблона.

Вытяжка осуществляется эластичным пуансоном по жесткой матрице (Рисунок 19, а) или жестким пуансоном по эластичной матрице (Рисунок 19, б). Вытяжку можно совмещать с операциями вырезки и формовки.

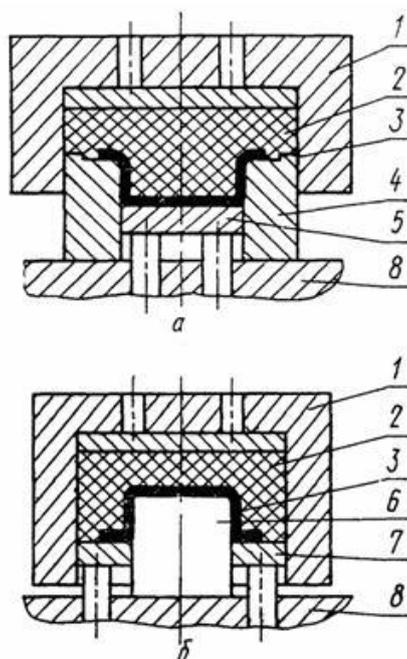


Рисунок 19 - Схема штамповки эластичной средой

На рисунке 19: 1 - контейнер; 2 - эластичная подушка; 3 - заготовка; 4 - матрица; 5 - донный прижим; 6 - пуансон; 7 - прижим фланца; 8 - толкатель.

При вытяжке жестким пуансоном по эластичной матрице минимальный радиус закругления пуансона принимается равным радиусу между дном и стенкой детали и составляет не менее двух толщин материала.

Пуансон, для изготавливаемой пластины теплообменника представлен на рисунке 20. На рисунке 21 показан разрез плиты матрицы.

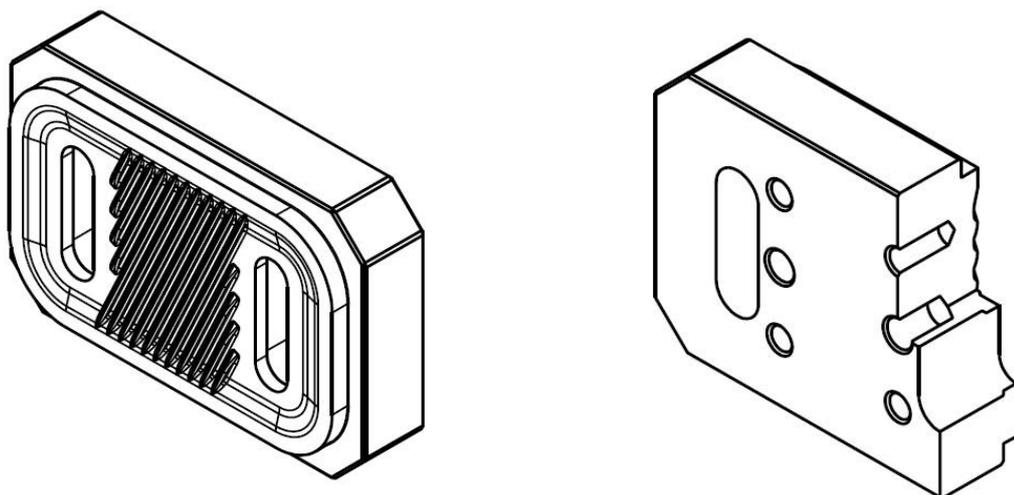


Рисунок 20 - Жесткий пуансон

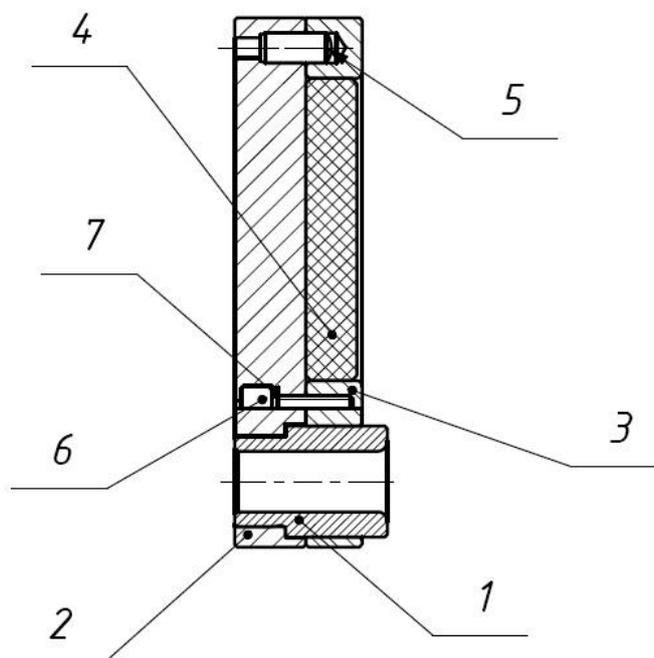


Рисунок 21 - Плита матрицы

На рисунке 21: 1- втулка ,2- плита верхняя,3- контейнер, 4 – полиуретановая матрица, 5 - штифт, 6- винт, 7- шайба.

Смазка оказывает значительное влияние на силовой режим при вытяжке, так как значительная доля усилия расходуется на преодоление сопротивления трения, возникающего в процессе деформирования. Перед штамповкой смазывается только поверхность заготовки, обращенная в сторону металлической рабочей части. Поверхность заготовки, обращенная в сторону эластичной подушки должна оставаться чистой и сухой.

Экономическая эффективность внедрения в производство процессов резки эластичными средами по сравнению с инструментальными штампами достигается в первую очередь за счет значительного удешевления оснастки и снижения [19]:

- затрат на проектирование вырезного шаблона в 10-20 раз;
- его металлоемкости в сотни раз (вес инструментального штампа килограммы, вырубного шаблона - граммы);
- трудоемкости изготовления в 20-30 раз.

Все это обеспечивает значительное сокращение сроков подготовки производства. Если на проектирование и изготовление штампа требуется несколько недель, а то и месяцев, то вырезной шаблон рассчитывается и изготавливается за несколько часов [19].

Пластины, полученные методом штамповки эластичными средами, представлены на рисунках 22, 23. Основной задачей было получение пластины с высотой профиля гофра 1,6 мм.



Рисунок 22 - Вариант пластины, полученные штамповкой эластичной средой



Рисунок 23 - Вариант пластины, полученные штамповкой эластичной средой

Из рисунка 22 видно, что края пластины материал от штамповался плохо, что было связано с не достаточным давлением при штамповке. На рисунке 23 представлена пластина, где данный недостаток устранен. Однако, не смотря на это, повышение давления при штамповке позволило получить пластину с высотой профиля гофра всего лишь 1,4 мм, что не соответствует поставленной задаче.

Для получения необходимой высоты профиля гофра был рассмотрен другой вид штамповки, а именно штамповка на инструментальных штампах.

3.3. Холодная штамповка инструментальными штампами

В качестве заготовки при холодной штамповке используют прокаткой лист, полосу или ленту. Листовой штамповкой возможно изготовить самые разнообразные плоские и пространственные детали массой от долей грамма и размерами, исчисляемыми долями миллиметра и детали массой в десятки килограммов и размерами, составляющими несколько метров [86].

Детали, полученные холодной листовой штамповкой, имеют незначительно отличающуюся толщину их стенок готовой детали от толщины исходной заготовки. При изготовлении листовой штамповкой пространственных деталей заготовка обычно испытывает значительные пластические деформации, что вынуждает предъявлять к материалу заготовки достаточно высокие требования по пластичности [86].

При листовой штамповке чаще всего используют низкоуглеродистую сталь, пластичные легированные стали, медь, латунь, содержащую более 60 % Cu, алюминий и его сплавы, магниевые сплавы, титан и др.

Основными требованиями к изготовлению штампов для холодной штамповки являются:

- высокая точность изготовления деталей и сборки;
- высокое качество обработки сопрягаемых и формирующих поверхностей деталей.

Данные требования находятся в зависимости друг от друга. Например, высокое качество обработки поверхностей пуансонов и матриц штампа обеспечивает необходимую стойкость, а точная взаимная подгонка пуансона и матрицы – получение высококачественных деталей и высокую стойкость штампа в работе [30].

В процессе эксплуатации оснастка находится под действием значительных нагрузок. Данные нагрузки различны по направлению и по величине, и зависят от характера работ, для которых предназначен штамп. Выдержать эти нагрузки сможет штамп с правильно подобранным материалом. Помимо силовых нагрузок на штамповую оснастку влияют и другие условия, такие как загрязнение

материала, подвергающегося штамповке. Попадание земли или песка является причиной истирания рабочей кромки пуансонов и матриц в вырубных штампах или приводит к задирам на рабочих поверхностях вытяжных и гибочных штампов [30,37,71].

Стойкость штампов зависит от:

- точности сопряжения;
- термической обработки деталей штампа, участвующих в формообразовании изделий;
- качества отделки рабочих поверхностей пуансонов и матриц.

Показатель стойкости имеет наибольшее значение для матриц и пуансонов вытяжных штампов, а также штампов для ударного выдавливания. В следствие механической обработки (воздействия режущего инструмента или шлифовального круга), на поверхностях деталей штампа могут оставаться следы в виде гребешков и впадин, которые отрицательно влияют на работу формующих и сопрягаемых деталей. Направление штриха от полировочного материала на рабочих поверхностях деталей штампов должно быть параллельно течению или движению материала штампуемой детали. Иначе поперечные риски на матрице и пуансоне будут задерживать течение металла, и соответственно увеличивать трение. В результате появится необходимость в приложении дополнительного усилия для преодоления трения. В некоторых случаях это может послужить причиной разрыва на вытягиваемой детали. Продольные риски на рабочих поверхностях матриц и пуансонов вытяжных штампов приводят к образованию на вертикальных стенках вытягиваемой детали полос (рисок) [52]. Правильное сопряжение трущихся поверхностей штампов также зависит от шероховатости поверхности сопрягаемых деталей. Плохо отполированные посадочные поверхности после непродолжительной работы вследствие истирания гребешков теряют свои размеры: увеличивается размер отверстия, а размер стержня уменьшается, и скользящая посадка переходит в посадку движения или ходовую, точность теряется [71]. При этом минимальный радиус скругления сопряженных поверхностей не должен быть меньше 0,1 мм.

Штамп для пластин теплообменника является ответственной деталью и требует повышенных требований к оснастке.

Для решения практических задач необходимо задаться технологическими ограничениями, в данном случае — максимально возможной высотой профиля пластины при штамповке. Для определения максимальной высоты профиля пластины проведен эксперимент.

В рамках данной работы для штамповки был использован инструментальный штамп. Исследовались следующие высоты профиля пластин: 1,6 мм, 2 мм, 2,1мм, 2,2мм, 2,3 мм, 2,5мм (рисунки 24-25). В эксперименте рассматривались пластины из стали ХН45Ю, толщиной 0,2 мм. На рисунках 24-27 представлены результаты штамповки пластины до высот 1,6 мм и 2,0 мм.

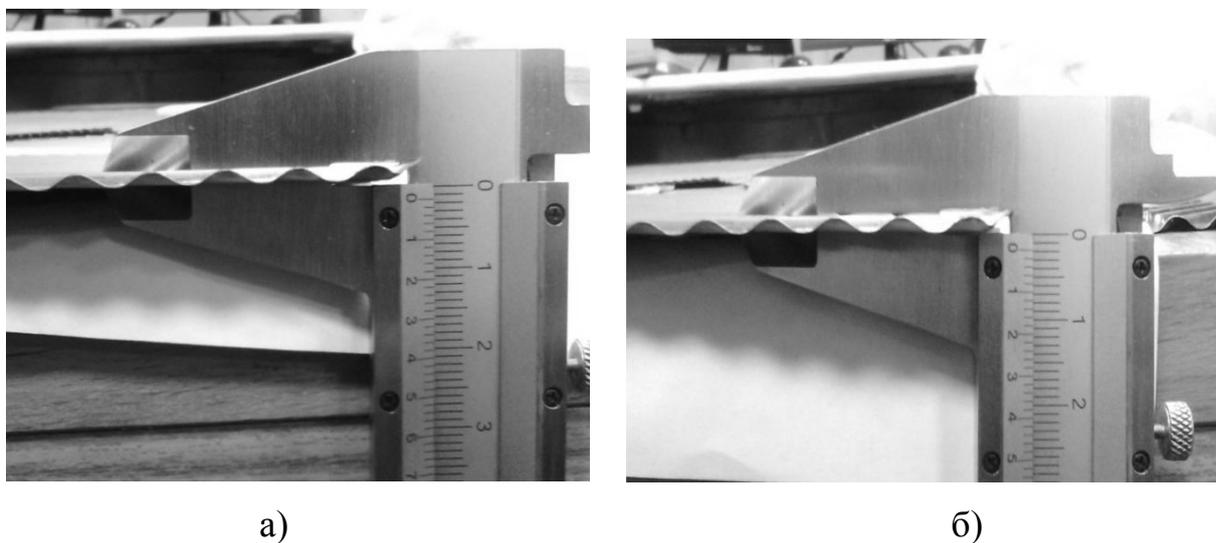


Рисунок 24 - Пластина с высотой профиля: а)1,6 мм б) 2,0 мм

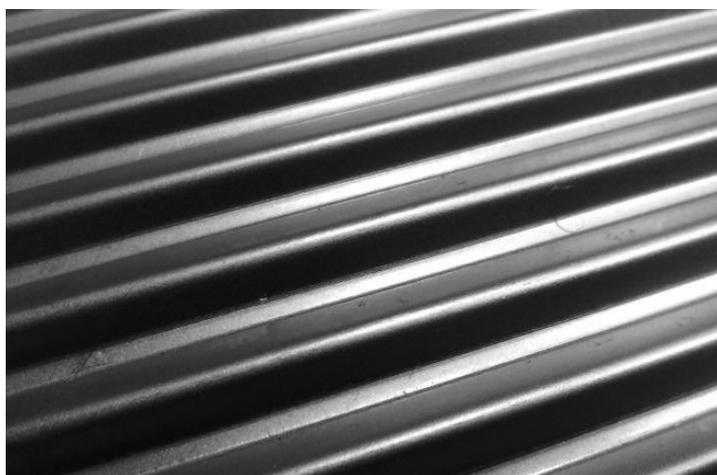


Рисунок 25 - Пластина с высотой профиля 2,0 мм. Вид сверху

После высоты профиля 2 мм, по плану эксперимента была высота профиля 2,5 мм. Однако при данной высоте профиля пластины наблюдалось разрушение полотна материала (рисунок 26). Попытка изготовить пластину с высотой профиля 2,4 мм также была безуспешной. Далее вытяжку производили с шагом 0,1 мм от выбранного номинального значения 2,0 мм, для определения максимума.

Для вытяжки использовали один и тот же штамп, регулирование глубины вытяжки производилось упорами и пластиками толщиной 0,1 мм (пластины устанавливали на упоры).

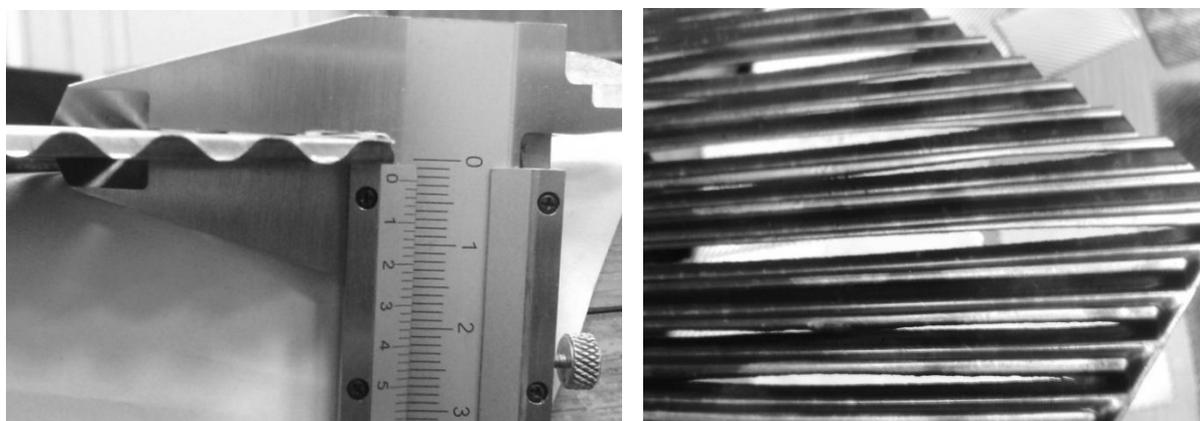


Рисунок 26 - Пластина с высотой 2,5 мм

При высоте профиля 2,3 мм на пластине также имело место разрушение полотна, в местах, показанных на рисунке 27.

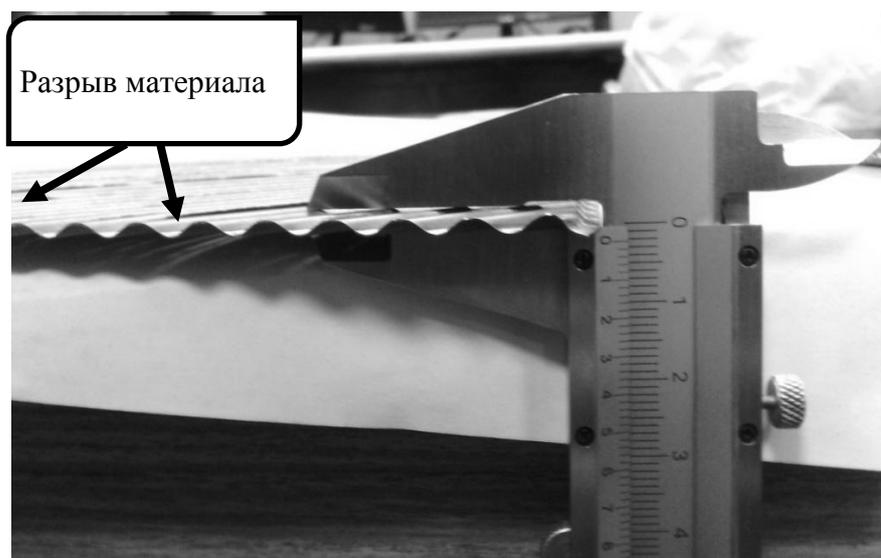


Рисунок 27 - Пластина с высотой 2,3 мм

Высоты профиля пластин 2,1 мм и 2,2 мм были выполнены без разрыва материала, однако, для обеспечения прочностных характеристик, для этих размеров следует провести дополнительные прочностные исследования. Учитывая выполнение требований по прочности и максимально низких потерь давления, в качестве максимально достижимой была принята высота профиля пластины 2 мм.

В соответствии с полученными результатами, гофра пластины, которую удалось получить на инструментальном штампе имеет следующие геометрические размеры:

- толщина пластины 0,2 мм;

- высота профиля пластины от 1,6 мм до 2 мм. Нижний предел выбран из соображений эффективности теплообменного аппарата. Верхний предел ограничен технологическими возможностями;

- шаг гофра от вершины до вершины – от 8 мм;

- угол раскрытия гофра – $60^{\circ} \dots 75^{\circ}$.

Следует заметить, что не уделялось большого внимания углу скрещивания гофров, поскольку это не влияет на процесс штамповки.

3.4 Технологические переходы изготовления теплообменного аппарата

В работах прошлых лет задача соединения пластин в конверты не была решена. Это послужило одной из основных причин прекращения работ в данном направлении, поскольку все паяные теплообменники не удовлетворяли требованиям герметичности. В настоящее время ситуация изменилась, и благодаря совершенствованию технологий производства появилась возможность обеспечивать прочный сварной шов двух тонкостенных пластин.

Диапазон заданных температур, потребовал в ходе выполнения данной работы применения деформируемого жаропрочного сплава 20Х23Н18. Основными элементами для получения этого сплава являются хром, никель и железо. Хром образует с кислородом прочную окисную пленку, плавящуюся при температуре только около 2275° . Эта пленка хорошо защищает металл от

дальнейшего окисления кислородом при высоких температурах, обуславливая жаростойкость сплава. Высокое содержание никеля придает сплаву аустенитную структуру, обладающую высокой пластичностью. 20X23H18 применяется при рабочей температуре металлической конструкции до 1000 К (при условии невысоких механических нагрузок), при этом у данного сплава наблюдается отсутствие поперечных границ зёрен, что ведет к более низкому модулю упругости и более высокой пластичности. Температурные ограничения применения жаропрочных сплавов с дисперсионным упрочнением обусловлены растворением, быстрой коагуляцией упрочняющей фазы и падением жаропрочности при перегревах деталей в процессе эксплуатации. Как и другие деформируемые сплавы 20X23H18 имеет более мелкозернистую структуру, которая обеспечивает его более высокое сопротивление усталости, тогда как литейные сплавы с равноосной структурой имеют более высокую жаропрочность, но низкое сопротивление усталостным и циклическим нагрузкам.

В качестве способа изготовления заготовок использовалась лазерная резка. Принцип работы: сфокусированный лазерный луч, обычно управляемый компьютером, обеспечивает высокую концентрацию энергии и позволяет разрезать практически любые материалы независимо от их теплофизических свойств. В процессе резки, под воздействием лазерного луча материал разрезаемого участка плавится, возгорается, испаряется или выдувается струей газа. При этом можно получить узкие резы с минимальной зоной термического влияния. Лазерная резка отличается отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал, возникают минимальные деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания. Вследствие этого лазерную резку, даже легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей, можно осуществлять с высокой степенью точности. Благодаря большой мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхностей реза. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением позволяет осуществлять лазерную

резку по сложному контуру плоских и объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса.

Основными проблемами сварки конструкций из жаропрочных сплавов являются:

- образование пленки тугоплавкой окиси хрома, ухудшающей взаимное сплавление зерен металла, что является затруднением для получения высококачественного сварного соединения;

- хромоникелевые сплавы обладают примерно в два раза меньшей теплопроводностью и в полтора раза большим коэффициентом линейного расширения по сравнению с конструкционными углеродистыми сталями, поэтому при сварке жаропрочных сплавов возникают дополнительные трудности — возможность перегрева металла, появления прожогов, сильного коробления изделий, образования трещин;

- образование в сварном шве и зоне термического влияния крупнокристаллической столбчатой структуры с выраженной ликвационной неоднородностью. Образование ликваций обуславливает наличие микрохимической неоднородности, что приводит к уменьшению длительной прочности, жаропрочности и к охрупчиванию.

В сварном шве и в зоне термического влияния высокая вероятность зарождения и образования горячих трещин, из-за наличия ликваций, температурного интервала хрупкости, сегрегации примесей и эвтектик по границам крупного зерна. Укрупнение зерна снижает протяженность и повышает ширину межзеренных границ, что уменьшает их прочность и их сопротивление при механических нагрузках, напряженном объемном состоянии. Вероятность горячих трещин увеличивается с увеличением концентрации примесей и остаточных газов в наплавленном и основном металле. Для уменьшения вероятности появления горячих трещин необходимо снижать погонную энергию сварки, применять источники теплоты с высокой концентрацией ввода энергии — лазерный луч, электронный луч, гибридные способы сварки — плазменно-дуговой, лазерно-дуговой процесс. Другим эффективным способом является методы по

снижению воздействия неоднородностей процессов объемной кристаллизации сварочной ванны путем введения между двумя сварочными технологическими переходами двухчасового отпуска при 850°C в вакуумной печи для предупреждения образования трещин.

Анализ причин возможного брака в конструкциях ТА, изготовленных из 20Х23Н18 потребовал проведения серии подготовительных технологических операций и жесткого исполнения следующих приемов:

При всех способах сварки жаропрочных сплавов, применявшихся в данной работе, особое значение имело хорошее качество подготовки и взаимной подгонки кромок. Кромки предварительно обрабатывались на токарных, фрезерных или строгальных станках или зачищались вручную. Поверхность пластин под роликовую шовную сварку подвергалась пескоструйной очистке и протравливалась в смеси растворов азотной и плавиковых кислот.

Все свариваемые элементы закреплялись перед сваркой в приспособлениях, предупреждающих их взаимное перемещение. Прихватки применялись только в тех случаях, когда без них нельзя было обойтись, так как в местах прихваток при повторном нагреве возможно образование трещин.

В месте окончания шва не допускалось глубокого кратера, так как в нем могут образоваться мелкие трещины. При нахлестном соединении пластин (толщина 0,2 мм) применялась только роликовая шовная сварка, в соединении пластина (0,2 мм) – фланец (2 мм) микроплазменная сварка, как методы с низкой погонной энергией сварки. Применение аргодуговой сварки допускалось только при сварке равнотолщинных изделий толщиной до 3 мм во избежание горячих трещин, при этом длина дуги не превышала 2 мм, а угол наклона электрода к вертикали составляла 10-15°.

При микроплазменной и аргодуговой сварке жаропрочных сплавов применялся аргон, который не содержал влаги, а также более 0,05% кислорода и более 0,24% азота.

На фрезерном станке изготовлено приспособление для сварки пластин (далее ложемент) (рисунок 28). К ложементу предъявлялись требования полного

соответствия рисунка его внутренних поверхностей рисунку поверхности пластин (по узору производилось их позиционирование при сварке), жесткость обеих ее половинок при легком разьеме относительно направляющих стержней, неэлектропроводность (во избежание токов паразитного шунтирования). В результате выбор материала для приспособления пал на капролон с вкрученными в него бронзовыми втулками скольжения по покупным направляющим стержням из стали.



Рисунок 28 – Приспособление формы для сварки пластин (ложемент)

Подготовка пескоструйной очисткой, травлением и сварка отштампованных пластин для сварки попарно в ложементе производилась на машине точечной сварки МТ604, переоборудованной для осуществления роликовой шовной импульсной шаговой сварки (Рисунок 29). Основной технологической проблемой работы на этом этапе стала адаптация метода роликовой шовной импульсной шаговой сварки для соединения пластин с толщиной листа 0,2...0,3 мм из сплава 20Х23Н18. Данный сплав потребовал более высокого (по сравнению со сваркой изделий из СтЗсп) давления при сжатии электродов, $P_{сж}=4$ атм (вместо $P_{сж}=2$ атм). Остальные параметры режима сварки не отличались от штатных для изделий из СтЗсп: ток 300А, импульс 0,1 сек, пауза 0,5 сек, скорость 120 точек/сек.



Рисунок 29 - Машина точечной сварки МТ 604, переоборудованная для осуществления роликовой шовной импульсной шаговой сварки

Сборка пластин в конверт производится в ложементе при помощи роликовой шовной импульсной шаговой сварки (рисунок 30), режимы сварки эквивалентны режимам в предыдущем этапе. В одной из пар показана вставка для сварки в матрицу ТА.

Сварку собранного конверта и теплообменной матрицы производили ручной микроплазменной сваркой на установке МПУ-4 (полярность сварки прямая, ток сварки 15-30А). При сварке для снижения эффекта разнотолщинности между пластинами конверта (0,2 мм) и фланцем матрицы (2 мм), в каждый конверт вставлялась технологическая вставка (рисунок 30-31), вырезанная при помощи Роботизированного комплекса лазерной резки и сварки из листа 20Х23Н18 толщиной 2 мм.

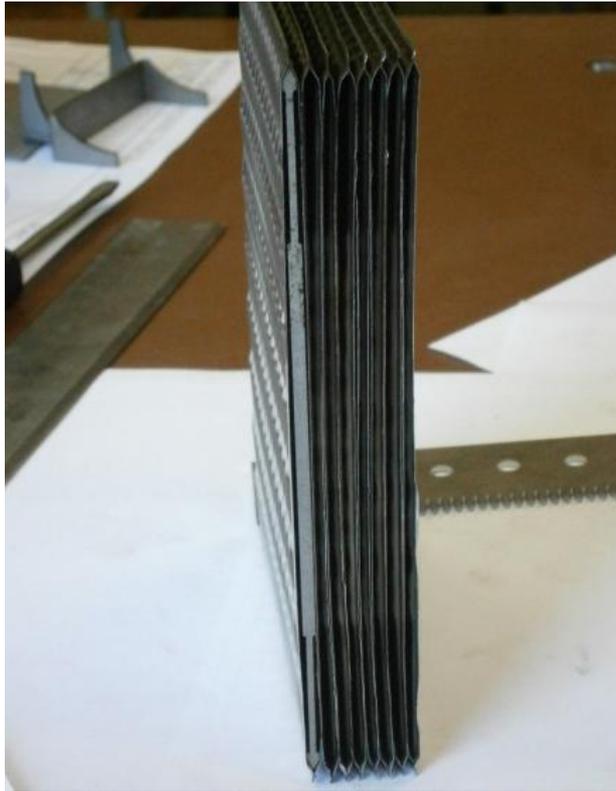


Рисунок 30 – Пакет, сваренный из восьми конвертов

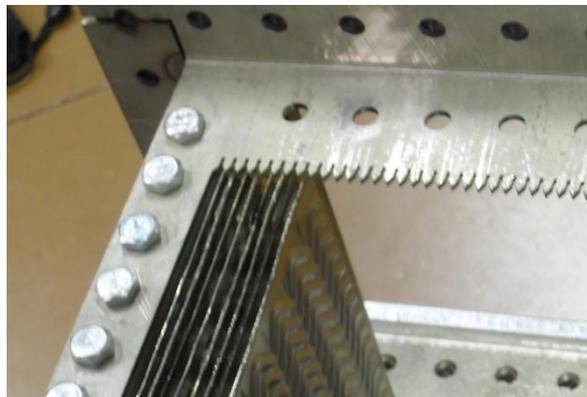


Рисунок 31 - Сварка собранного пакета в теплообменную матрицу

Особое значение имеет разработка технологии сварки угловых элементов матрицы между собой и с фланцем (рисунок 32). Данная разработка позволяет сваривать как конверты между собой в пакет, так и производить сварку пакета и теплообменной матрицы.



Рисунок 32 – Кондуктор для сварки угловых элементов теплообменной матрицы между собой и фланцем

Сборка корпуса теплообменного аппарата производилась ручной аргонодуговой сваркой при помощи источника питания ТИР-300Д из деталей, вырезанных при помощи роботизированного комплекса лазерной резки и сварки из листа 20Х23Н18 толщиной 2 мм.

Установка матрицы в корпус теплообменного аппарата с окончательной сборкой последнего на болтах из сплава ЖС6 (рисунок 33).



Рисунок 33 – Теплообменный аппарат в сборе

На следующем этапе планируется освоить сварку лазером, поскольку при использовании данного вида сварки можно обеспечить наилучшую повторяемость качества сварочного шва.

3.5 Изготовление теплообменного аппарата аддитивными методами производства

Основным преимуществом аддитивных технологий является возможность изготовления монолитной секции теплообменника, что позволяет обойтись без сварных швов. Данная технология также позволяет снизить вес конструкции за счет отсутствия припусков на сварку по краям пластин. Один из методов аддитивного производства для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий – выборочное лазерное спекание (SLS) [16]. В отличие от штамповки данный метод позволяет изготавливать двухходовые теплообменные аппараты, которые обеспечивают большую эффективность.

Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. Зачастую данную технологию ошибочно принимают за схожий процесс, называемый выборочной лазерной плавкой (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, в то время как выборочная лазерная плавка подразумевает полную плавку, необходимую для построения монолитных моделей [16].

Технология (SLS) подразумевает использование одного или нескольких лазеров (как правило, углекислотных) для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта. В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели (3D-модели) с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели [75].

Так как плотность изделия зависит не от продолжительности облучения, а от максимальной энергии лазера, в основном используются пульсирующие излучатели. Перед началом печати расходный материал подогревается до температуры чуть ниже точки плавления, чтобы облегчить процесс спекания.

В отличие от таких методов аддитивного производства, как Стереолитография (SLA) или моделирования методом послойного наплавления (FDM), SLS не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

Исходя из вышеизложенного отметим основные плюсы:

- Отсутствие необходимости изготовления конструкторской документации, так как для изготовления необходима только 3D-модель.

- Отсутствие необходимости в материалах поддержки. Деталь погружена в порошок, который и выполняет функцию поддержки нависающих деталей;

- Большой выбор материалов, включая металлы.

- Высокая скорость печати (до 35 мм/час) [75].

К минусам технологии изготовления относится:

- Шероховатая структура моделей, требующая дальнейшей обработки;

- Большое время подготовки принтера к работе (нагрев и стабилизация температуры).

При изготовлении образцов может быть использован широкий спектр материалов: жаропрочных, никелевых сплавов. Для данного образца использован порошок жаростойкой стали 12X18H10T. Толщина теплопередающей стенки 0,2 мм. Образец изготовлен по полностью безбумажной технологии с передачей трёхмерной модели в цифровой форме непосредственно на станок-прототипиратор (3D-принтер). Образец испытаний представлен на рисунок 34.



Рисунок 34 – Объект экспериментального исследования – теплообменный аппарат

Волнообразные гофры, составляющие поверхность объекта исследования представляют собой модифицированную поверхность Френкеля. Угол скрещивания гофр составляет 75° . Изготовленный теплообменный аппарат имеет высокую шероховатость более $Rz\ 30$.

Для апробирования технологии изготовления по методу выборочного лазерного спекания был проведен эксперимент. В ходе эксперимента определены теплогидравлические характеристики теплообменной поверхности.

3.5.1 Планирование эксперимента

Планирование эксперимента является одним из важнейших частей тестирования испытуемого объекта, проводится поэтапно и сопряжено с процедурой выбора числа и условий проведения испытаний, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи.

При этом необходимо придерживаться следующих ограничений:

1. Общее число опытов должно быть минимальным, но достаточным;
2. Необходимо одновременно учитывать все переменные, определяющие (влияющие) процесс, руководствуясь определенными правилами–алгоритмами;
3. При описании исследований необходимо использовать математический аппарат, формализующий действия экспериментатора;

4. В процессе проведения и планирования эксперимента необходимо строго придерживаться четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения в процессе эксперимента [3].

Учитывая перечисленные ограничения, составлен план эксперимента.

1. Объект исследования. В рамках данной работы должен быть проведен эксперимент по определению входных и выходных параметров объекта эксперимента — теплообменного аппарата перекрестноточной двухходовой схемы, созданного по методу выборочного лазерного спекания. В соответствии с поставленной задачей необходимо разработать рекомендации по проектированию экспериментального стенда и проведению эксперимента.

2. Цель исследования. Основной целью эксперимента является экспериментальное подтверждение трехмерной расчетной методики, т.е. верификация расчетных и экспериментальных данных. В результате эксперимента должны быть получены входные и выходные параметры (температура, давление) ТА, на основе которых будет проведен расчет степени регенерации и потерь давления.

3. Влияние факторов. Перед проведением экспериментального исследования следует определить ряд факторов, оказывающих влияние на эксперимент. Под факторами влияния подразумевается измеряемая величина, описывающая влияние на объект исследования [3]. Согласно общим требованиям по планированию эксперимента количество факторов не должно превышать 15 пунктов. Факторами, которые оказывают влияние на эксперимент, приняты:

- величина расхода воздуха в ТА;
- температура на входе в горячий контур.

4. Область проведения эксперимента. На данном этапе необходимо оценить границы областей определения факторов. При выборе границ учитываются ограничения нескольких типов:

а) Принципиальные ограничения – для значений факторов, которые ни при каких условиях не могут быть нарушены. Применительно к данной работе поставлены следующие ограничения: Температура воздуха должна быть в

диапазоне от 0 до 270 °С; давления в экспериментальной системе не должны превышать 500 кПа.

б) Техничко-экономические ограничения. Время установления режима должна быть не менее 10 мин. Затраты на изготовление экспериментального оборудования не должны превышать суммы выделенной на проведение работ.

в) Конкретные условия проведения процесса. Результатом проведения эксперимента должна быть таблица данных по входным и выходным параметрам по обоим контурам и рассчитанным по экспериментальным данным величины. Измерение расхода происходит путем оценки перепада давления на измерительной шайбе. Регулирование – ручкой отсечного крана.

На этом этапе также определяется локальная область для планирования эксперимента.

а) Выбор основного уровня. Наилучшим условиям, определенным из анализа априорной информации, соответствует одна или несколько комбинаций уровней факторов [67]. Исходя из выбранных ограничений, комбинации уровней факторов следует избрать следующими: в ходе эксперимента рассмотреть несколько комбинаций функции $T_{\text{вых}}(G_{\text{в}})$ и $P_{\text{абс}}(G_{\text{в}})$, при постоянных входных параметрах.

б) Выбрав основной уровень, необходимо провести выбор интервалов варьирования. Необходимо выбрать два уровня, желательно симметричных относительно основного, которые называют верхним и нижним уровнями [67]. Обычно за верхний уровень принимается тот, который соответствует наибольшему значению фактора, хотя данное требование и не является обязательным. В соответствии с этим за верхний принят уровень максимального расхода (отсечной кран полностью открыт). Нижний уровень – минимальный расход, при котором обеспечивается безопасная работа системы, в том числе пожаробезопасность, и целесообразно снимать параметры, (в эксперименте принято 5 гр/с). Промежуточные комбинации факторов регулируются вручную.

На основании приведенного выше планирования можно сформировать рекомендации по разработке стенда для тестирования ТА.

Проектируемый стенд должен соответствовать следующим экономическим и технико-технологическим параметрам:

- Соответствие стенда нормам пожаро- и электробезопасности;
- Минимальные затраты на разработку стенда и используемого измерительного оборудования при приемлемых характеристиках по точности собираемых данных;
- Диапазон измерений давлений должен быть в пределах 0...600 кПа;
- Диапазон измерений температур должен быть в пределах 0...270°C;
- Универсальность использования стенда.

Особое внимание следует уделить факторам, оказывающими влияние на данный эксперимент ими являются:

- Давление в системе подачи промышленного воздуха. Влияет на расход воздуха;
- Мощность нагревательных элементов. Оказывает влияние на максимальную температуру нагреваемого воздуха;
- Герметичность соединений. Влияет на потери давления;
- Точность датчиков сбора информации.

3.5.2 Описание экспериментальной установки

Испытания экспериментального образца проводились на испытательном стенде, на установке МТО №1. Одним из основных узлов экспериментальной установки (ЭУ) служит корпус, предназначенный для крепления экспериментального объекта — теплообменника, датчиков температуры, вентилятора и нагревателя горячего контура и штуцеров трубок, и трубопроводов подвода-отвода воздуха холодного контура (рисунке 35). Рабочим телом для испытаний служит воздух.

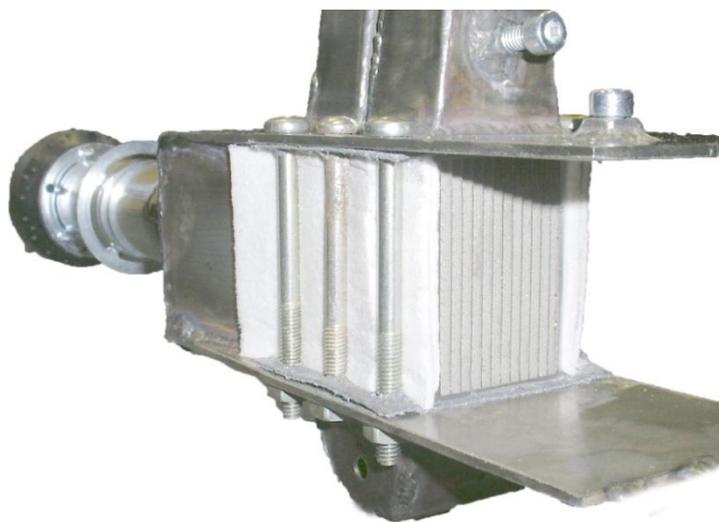


Рисунок 35 – Теплообменный аппарат в корпусе

Экспериментальные исследования тепловых и гидравлических характеристик теплопередающей матрицы с волнообразной поверхностью типа «набивка Френкеля» производились на установке, схематично изображенной на рисунке 36. Воздух из воздушной магистрали попадает в фильтр отстойник (2), далее по гибкому подводу (3) проходит через мерную шайбу (4) и по гибкому подводу (5) в исследуемый образец матрицы теплообменного аппарата (6). В исследуемом образце воздух совершал два хода по теплообменному тракту и далее поступал в регулируемый электронагреватель (8). Далее нагретый воздух вновь поступал в теплообменник в качестве горячего теплоносителя. Пройдя исследуемый образец, воздух выбрасывается в атмосферу. Регулирование расхода воздуха проводилось с помощью кранов отсечного (1) и регулирующего (7). Воздушная система стенда питается от сети промышленного сжатого воздуха. Подача сжатого воздуха к объекту испытания производится последовательно через ручной и автоматический отсечные краны, расходомер и ручной и автоматический регулирующие кран.

Ручной отсечной кран стоит первым по потоку и полностью перекрывает подачу сжатого воздуха на стенд. Параметры воздуха перед, после и по тракту измеряются датчиками давления и температуры. Средства и диапазон измерений представлены ниже.

В процессе эксперимента снимались данные температуры:

- температура воздуха перед мерной шайбой;
- температура воздуха на входе холодного контура;
- температура воздуха на выходе холодного контура;
- температура воздуха на входе горячего контура;
- температура воздуха на выходе горячего контура;
- температура электронагревателя.

Стенд обеспечивает следующие параметры воздуха:

- диапазон температур от 10 до 800°C;
- диапазон расходов от 0 до 1,5...9 г/с;
- давление до 400 кПа.

Стенд предусматривает подключение датчиков давления, расхода и температуры для замера параметров теплообменника, а также предусматривает управление расходом и температурой теплоносителей. Схема и фото стенда представлено на рисунке 36.

В процессе эксперимента снимались данные по давлениям:

- давление воздуха перед мерной шайбой;
- перепад давления воздуха на мерной шайбе;
- давление воздуха на входе/выходе холодного контура;
- давление воздуха на входе горячего контура.

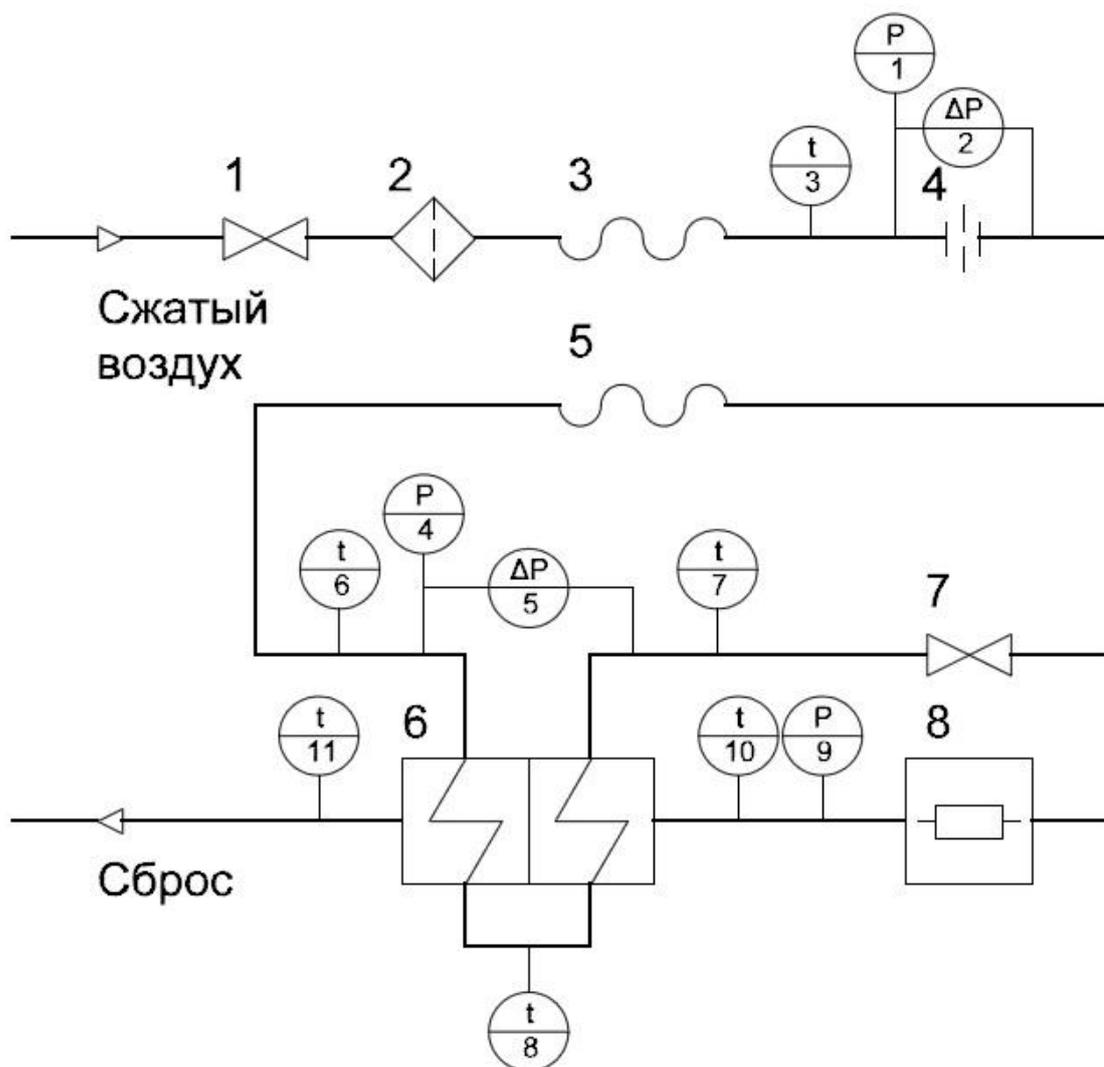


Рисунок 36 – Схема испытательного стенда

- 1- Кран отсечной; 2- Фильтр-отстойник; 3- Гибкий подвод; 4- Расходомер;
5- Гибкий подвод; 6- Объект испытаний – теплообменник; 7- Кран регулирующий; 8- Электронагреватель.**

Перечень используемых средств измерения, параметров, измеряемых в процессе испытаний, и приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры измерительных средств экспериментальной установки.

№ п.п.	Наименование параметра	Диапазон измерения	Единицы	Суммарная погрешность измерения, %
1	Давление воздуха на входе ЭУ	0...600	кПа	±1,0 от верхнего предела (ВП)
2	Давление воздуха на входе холодного контура	0...600	кПа	±1,0 от ВП
3	Давление воздуха на выходе холодного контура	0...600	кПа	±1,0 от ВП
4	Давление воздуха на входе горячего контура	0...600	кПа	±1,0 от ВП
6	Расход воздуха	0...9	гр/с	±1,0 от ВП
7	Температура воздуха на входе ЭУ	0...200	°С	±1,25 от ВП
8	Температура воздуха на входе холодного контура	0...200	°С	±1,25 от ВП
9	Температура воздуха на выходе холодного контура	0...400	°С	±0,75 от ВП
10	Температура воздуха на входе горячего контура	0...400	°С	±0,75 от ВП
11	Температура воздуха на выходе горячего контура	0...400	°С	±0,75 от ВП
12	Температура воздуха в нагревателе	0...400	°С	±0,75 от ВП

Для измерения давления использовались датчики статического давления,

для измерения температуры использовались термопары материал положительного электрода Fe, материал отрицательного электрода Cu(55%)-Ni(45%).

Регистрация и обработка параметров объекта испытаний и стендового оборудования осуществляется измерительной системой на базе измерительного оборудования и программного обеспечения производства фирмы «Овен».

3.5.3 Условия и порядок проведения испытаний

Подготовка к испытаниям проведена в следующей последовательности этапов:

- смонтировать теплообменник в корпусе экспериментальной установки;
- провести проверку герметичности холодного канала;
- провести проверку герметичности горячего канала;
- установить в корпус экспериментальной установки электронагреватель;
- смонтировать систему измерений;
- подключить электрооборудование экспериментальной установки;
- провести тестовую проверку системы измерений;
- провести тестовую проверку электронагревателя.

В процессе проведения испытаний должны быть выполнены следующие задачи:

а) Определение теплогидравлических параметров на выходе из холодного и горячего контуров при постоянных расходах, температурах и давлениях горячего и холодного теплоносителя на входе в теплообменник (замер выполняется для 4 температур: 350; 380; 400; 430 К).

б) Выполнение пункта, а) для различных расходов начиная с 5 гр/с, с шагом 1,0 г/с до 8 гр/с, для каждой из 4 температур.

в) Результаты испытаний по требуемым точкам обработать и на основании их построить зависимости $T_{\text{вых}}(G_{\text{в}})$ и $P_{\text{абс}}(G_{\text{в}})$.

Схемы течения горячего и холодного теплоносителя представлена на рисунке 37.

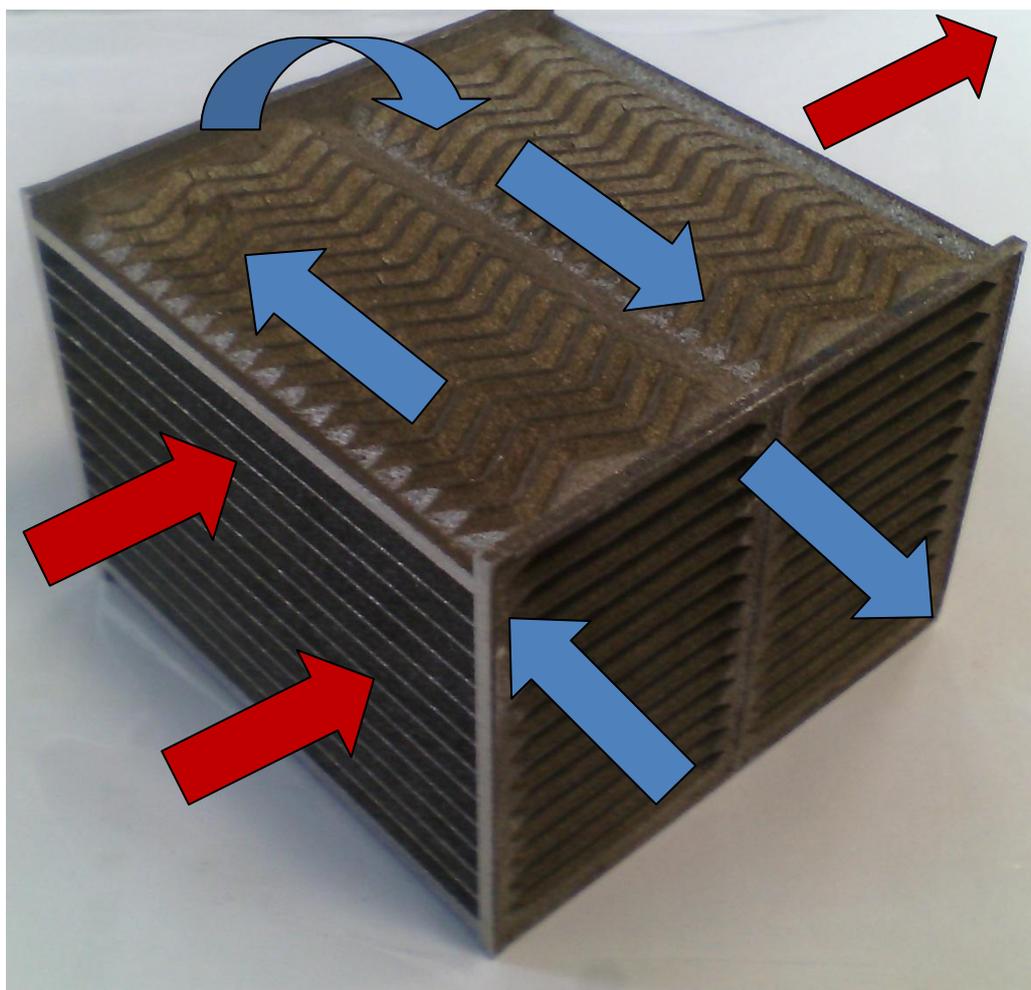


Рисунок 37 – Схемы течения в экспериментальном образце

Процесс снятия данных произведен следующим образом: температуры и давления для всех участков цепи снимались после установления режима (порядка 10 мин). Для каждой экспериментальной точки снималось не менее 10-15 показаний, которые потом усреднялись. Показания снимались каждые 5 секунд с момента включения записи данных. Показания сохранялись в базу данных, которая после проведения эксперимента была преобразована в файл MSExcel.

Следует заметить, что первый образец испытаний оказался не герметичным, поэтому изготовлен второй образец с более толстой стенкой – 0,4 мм.

3.5.4 Анализ и обработка экспериментальных данных

При обработке опытных данных значение в точках находилось как среднеарифметическое, т.е. производилось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i) \quad (2)$$

Расход определялся расчетным способом, основываясь на перепаде давления. В эксперименте использовалось цилиндрическое сужающее устройство, диаметром 4 мм. Методика определения расхода приведена ниже (основана на методических указаниях РД 50-411-83).

Исходные данные:

D – диаметр трубы;

d – диаметр отверстия сужающего устройства;

p – абсолютное давление перед диафрагмой;

Δp – перепад давления;

$\rho_{\text{ном}}$ – плотность среды при нормальных условиях;

T_a – температура при проведении эксперимента;

K – коэффициент сжимаемости среды;

r_1, r_2 – радиусы трубы и отверстия сужающего устройства.

R- универсальная газовая постоянная.

Определение плотности производилось исходя из уравнения состояния:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T_a} \quad (3)$$

Площадь отверстия трубы:

$$S_f = \pi \cdot r_1^2 \quad (4)$$

Площадь отверстия диафрагмы:

$$f = \pi \cdot r_2^2 \quad (5)$$

Относительная площадь:

$$M = \frac{f}{S_f} \quad (6)$$

Сужающие устройства допускаются к применению, только в той области чисел Рейнольдса, где коэффициент расхода можно считать постоянным. Область постоянства коэффициента расхода специальных сужающих устройств ограничена как нижним, так и верхним граничным числом Рейнольдса [69]. Для данного сужающего устройства нижний граничный предел $Re_{\min}=22000$, а верхний граничный предел $Re_{\max}=10^7$.

Для нашего случая значения коэффициентов расхода (α) в зависимости от относительной площади сужающего устройства определяются по формуле:

$$\alpha = 0,80017 - 0,01801 \cdot M + 0,7022 \cdot M^2 - 0,322 \cdot M^3 \quad (7)$$

Расчет поправочного коэффициента ε :

$$\varepsilon = 1 - (0,411 + 0,351 \cdot M^2) \cdot \frac{\Delta p}{p \cdot \chi} \quad (8)$$

где χ - показатель адиабаты, равен 1,4.

Расчет массового расхода:

$$G_m = \left(\alpha \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \right) \cdot 1000 \quad (9)$$

На основании полученных и обработанных результатов построены графики зависимостей температуры на выходе из контура и давления на входе в контур от расхода (рисунках 38,39).

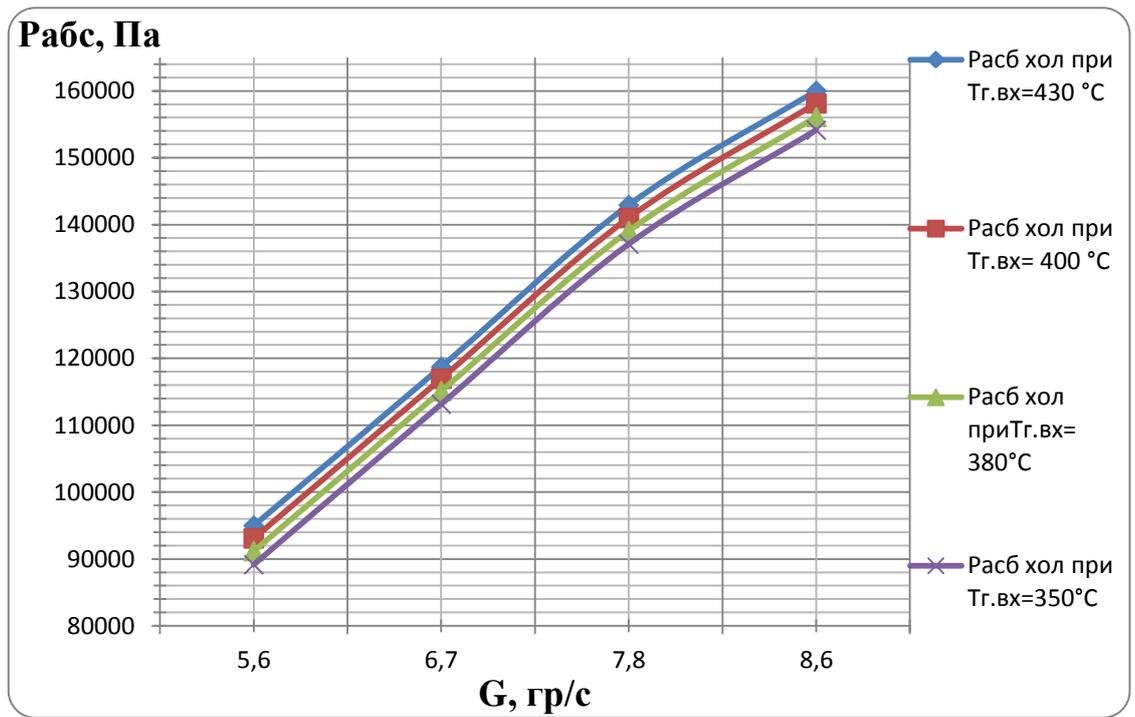


Рисунок 38 – Зависимость абсолютного давления от расхода при различных $T_{вх}$ для холодного теплоносителя

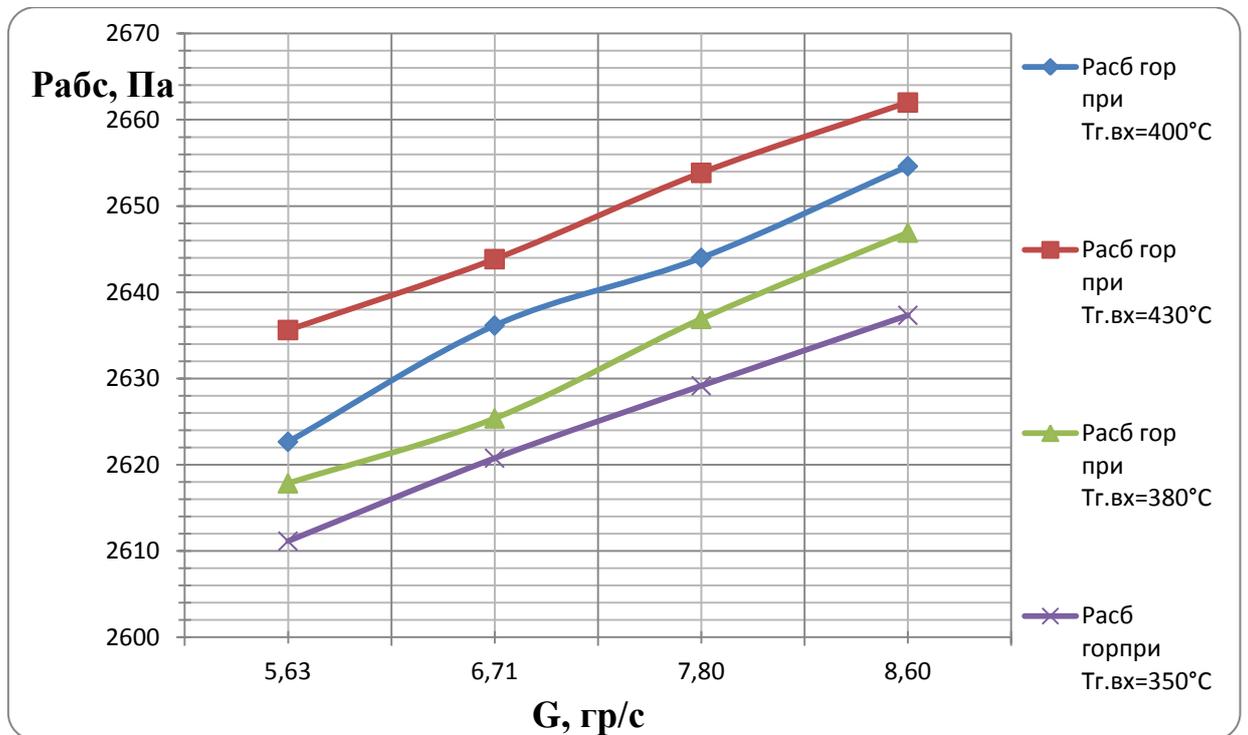


Рисунок 39 – Зависимость абсолютного давления от расхода при различных $T_{вх}$ для горячего теплоносителя

Как видно из графиков, температура на выходе из холодного контура уменьшается при росте расхода. Это объясняется тем, что при этом повышаются скорости теплоносителей и, следовательно, время пребывания теплоносителя в тракте теплообменника сокращается, поэтому теплопередача ухудшается по сравнению с меньшими расходами. В свою очередь при росте расхода и скоростей в теплообменном аппарате растут и потери, как это показано на рисунке 39.

Из графика следует, что при равных входных параметрах с увеличением расхода абсолютные потери по тракту холодного контура составляют 68 %. Объяснением таких больших потерь давления является проблема в технологии изготовления образца. Как сказано выше, аддитивная технология селективного лазерного спекания обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, что допускает некоторое отклонение от рисунка, за счет прилипания частиц к напечатанной поверхности (рисунок 40). Более того из-за сложности геометрии экспериментального образца, продувка сжатым воздухом не позволяет удалить весь порошок внутри тракта, который в процессе изготовления служит поддержкой для детали.



**Рисунок 40 – Дефекты изготовления, выявленные при испытании образца
(для горячего контура)**

К этому добавляется шероховатость поверхности и сложность геометрии теплообменного аппарата с поворотом на 180°. Со снижением расхода потери снижаются. По сравнению с холодным, горячий контур имеет гораздо более выгодную для очистки и прохождения геометрию. Касательно, горячего контура можно сказать, что потери по тракту практически не меняются. Данная картина наблюдается на всех режимах, проведенных в эксперименте.

В рассмотренном эксперименте расхождение теплового баланса с учетом погрешности датчика 2 %. Данный дисбаланс сохраняется на всех режимах проведения эксперимента. Не соответствие теплового баланса между контурами объясняется потерями системы.

По результатам испытаний можно сказать, что технология SLS не обеспечивает на данный момент требуемой точности изготовления и требует дальнейшей отработки.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены три технологии изготовления теплообменного аппарата. По каждой технологии были изготовлены оснастка и образцы.
2. Изготовлены пластины методом штамповки эластичной средой, выявлено, что данной технологией не удастся получить высоту профиля гофра более 1,4 мм.
3. Изготовлены пластины методом штамповки на инструментальных штампах, установлено, что данной технологией в настоящий момент удастся получить высоту профиля гофра 2 мм.
4. Сформулированы необходимые технологические ограничения и требования для конструкции теплообменного аппарата. Обоснован выбор материала и отработана технология предварительной подготовки пластин к сварке. Выбран тип сварки, данный тип является первоначальным приближением, позволяющим отработать технологию изготовления.
5. Разработано приспособление для совместного позиционирования пластин в конвертах перед осуществлением сварки. Данное приспособление

(ложемент) изготовлено из капролона с медными втулками, испытание показало, что ложемент позволит повысить точность позиционирования пластин в конверте.

6. Проведена адаптация режимов роликовой шовной импульсной шаговой сварки для соединения пар пластин в конверты с толщиной листа 0,2...0,3 мм из жаростойкого сплава 20Х23Н18.

7. Отработана технология лазерной резки деталей из сплава 20Х23Н18, позволяющая увеличить точность изготовления заготовок и повысить производительность.

8. Проведена адаптация режимов микроплазменной сварки для соединения сборки конвертов с толщиной листа 0,2...0,3 мм из жаростойкого сплава 20Х23Н18 с матрицей теплообменного аппарата.

9. Изготовлен пластинчатый теплообменник по аддитивной технологии селективного лазерного спекания. Проведены работы по проектированию и изготовлению экспериментального стенда для испытаний перекрестноточного двухходового теплообменного аппарата. Проведено экспериментальное исследование, которое позволило определить основные теплогидравлические характеристики теплообменника. В процессе проведения эксперимента 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 температуры на выходе из горячего и холодного контуров от расхода G и абсолютных потерь $P_{абс}$ от расхода G . Экспериментальное исследование показало, что технология SLS не обеспечивает на данный момент требуемой точности изготовления и требует дальнейшей отработки.

10. В результате сравнения рассмотренных технологий можно отметить, что наиболее целесообразно использовать технологию штамповки на инструментальных штампах. Данная технология обеспечивает наиболее оптимальные геометрические и технологические параметры.

4. МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА

4.1 Анализ оптимальных теплогидравлических и технологических параметров теплообменного аппарата

В предыдущих главах были рассмотрены теплогидравлические параметры теплообменника при которых достигается наибольшая эффективность и трехногий изготовления с определением геометрических, которые возможно достичь на имеющемся оборудовании.

Для решения практических задач необходимо определить диапазон геометрических параметров с учетом получения максимальной эффективности и возможности изготовления.

Из представленного в литературе материала можно сделать вывод, что одной из поверхностей теплообмена, обладающей высоким КПД является поверхность типа «набивка Френкеля». Наибольшая интенсификация потока, исходя из экспериментальных данных достигается при углах скрещивания в 65...100°. Параметры гофра при этом имеют следующие геометрические размеры:

- толщина пластины 0,1...0,2 мм
- высота профиля пластины 1,6 мм...2,5 мм. Нижний предел выбран из соображений эффективности теплообменного аппарата.
- шаг гофра от вершины до вершины – от 2,00 -2,6 мм

Из всех рассмотренных технологий изготовления была выбрана штамповка на инструментальных штампах. Это объясняется тем, что при данной технологии достигается максимальная высота профиля пластины. Более того, технология обеспечивает необходимую точность изготовления и прочность. Для изготовления разработана технология сварки пластин в конверты и пакеты.

Оснастка позволяет получить пластину с параметрами гофра:

- толщина пластины от 0,2 мм
- высота профиля пластины от 1,6 мм до 2 мм.
- шаг гофра от вершины до вершины – от 5,4 мм

Исходя из технологических возможностей и с учетом оптимальных для эффективности геометрических параметров можно определить диапазон размеров гофра, в котором целесообразно проводить дальнейшее исследование:

- толщина пластины 0,2 мм

- высота профиля пластины от 1,6 мм до 2 мм. Нижний предел выбран из соображений эффективности теплообменного аппарата. Верхний предел ограничен технологическими возможностями.

- шаг гофра от вершины до вершины – от 5,4 мм.

Отталкиваясь от этого можно сократить время на разработку теплообменного аппарата. При разработке теплообменных аппаратов необходимо следовать основным принципам конструирования и учитывать их при расчетных исследованиях. Рассмотрим основные этапы проектирования и расчета, существующие на данный момент.

4.2. Принципы конструирования и методы расчетного исследования

При конструировании теплообменных аппаратов необходимо следовать следующим рекомендациям:

- При выборе расчетных скоростей теплоносителей в тракте аппарата надо стремиться к получению развитого турбулентного режима, т.к. это позволяет повысить коэффициент теплоотдачи. Однако следует помнить, что слишком высокие скорости теплоносителя приводят к большим гидравлическим сопротивлениям, что не желательно [6].

- Выбор рабочей среды следует проводить с учетом протекающих процессов, параметров потоков, а также факторов конструктивного и гидродинамического характера. В данной работе рассматриваются теплообменные аппараты «газ-газ».

- При выборе направления движения теплоносителей предпочтение отдают противотоку и перекрестному току, т.к. в этом случае удельная тепловая нагрузка получается выше, чем при прямотоке. Кроме того, при противотоке холодный

теплоноситель может быть нагрет до более высокой температуры, чем при прямоточной схеме аппарата.

- Оребрение поверхности теплообмена применяют для выравнивания термических сопротивлений теплоотдачи в случае, когда с одной стороны поверхности теплообмена наблюдаются большие значения коэффициента теплоотдачи, а с другой – малые [6].

Рассмотрим несколько критериев удовлетворительной работы теплообменного аппарата. Первым критерием является выполнение требований по рабочим параметрам: требуемая мощность аппарата должна обеспечиваться во время работы от одного профилактического ремонта до другого при заданных ограничениях по перепаду давления и независимо от увеличения отложений на поверхности теплообмена [44]. Стоит отметить, что при проектировании теплообменного аппарата всегда присутствует элемент неопределенности, в связи с тем, что теплофизические свойства редко известны с высокой степенью точности. Расчетные методы основываются на использовании критериальных уравнений, точность которых находится в пределах разброса экспериментальных данных. Технология изготовления аппарата предполагает использование системы допусков, к тому же реальные условия работы теплообменников в разные периоды времени неодинаковы и отложения, как правило, оказываются несколько большими, чем учитывалось вначале. В связи с этим, требования к рабочим характеристикам выполняются не всегда. С этой точки зрения для количественных оценок слишком мало как статических данных о работе отдельных аппаратов, так и сведений о влиянии эффективности их работы на другие процессы в двигателе. Из этого следует, что конструктор, принимая во внимание влияние эффективности работы теплообменника, должен гарантировать надежную работу аппарата.

Второй критерий заключается в том, что теплообменник должен удовлетворять условиям, общим для всего оборудования. Сюда входят механические напряжения, погрузка, сборка, запуск, остановка и другие ситуации, связанные с возможными аварийными нарушениями работы и

производственного процесса. Также следует предпринять меры по исключению проявления процесса коррозии от воздействия теплоносителей и окружающей среды. Этого можно добиться подбором материала и конструкции аппарата [32]. Отложения на поверхности теплообмена должны быть по возможности минимальными, однако, здесь средства конструктора ограничены применением возможно более высоких скоростей, допустимых по перепаду давлений и ограничениями по эрозии и вибрации, а также как можно более легким доступом к загрязненной поверхности для чистки.

Третий критерий представляет собой требование возможности периодического ремонта теплообменника, включающий в себя очистку поверхностей теплообмена, замену уплотнений и других элементов конструкции, подверженных коррозии, эрозии, вибрации или старению. Данное требование может также стать причиной ограничений на расположении теплообменника в ГТД и обеспечения свободного пространства вокруг него.

Четвертый критерий заключается в том, что следует учитывать преимущества многосекционной компоновки с отсеченными клапанами. Это позволит ремонтировать поочередно каждую секцию без особого ущерба для работы всего аппарата.

Пятый критерий сводится к тому, что аппарат должен иметь минимально возможную стоимость при соответствии выше перечисленным критериям. При конструировании могут иметь место ограничения на размер аппарата (длину, массу и т.д.), возможности обслуживания, хранения запасных элементов. При этом следует иметь в виду, что экономия первоначальной стоимости может повлечь увеличение эксплуатационных расходов [44].

Соблюдение выше перечисленных принципов при проектировании теплообменных аппаратов повышает вероятности успешного конструирования.

4.2.1 Конструктивный расчет теплообменных аппаратов

Конструкции и связанные с ним тепловые расчеты теплообменных аппаратов весьма разнообразны. Поэтому большое значение приобретает здесь установление общей методики тепловых расчетов того, либо иного теплообменного аппарата в зависимости от характера и имеющихся исходных данных [30].

Разнообразные тепловые расчеты теплообменных аппаратов могут быть сведены к двум основным видам: конструктивный (проектный) и поверочный.

Конструктивный расчет выполняется при проектировании теплообменного аппарата, при заданных условиях тепловой работы аппаратов (по расходам теплоносителей и температурному режиму) основной целью такого расчета является определение поверхности теплообмена и конструктивных размеров выбранного типа аппарата. Конструктивный расчет состоит из теплового (теплотехнического), гидравлического и механического расчетов [34].

Цель теплового расчета определить требуемую поверхность теплообмена и подобрать стандартизованный аппарат. Расчет теплообменника состоит из двух этапов:

1) предварительный (ориентировочный) тепловой расчет, в рамках которого определяют ориентировочную поверхность теплообмена и предварительно принимают аппарат;

2) уточненный тепловой расчет проводится с целью уточнения поверхности теплообмена путем расчета параметров, характеризующих процесс теплообмена — коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи с учетом режимов движения потоков в предварительно выбранном аппарате.

Гидравлический расчет проводится с целью определения достаточности давления, создаваемого для преодоления сопротивлений, возникающих при движении потока через аппарат [34].

В механическом расчете аппарата обоснованно выбирают материалы для изготовления элементов конструкции и проводят все необходимые прочностные

расчеты, подтверждающие возможность его безопасной и длительной эксплуатации при заданных параметрах работы (температура, давление) и с учетом свойств теплоносителей.

4.2.2. Поверочный расчет теплообменных аппаратов

Поверочный расчет производится для установления возможности применения имеющихся или стандартных теплообменных аппаратов для необходимых технологических процессов. При таком расчете исходными данными являются скорости и температуры на входе, теплофизические свойства теплоносителей (включая данные по фазовому переходу, если он происходит), а результатами расчета — параметры теплообменника, а именно: температуры на выходе и тепловая мощность (если фиксирована длина), перепад давлений [44]. Следовательно, целью расчета является выбор условий, обеспечивающих оптимальный режим работы аппарата. Структурная схема расчета представлена на рисунке 41.

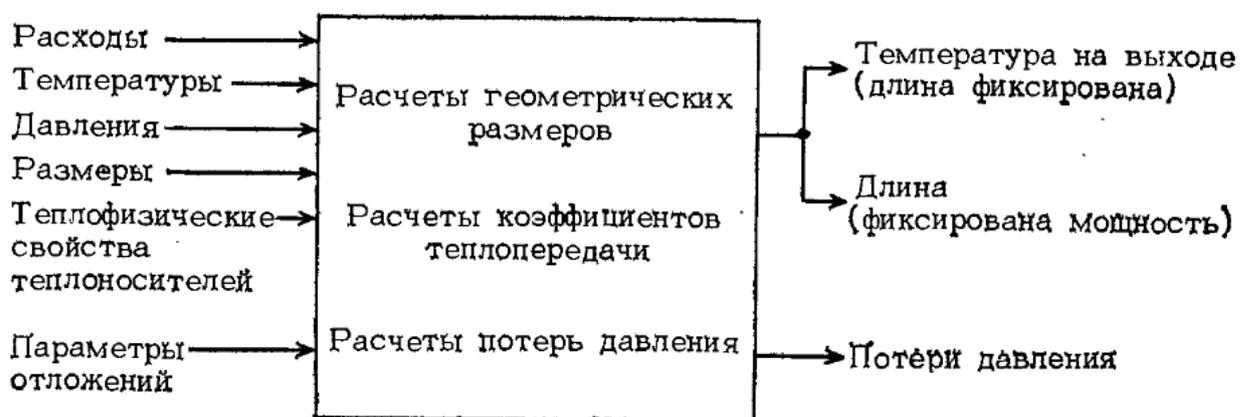


Рисунок 41 - Программа поверочного расчета

В некоторых случаях при таком расчете теплопроизводительность (степень регенерации) аппарата является заданной, и требуется определить, например, расход и начальную температуру одной из сред [34].

Если результаты поверочного расчета показывают, что конструкция выбранного теплообменного аппарата обеспечивает приемлемые

теплогидравлические характеристики по обеим сторонам или они ниже допустимых, то такая конструкция может рассматриваться как решение задачи. Часто случается, что несколько вариантов конструкции удовлетворяют этим требованиям, тогда выбор должен быть сделан исходя из других требований, в первую очередь из стоимости.

Поверочные тепловые расчеты приобретают большое значение в связи с разработкой мероприятий по рационализации теплового хозяйства промышленных предприятий и повышению производительности теплового оборудования. Эти расчеты должны сопровождаться тщательным анализом получаемых результатов и выполняться, как правило, в нескольких вариантах, что позволит более обоснованно выбрать оптимальный режим работы данного аппарата [34].

Поверочные расчеты обычно выполняются чаще, чем проектные. Следует отметить, что тепловые расчеты поверхностных теплообменных аппаратов тесно связаны с расчетами гидромеханическими и конструктивными. Некоторые важные вопросы, например, выбор оптимальной скорости движения рабочих сред, характерных размеров каналов, по которым течет теплоноситель, решаются обычно при совместном выполнении этих расчетов.

4.2.3. Основные уравнения теплового расчета теплообменных аппаратов

Основные уравнения теплового расчета теплообменных аппаратов сводятся к уравнениям теплового баланса и теплообмена [50].

Уравнение теплового баланса теплообменных аппаратов служит чаще всего для определения тепловой нагрузки Q .

Уравнение теплового баланса для однофазной рабочей среды в количестве G кг/ч в дифференциальной форме имеет вид:

$$Q = G \cdot c \cdot dt \quad (10)$$

Интегрирование последнего уравнения дает величину тепловой нагрузки (при постоянном расходе нагреваемой среды):

$$Q = G \int_{t'}^{t''} c dt = G \cdot c_m \cdot (t'' - t'), \quad (11)$$

где c_m – средняя теплоёмкость в данном температурном интервале;
 t' , t'' – начальная и конечная температуры рабочей среды.

В тепловых расчетах часто пользуются понятием о так называемом водяном эквиваленте рабочих сред W , численная величина которого определяет количество воды, эквивалентное по своей теплоемкости часовому количеству данной рабочей среды [28].

В соответствии с этим для заданного количества рабочей среды G кг/ч при теплоемкости воды, равной 1 ккал/кг град, можно написать:

$$W = G \cdot c$$

Если тепло первичной (горячей)рабочей среды, для которой известны G_1 и c_1 , воспринимаются вторичной (холодной рабочей средой, для которой известны G_2 и c_2 , то уравнение теплового баланса без учета потерь тепла представляет собой соотношение:

$$dQ = -G_1 \cdot c_1 \cdot dt_1 = G_2 \cdot c_2 \cdot dt_2, \quad (12)$$

или

$$dQ = -W_1 \cdot dt_1 = W_2 \cdot dt_2,$$

После преобразования:

$$Q = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = W_2 \cdot (t_2'' - t_2'), \quad (13)$$

Откуда

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = R, \quad (14)$$

Из этого можно сделать вывод, что изменения температур однофазных рабочих сред обратно пропорциональны их водяным коэффициентам.

Уравнение теплообмена служит чаще всего для определения поверхности теплообмена F .

$$Q = k \cdot (t_1 - t_2) \cdot F \quad (15)$$

где k – коэффициент теплопередачи;

F – поверхность теплообмена.

Абсолютное значение площади поверхности теплопередачи F не влияет на интенсивность процессов теплообмена. Влияние оказывает геометрия поверхности как с точки зрения интенсификации процессов теплообмена, так и с точки зрения компактности теплообменных устройств.

Коэффициент теплопередачи в простейшем случае для плоской стенки рассчитывают по формуле:

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2}, \quad (16)$$

где: α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи для горячей и холодной сред соответственно; δ - толщина стенки; λ коэффициент теплопроводности материала стенки.

Величины $1/\alpha_1$, δ/λ и $1/\alpha_2$ представляют собой термические сопротивления теплоотдаче от горячей среды к стенке, стенки и теплоотдаче от стенки к холодной среде соответственно.

Интенсивность передачи теплоты от горячего теплоносителя к холодному, главным образом, зависит от коэффициента теплопередачи. Однако, знания численного значения одного лишь коэффициента теплопередачи для исследования процесса недостаточно. Сделать правильное заключение и добиться существенного изменения теплового потока можно только на основе анализа соотношений всех термических сопротивлений, входящих в выражение для коэффициента теплопередачи.

Значение коэффициента теплопередачи, определяемое по уравнению (5), всегда меньше меньшего из значений α . Поэтому, если имеет место существенное различие в значениях коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 , то необходимо предпринять действия по увеличению меньшего из значений α .

При больших значениях коэффициентов теплоотдачи коэффициент теплопередачи в значительной степени зависит от термического сопротивления

стенки. В этом случае необходимо принять меры по снижению термического сопротивления стенки путем подбора соответствующего материала стенки (с высоким значением α и, по возможности, с минимальным значением δ).

Уравнение теплообмена (4) предназначено для расчетов при постоянной температуре вдоль поверхности теплообмена. В реальных условиях температура рабочих сред вдоль поверхности теплообмена чаще всего постоянными не остаются. Одновременно с изменением температур рабочих сред вдоль поверхности теплообмена изменяется и разность температур или температурный напор $\Delta t = t_1 - t_2$. При этом процессы могут быть стационарными и нестационарными. Большое влияние на процесс теплообмена оказывает относительное движение теплоносителей. Относительное движение теплоносителей оказывает существенное влияние на величину движущей силы процесса теплопередачи. Кроме того, взаимное направление движения теплоносителей может существенно изменить технологические условия протекания процесса теплообмена (экономия теплоносителя, создание более мягких условий нагрева или охлаждения) [82].

При наличии теплообмена температура теплоносителя различна как по сечению, так и по длине канала. В технических расчетах обычно имеют дело с так называемой средней температурой теплоносителя. Для сечения в качестве средней обычно применяется температура смешивания, которая получается в результате хорошего перемешивания теплоносителя.

Усреднение температуры теплоносителя по длине канала может быть произведено по-разному. При небольшом изменении температуры теплоносителя в качестве средней берется среднеарифметическая из ее крайних значений:

$$t_f = (t' - t'') \cdot \frac{1}{2} \quad (17)$$

В общем случае усреднение производится по следующей формуле:

$$t_f = t_w \pm \Delta t \quad (18)$$

где t_w – температура стенки; Δt – среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t = \Delta t' \cdot \frac{\frac{\Delta t''}{\Delta t'} - 1}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}} \quad (19)$$

Здесь $\Delta t'$ – температурный напор (разность между температурами теплоносителя и стенки) на одном, а $\Delta t''$ – на другом конце канала, причем $\Delta t' > \Delta t''$. Среднегеометрический температурный напор всегда меньше среднеарифметического, но при $\frac{\Delta t''}{\Delta t'} > 0,5$ разница между ними пренебрежимо мала (меньше 4%) [50].

Основным направлением при совершенствовании методов расчета является сокращение времени на его проведение, а также повышение точности и визуализации полученных данных. При применении современных программ 3D-расчета появляется возможность объединить некоторые из перечисленных методов расчетного исследования, тем самым сократить время на проектирование, учесть намного больше факторов влияния и представить результаты расчета в наглядном виде (поля скоростей, температур, давлений). Поэтому одной из основных задач данной работы является использование современных программ расчета и сокращения временных затрат на расчет. Поскольку для расчета неизбежно требуются трехмерные модели, то целесообразно использование и трехмерных программ проектирования. Это позволит снизить время подготовки расчетных моделей и вероятность ошибки в их геометрии. Вместе с этим сокращение времени проектирования может быть достигнуто с применением методов параметризации геометрической модели. 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, отталкиваются от эффективности, которое необходимо получить и далее вычисляется требуемая площадь поверхности теплообмена. В данной ситуации возникает сложность, которую возможно решить создав методику, позволяющую

отталкиваться от геометрических размеров и далее получать теплогидравлические характеристики пластины. Таким образом, появится возможность подбирать требуемую эффективность теплообменного аппарата и соблюдать ограничения по габаритным размерам теплообменника и двигателя в целом.

4.3. Разработка алгоритма методики проектирования и расчета теплообменного аппарата

Основной задачей разрабатываемой методики является разработка пластины с заданными габаритными размерами. Поэтому на выходе необходимо получить такие параметры теплообменника как: степень регенерации (КПД/эффективность) и потери давления. Целесообразно на первом этапе начать проектирование с оценки этих параметров. Для решения данной задачи необходимо разработать программу оценочного расчета, которая позволит сузить диапазон исследуемых размеров. На следующем этапе необходимо провести более точный расчет пластины, для решения данной задачи возможно использование методов трехмерного численного моделирования. Преимуществом данного способа расчета является то, что при его использовании становится возможным визуализировать результаты расчетов, т.е. представить поля распределения скоростей, давлений и температур по любому срезу модели. Однако, для проведения расчета необходимо создать геометрию самой пластины и теплоносителей. Создание геометрии возможно в любой из программ трехмерного проектирования таких как Autodesk Inventor, SolidWorks и др. В случае, когда геометрия используется один раз подойдет обычное трехмерное моделирование, но в данном случае при постоянной геометрии гофра могут изменяться размеры пластины и угол скрещивания. В связи с этим целесообразно использовать методы параметрического проектирования. Метод параметрического проектирования позволяет спроектировать сборку, объединяющую в себе геометрические модели пластины и оснастки, связанные с моделями теплоносителей. Благодаря этому при изменении размеров пластины автоматически будут готовы и модели для изготовления оснастки на

фрезеровальном станке с ЧПУ, и геометрия пластины и теплоносителей для расчета. Таким образом методика расчета и проектирования имеет следующий алгоритм, представленный на рисунке 42.

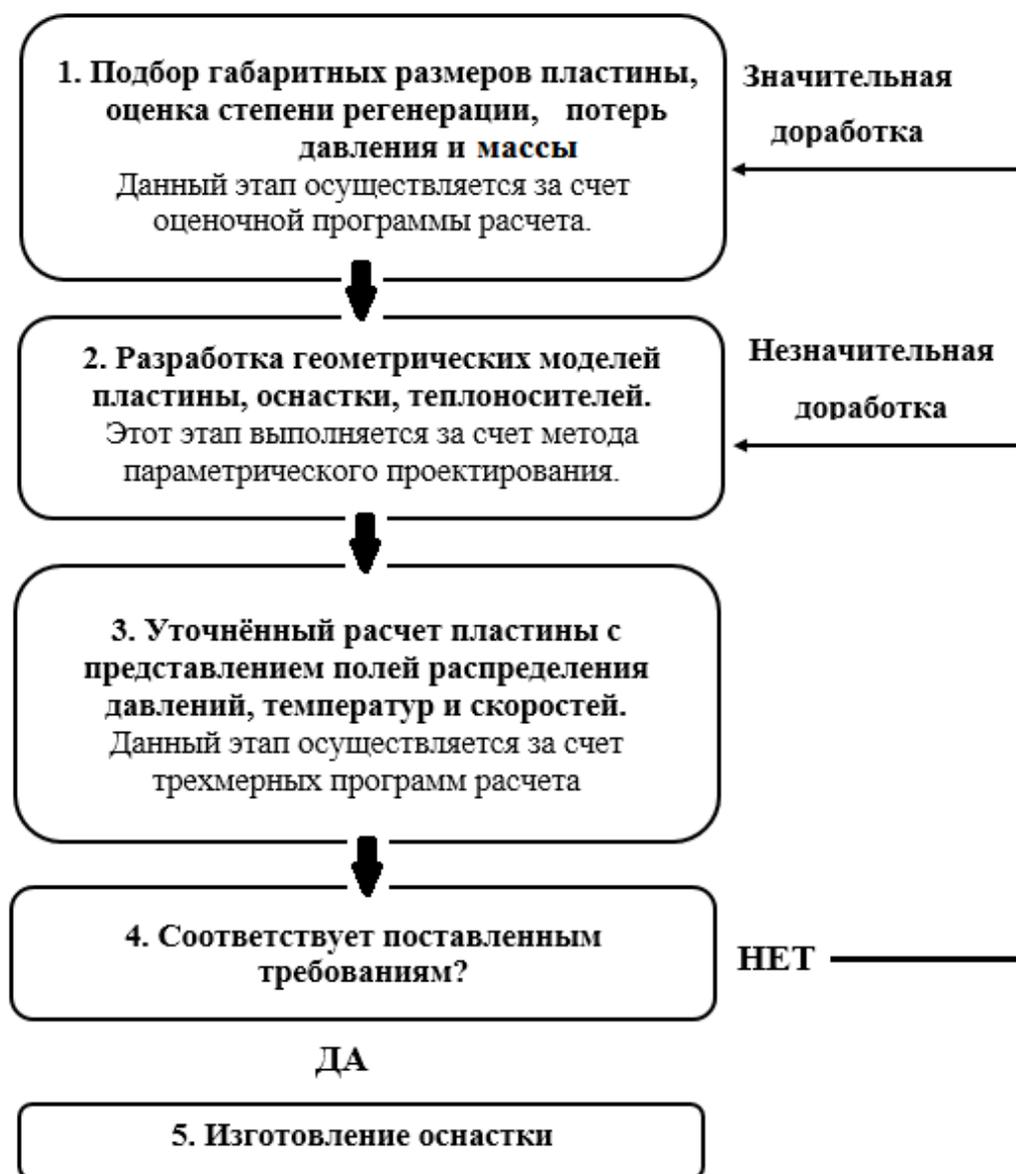


Рисунок 42 - Алгоритма методики проектирования и расчета

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

1. Разработка параметрических геометрических моделей пластины, оснастки и расчетных моделей теплоносителей.

2. Разработка метода трехмерного численного моделирования сопряженной задачи теплопередачи и газодинамики.

3. Верификация метода трехмерного численного моделирования.
4. Проведение расчетного исследования для получения критериальных зависимостей и разработка оценочной программы расчета на их основе.

4.3.1. Параметрическая методика проектирования пластины теплообменного аппарата и оснастки

В настоящее время трудно представить проектировочные работы без использования компьютерной техники. Это обусловлено усложнением конструкций авиационных двигателей и летательных аппаратов (ЛА). Основной задачей конструкторских бюро является сведение к минимуму ошибок, допущенных при проектировании сложных технических устройств. Использование систем автоматизированного проектирования позволяет существенно повысить качество проектирования и производительность труда сотрудников при создании новых технических устройств. Использование автоматизированных систем проектирования позволит решать сложные конструкторские задачи в соответствии с современными требованиями по срокам и стоимости. В авиастроении особое внимание уделяется оптимизации конструкции по весовым и прочностным характеристикам, а также оптимизации внешней формы, от которых существенно зависят функциональные и экономические показатели ЛА [39]. Не смотря на то, что проблеме совершенствования методов проектирования на этапах разработки посвящено множество работ данная проблема все еще остается актуальной, поскольку в процессе проектирования существует необходимость в объединении множества различных факторов, их анализе и нахождении различных взаимосвязей.

Особо актуальна данная проблема для научно-технических исследовательских организаций и институтов, где при создании инновационных продуктов требуется рассматривать различные геометрические конфигурации одного и того же объекта. Поэтому для таких организаций использование стандартной методики проектирования при разработке инновационных продуктов и проведении расчетных исследований отнимает много времени.

Вторая проблема, которая возникает при разработке элементов двигателей ЛА, заключается во взаимодействии конструктора и технолога. Изобретательская мысль не всегда успевает воплощаться в средства производства в связи, с чем возникает диссонанс в связке конструктор - технолог. Несогласованная работа конструктора и технолога является одной из причин увеличения срока изготовления деталей, узлов, а соответственно и двигателя в целом.

Сократить время на этапах разработки и доводки изделий, а также на этапах проведения расчетных исследований становится возможным при применении метода параметрического проектирования. Использование параметрического метода проектирования является одной из целей данной работы.

Классификация методов параметрического проектирования

Отличие метода параметрического проектирования от обычного двухмерного черчения или трёхмерного моделирования состоит в том, что при его использовании конструктор создаёт математическую модель объектов с параметрами, которые взаимно зависят друг от друга. При изменении одного из параметров происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

На создание параметрических моделей уходит несколько больше временных затрат, чем на обычную 3D-модель, однако потом появляется возможность проводить доводку детали или сборки быстрее в десятки раз. Непараметрическая модель создается быстрее, однако такие модели не обладают преимуществом оперативного изменения размеров.

Решение проблемы несогласованной работы конструктора и технолога исходит из сути параметрического моделирования. При построении моделей элементов конструкции методом параметрического проектирования возможно наложение дополнительных зависимостей, определяющих технологию изготовления детали. Таким образом, конструктор, разрабатывающий параметрическую деталь, тесно взаимодействует с технологом и, зная возможности производства, задает ограничивающие диапазоны зависимостей.

Конструкторы, которые будут пользоваться разработанной параметрической деталью, смогут экономить время, и их работа будет контролироваться заданными ранее технологическими зависимостями и параметрами. Основным плюсом при этом, как было замечено ранее, является экономия времени на проектирование, возможность стандартизации, повышение качества и точности при проектировании и выполнении чертежей. Однако, целесообразно создавать параметрические модели тех деталей, которые будут в последствии использоваться многократно, поскольку для создания параметрической модели требуется несколько больше времени и это требует знания технологической базы производства.

В данной работе, применение метода параметрического проектирования оправдано. Работа ориентирована на разработку теплообменных аппаратов для различных мощностей ГТД сложного цикла.

Использование подобного метода проектирования создает научно-технологический задел и стимулирует развитие технологического оборудования. В перспективе актуальным будет изготовление деталей по трехмерным моделям, т.е. технологу для изготовления детали необходимо будет написать программу для станка с ЧПУ. Данную технологию используют и сейчас, но в отечественных конструкторских бюро она встречается редко. Применение такой технологии изготовления деталей повышает качество и точность выполняемой детали, а также снижает время изготовления и повышает безопасность производства. Подобную методику проектирования целесообразно применять при изготовлении деталей при помощи трехмерного принтера.

Рассмотрим типы параметризации и сферы применения каждого типа.

Существует несколько типов параметризации:

- табличная параметризация;
- иерархическая параметризация;
- вариационная (размерная) параметризация;
- геометрическая параметризация.

1) Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путём выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно [40].

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

2) Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «древа построения». В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «древа построения» модели, система запоминает не только порядок её формирования, но и иерархию её элементов (отношения между элементами). Пример: сборки → под сборки → детали.

Параметризация на основе истории построений присутствует во всех САПР использующих трёхмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией [40].

3) Вариационная или размерная параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами.

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит так:

На первом этапе создаётся эскиз (профиль) для трёхмерной операции. Далее на эскиз накладываются необходимые параметрические связи.

Затем эскиз, уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные (например, параметру обозначающему длину некой детали присвоить имя «Length») и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, «Radius=Length/2»)

Затем производится трёхмерная операция (например, выдавливание), значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина выдавливания) [40].

В случае необходимости создания сборки, взаимное положение компонентов сборки задаётся путём указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или перпендикулярность граней и рёбер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трёхмерную модель.

4) Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель, в случае геометрической параметризации, состоит из элементов построения и элементов изображения. Элементы построения (конструкторские линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.).

Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения. Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит так:

На первом этапе конструктор задаёт геометрию профиля конструкторскими линиями и отмечает ключевые точки. Далее проставляет размеры между конструкторскими линиями. На этом этапе можно задать зависимость размеров друг от друга. Затем обводит конструкторские линии линиями изображения — получается профиль, с которым можно осуществлять различные трёхмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования методом вариационной параметризации. Геометрическая параметризация позволяет более гибко редактировать модели. Если надо внести незапланированное изменение, то в геометрию модели не обязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), — можно провести новую линию построения и перенести на неё линию изображения. [40].

Отталкиваясь от возможностей и особенностей работы с использованием перечисленных методов параметрического проектирования, можно сформулировать требования к проектам, где применение данных методов целесообразно. Основным требованием является: использование объекта параметрического проектирования должно быть многократным, т.е. он должен использоваться во множестве других проектов, где не изменяются его функции, но изменяются габаритные размеры. Теплообменные аппараты, рассматриваемого типа целесообразно исследовать с применением параметрической методики проектирования.

4.3.2. Применение методов параметрического проектирования к построению 3D-модели теплообменника и штампа

На первых этапах работы была использована методика параметрического построения только пластины теплообменного аппарата для апробации метода проектирования. Модель пластины оправдала ожидания, снизив время

проектирования с 8-9 ч., которые требовались на корректировку рисунка теплообменной поверхности при изменении габаритов или формы гофра пластины, до 1-5 мин., в зависимости от сложности самой пластины.

После подтверждения целесообразности использования метода параметрического проектирования была разработана 3D-модель, которая содержит 4 элемента: пластину, матрицу, пуансон и систему упоров/прижимов. Новая параметрическая сборка основывается на иерархической, вариационной и геометрической типах параметризации. Методика параметрического проектирования данной сборки построена на создании дерева параметрических деталей, зависящих друг от друга. Основой данной сборки служит геометрический тип параметризации. Родительской деталью является пластина.

Методика построения модели (базового файла):

- построение эскиза профиля гофра пластины, без утонения в местах вытяжки металла;

- построение эскиза профиля гофра пуансона, с соблюдением технологических зазоров;

- построение эскиза профиля гофра матрицы, с соблюдением технологических зазоров.

При построении в таблицу параметров вносятся значения толщины пластины, высоты гофра, угла раскрытия гофра, шаг гофра, который определяется исходя из длины основания. При создании эскиза также учитывается внутренний радиус скруглений, по технологическим ограничениям не менее 1 мм. На рисунке 43 представлены данные эскизы.

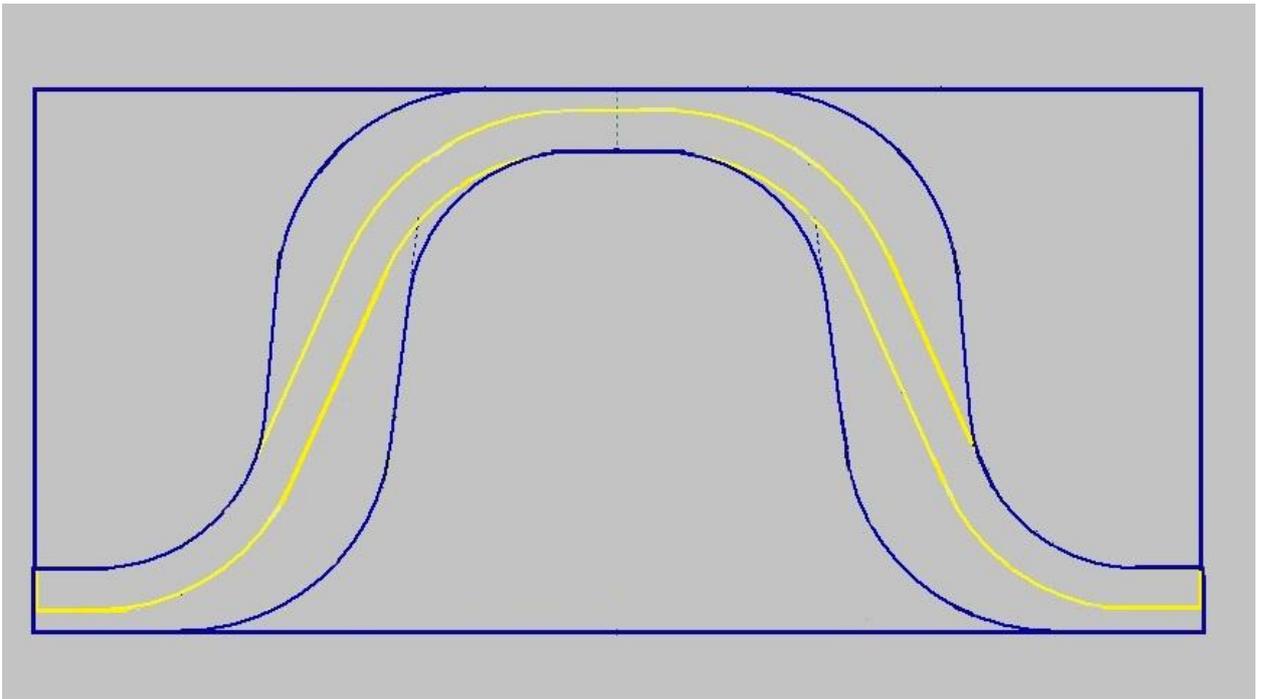


Рисунок 43 - Эскизы пластины, матрицы и пуансона.

- построение утоненного профиля пластины;
- выдавливание гофр пуансона, матрицы и пластины;
- посторенние законцовок гофры;
- перемещение гофр на требуемый угол относительно основной оси;
- построение тел пуансона и матрицы;
- заливка прямых краев матрицы (рисунок 44);
- построение полок для сварки для пластины, матрицы, пуансона.
- построение системы упоров и прижимов.

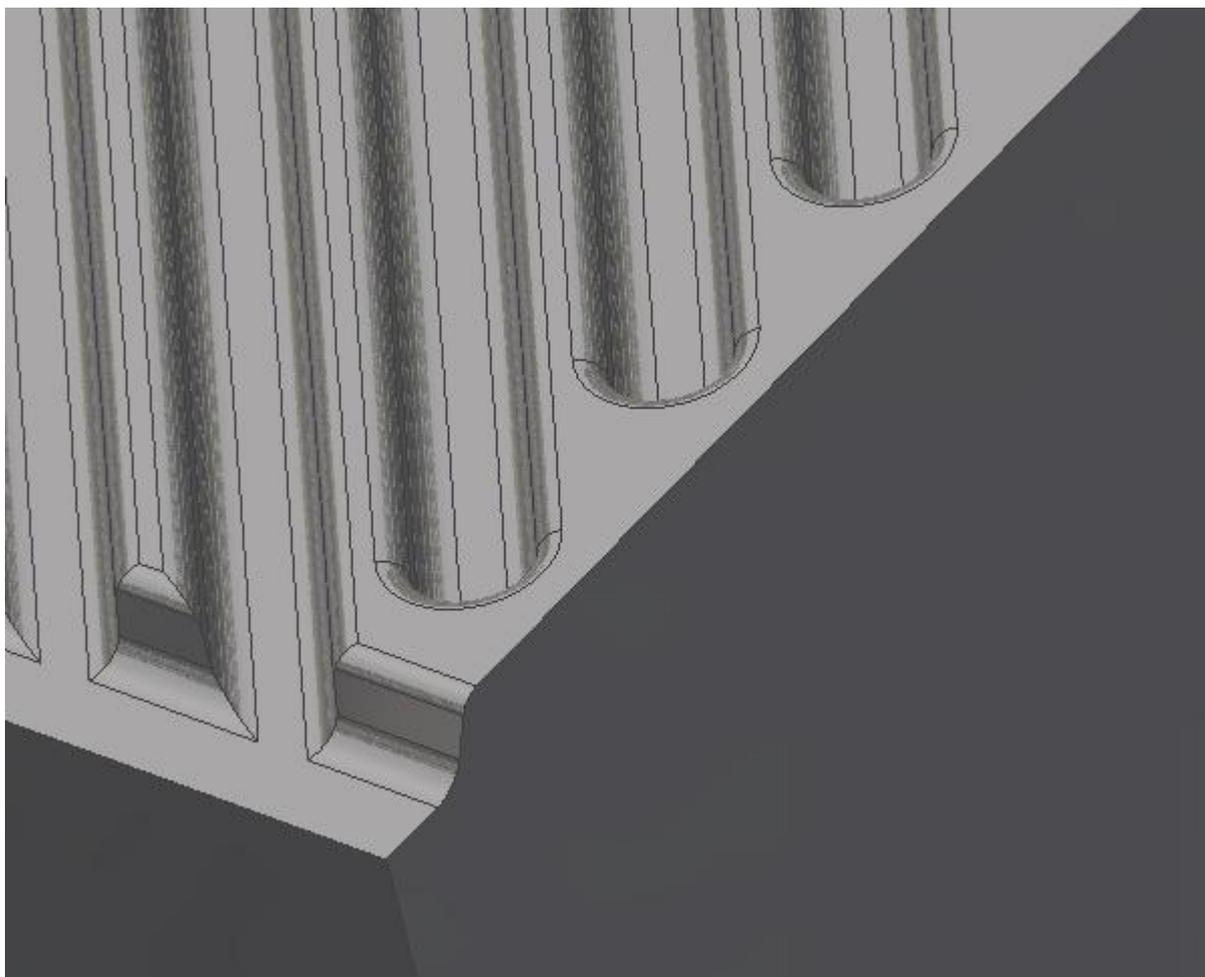


Рисунок 44 - Построение прямых краев матрицы

При изменении одного из параметров, пластина и зависимые элементы пуансона и матрицы, а также упоры и прижимы перестраиваются автоматически. Время проектирования штампа и матрицы с 8-16 ч., которые требовались на изменение габаритов или формы гофра пластины и штампа, сократились до 2-8 мин., в зависимости от сложности модели.

Методика построения сборки из отдельных элементов предполагает создание базового файла, в котором отражены все размеры пластины и оснастки для ее изготовления, методика построения описана выше. Таким образом, в одном файле созданы отдельные твердые тела (модели матрицы, пуансона, пластины и планок), геометрически зависимые между собой. Данные модели являются упрощенными (без отверстий для крепления матрицы и пуансона к плитам прессы). Далее из базового файла создается файл параметрической сборки (ПС).

На рисунки 45 и 46 представлен файл ПС теплообменной пластины со штампом. Из файла ПС каждый элемент сборки (ЭС) экспортируется в отдельный файл. Это делается для создания чертежей на каждый ЭС и для расчета каждого из них.

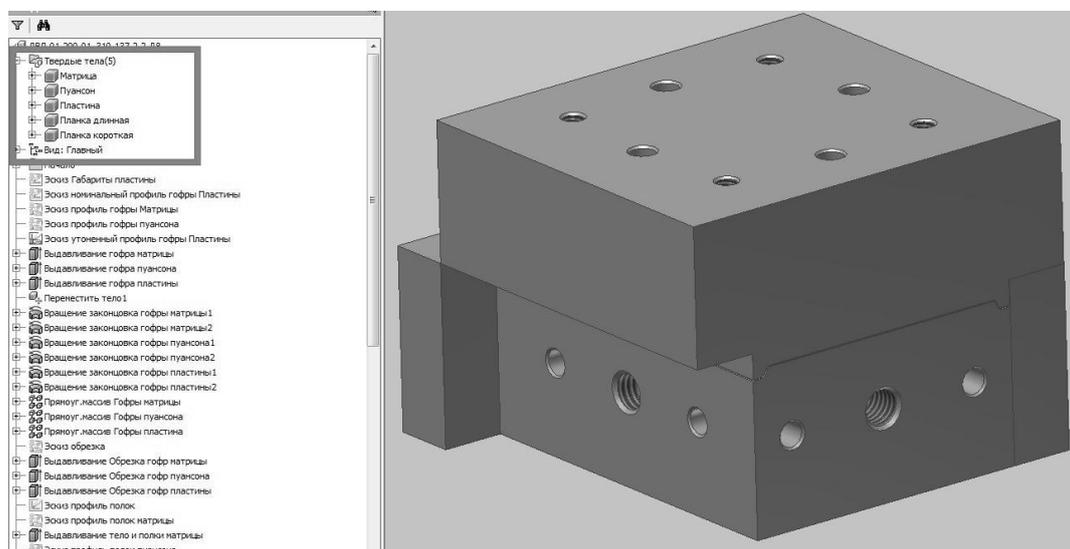
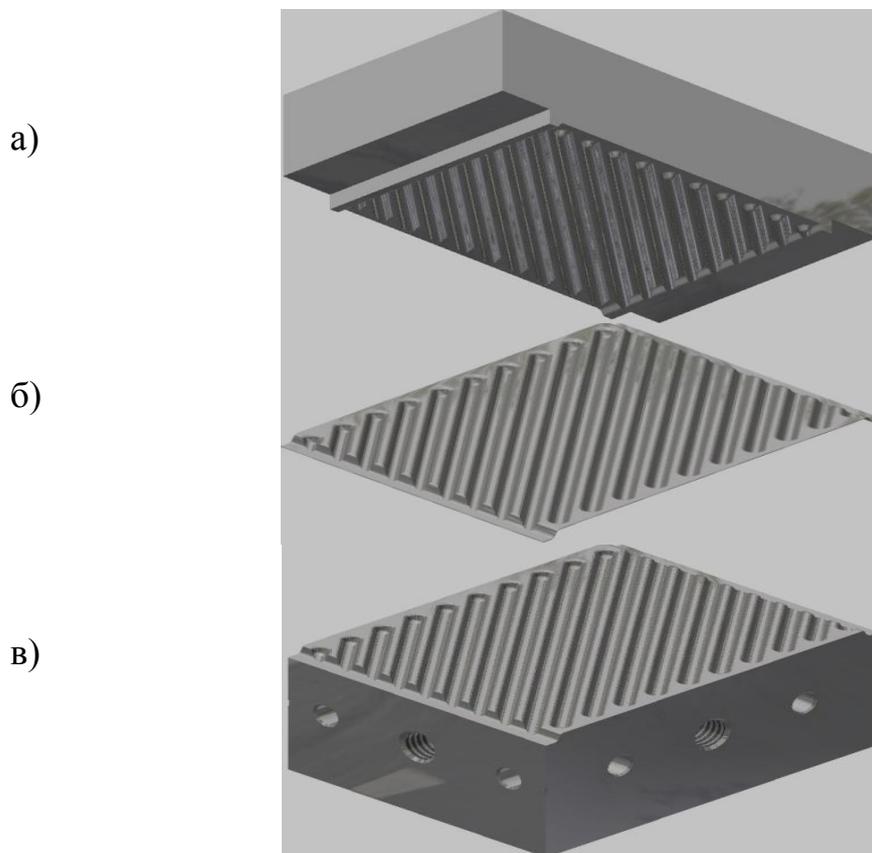


Рисунок 45 - Параметрическая сборка оснастки пластины теплообменника

Необходимые операции доработки (сопряжения) проведены после экспортирования ЭС в отдельный файл. Каждый ЭС, как говорилось ранее, связан с базовым файлом и ПС, при изменении размеров в базовом файле, изменения перейдут и в файл ПС, и в файл ЭС, после обновления. При создании модели пластины учтены процессы, которые происходят при создании натурального объекта, так в модели пластины учитывались места утонения материала при изготовлении. В результате полученная модель пластины, приближена к реальному виду. При расчете теплообменных процессов такая модель пластины даст более точные данные по исследуемым параметрам. Базовый файл связан с файлами заготовок оснастки и пластины, что позволяет в любой момент определить размеры, объем и вес заготовок, обновить файл конструкторской документации.

В результате работы апробирован метод параметрического проектирования на примере пластины теплообменного аппарата. Создана математическая модель пластины и оснастки для ее изготовления.

Применение позволило снизить время проектирования пластины и штампа. Время создания 3D-модели пластины теплообменника и штампа существенно сократилось сравнению с обычной 3D-моделью.



**Рисунок 46 - Параметрическая сборка: а) пуансон; б) пластина;
в) матрица**

Снижена стоимость проектирования пластины и штампа. Снижение стоимости обусловлено сокращением нормо-часов на проектирование.

Снижен риск ошибки при проектировании. Заложенные диапазоны используемых параметров основываются на технологических возможностях производства. Взаимная зависимость расположения деталей и автоматическое перестроение смежных элементов исключают неточности при обновлении базового файла и ПС.

4.2. Метод трехмерного численного расчета

С помощью традиционных методов не удастся обеспечить требуемые темпы развития ни в фундаментальных или прикладных исследованиях, ни при модернизации или проектировании технических объектов. Поэтому в науке, технике и производстве при решении разнообразных задач во все больших масштабах применяются новые эффективные методы исследования. При этом особое внимание уделяется моделям процессов и способам их построения [55]. Наиболее перспективным направлением является внедрение методов на основе программных систем конечно-элементного (МКЭ) анализа.

Для проведения расчётного исследования разработана комплексная математическая модель теплообменного аппарата. Модель теплообменных устройств обеспечивает проектировочный расчёт теплопередающих матриц воздухоохладителя и регенератора, определение параметров теплоносителей на выходе из теплообменных аппаратов по известным параметрам на входе на нерасчётных режимах работы. Для численного решения уравнения теплообмена используются методы хорд и последовательных приближений. При заданной поверхности теплообмена данный метод расчета позволяет объединить:

- уточненный тепловой расчет, который проводится с целью уточнения поверхности теплообмена путем расчета коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи с учетом режимов движения потоков в предварительно выбранном аппарате;

- гидравлический расчет, который проводится с целью определения достаточности давления, создаваемого для преодоления сопротивлений, возникающих при движении потока через теплообменник [34];

- механический расчет, позволяющий обосновать выбор материалов для изготовления и оценить прочность элементов конструкции, подтверждающий возможность его безопасной и длительной эксплуатации при заданных параметрах работы (температура, давление) и с учетом свойств теплоносителей. Такой метод расчета также позволяет избежать длительных и дорогостоящих циклов разработки, включающих проектирование, изготовление, испытания,

визуализировать процессы, происходящие на любом участке конструкции, в частности строить поля температур, скоростей, давлений и т.д. Данная методика является своего рода виртуальным экспериментом.

Численное моделирование физических процессов можно описать следующей последовательностью:

1. построение геометрии;
2. генерация сетки;
3. численное решение;
4. визуализация результатов.

Генерация расчетной сетки в физической области - неотъемлемая часть численного решения математической модели. Расчетные сетки используются при численном решении дифференциальных и интегральных уравнений. Качество построения расчетной сетки в значительной степени определяет качество численного решения уравнения и сходимости.

4.2.1. Классификация расчетных сеток 3D-моделей

Построение расчетной сетки можно рассматривать как создание взаимно-однозначного отображения области определения функции на некоторую расчетную область, при этом узлы сетки переводятся из физической области в вычислительную. Данное отображение должно иметь сгущение в тех областях, где возможно появление больших градиентов искомых функций. Элементами сетки в одномерном случае являются отрезки, в двумерном – треугольники или четырехугольники, а в трехмерном – тетраэдры или призмы [12]. Среди расчетных сеток выделим два основных класса: Структурированные сетки – это сетки, у которых множество сеточных узлов являются упорядоченными. Неструктурированные сетки – сетки с произвольным расположением узлов.

Структурированные сетки (рисунок 47) широко применяются в вычислительной математике. Сетка представляет собой упорядоченную по определенным правилам структуру с явно выраженными сеточными направлениями. Преимущества структурированных сеток связаны именно с

сохранением канонической структуры соседей для каждого узла сетки, с сохранением шаблона. В качестве ячеек используются прямоугольники (2D) или параллелепипеды (3D). Чаще всего такие сетки используются в конечно разностных методах. При построении регулярных сеток в геометрически сложных физических областях применяют преобразование координат для построения равномерной расчетной сетки в преобразованном пространстве. Кроме того, расчетную математическую модель также следует записывать в криволинейных координатах.

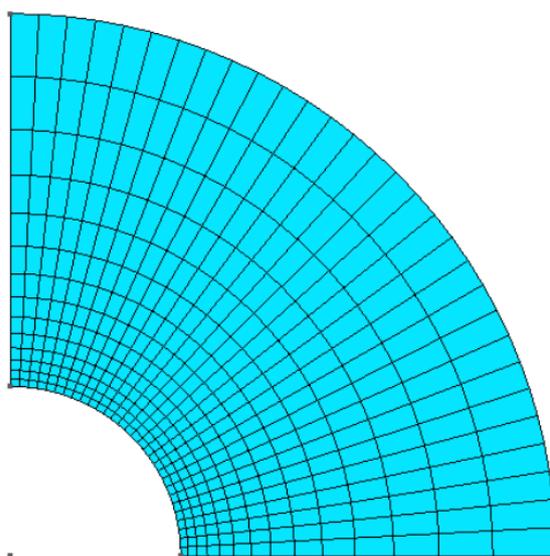


Рисунок 47 – Структурированная расчетная сетка

Характерной особенностью неструктурированных сеток (рисунок 48) является произвольное расположение узлов сетки в физической области. Произвольность следует понимать в том смысле, что отсутствуют сеточные направления и нет структуры сетки, подобной регулярным сеткам. Узлы сетки объединяются в многогранники (трехмерный случай) или в многоугольники (плоский случай) произвольной формы [12]. Как правило, на плоскости используют треугольные ячейки, в пространстве — тетраэдры. Использовать более сложные конструкции неструктурированных сеток чаще всего нет необходимости. По заданным точкам можно провести триангуляцию различными способами. Отметим также, что при любом способе триангуляции для данного

набора узлов мы получим одно и тоже число треугольников. Встает проблема оптимизации триангуляции по каким-то критериям. Основной критерий оптимизации состоит в том, чтобы полученные треугольники, с одной стороны, были близки к равносторонним (не должно быть слишком острых углов). Это локальный критерий, который относится к одному треугольнику. Второй (глобальный) критерий состоит в том, чтобы соседние треугольники не слишком сильно разнились по площади — критерий равномерности сетки. Имеется специальная триангуляция — триангуляция Делоне, которая обладает рядом оптимальных свойств. Одно из них заключается в стремлении полученных треугольников к равноугольным. Более точно отмеченное свойство формулируется следующим образом: при триангуляции Делоне максимизируется минимальное значение внутренних углов треугольников. Более полное обсуждение свойств триангуляции Делоне и связанных проблем можно найти в специальной литературе. Формальное определение триангуляции Делоне связывается со свойством, что для каждого треугольника все другие узлы лежат вне описанной окружности. Для нашего дальнейшего изложения очень важна связь триангуляции Делоне с диаграммой (разбиением) Вороного. Многоугольником Вороного для отдельного узла будет множество точек, которые лежат ближе к этому узлу, чем ко всем другим.

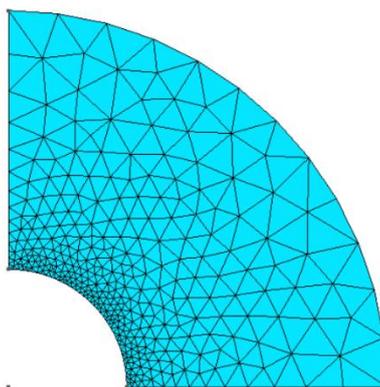


Рисунок 48 – Неструктурированная расчетная сетка

Для двух точек множества определяются полуплоскостью, которая ограничена перпендикуляром к середине отрезка соединяющего эти две точки.

Поэтому многоугольником Вороного будет пересечение таких полуплоскостей для всех пар узлов.

Рассмотренные сетки имеют преимущества и недостатки. Для расчетов теплообменного аппарата рассмотрен вопрос о выборе структурированной или неструктурированной сеток должен решаться комплексно: учетом затрат на время построения и точность расчетных данных. Сравнение структурированной и неструктурированной сеток проведено при верификации расчетной модели.

4.2.2. Обоснование выбора физической модели расчета

Турбулентность явление, заключающееся в том, что при увеличении скорости течения жидкости или газа в среде самопроизвольно образуются многочисленные нелинейные фрактальные волны и обычные, линейные различных размеров, без наличия внешних, случайных, возмущающих среду сил и/или при их присутствии [99]. Это сложный трехмерный процесс, характеризующийся неустойчивостью, который зависящий от множества факторов. Турбулентность может оказать значительное влияние на характеристики потока. Данный процесс возникает, когда силы инерции в жидкости становится значительнее по сравнению с вязкими силами, и характеризуется большими числами Рейнольдса. Чтобы учесть влияние турбулентных вихрей, большое внимание должно быть сосредоточено на численных методах, которые используют модели турбулентности. В настоящий момент создано большое количество разнообразных моделей для расчёта турбулентных течений. Модели турбулентности специально разработаны для учета влияния турбулентности, без использования к чрезмерно тонкой сетки и прямого численного моделирования. Большинство моделей турбулентности являются статистическими. Они отличаются друг от друга сложностью решения и точностью описания течения [13].

В настоящее время существуют несколько методов решения трехмерных уравнений Эйлера и Навье-Стокса. В основе ряда моделей лежит идея, которая сводится к предположению о существовании средней скорости потока и

среднего отклонения от него. Упрощения уравнений Навье -Стокса, помимо неизвестных средних скоростей приводят к появлению произведения средних отклонений. В соответствии с моделью их моделирование осуществляется по-разному. Перечисленные ниже модели применяются в различных инженерных расчётах в зависимости от необходимой точности [51]. Практически все они реализованы в современных программах расчёта гидродинамических течений, таких как Autodesk Simulation CFD, Fluent, CFX или OpenFOAM. Рассмотрим основные численные методы, применяемые при расчетах.

Прямое численное моделирование (DNS, direct numerical simulation). В настоящее время для описания турбулентных течений используют в основном методы, базирующиеся на решении уравнений Навье – Стокса [102]. Прямое численное моделирование представляет собой решение полных нестационарных уравнений Навье – Стокса и уравнения неразрывности [99]. В рамках этого подхода численно решаются системы алгебраических уравнений, с высокой точностью аппроксимирующие исходную систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса (систему уравнений для вязкой жидкости или газа, задающую балансные соотношения для импульса и массы в каждой точке расчетной области). DNS требует детального пространственно-временного разрешения и, следовательно, ведет к большим вычислительным затратам. Практическая значимость DNS заключается в получении статистических данных, которые можно использовать для тестирования и калибровки моделей, базирующихся на осредненных уравнениях Рейнольдса.

Уравнения Навье-Стокса описывают как ламинарные и турбулентные потоки без необходимости получения дополнительной информации. Однако, турбулентные потоки при реальных числах Рейнольдса охватывают широкий спектр размеров турбулентных вихрей и времени их существования, и, как правило, связаны с размером вихря намного меньшим, чем наименьший конечный объем сеток, которые могут быть использованы практически в численном анализе. Прямое численное моделирование (DNS) этих потоков потребует

вычислительной мощности, которая на много порядков выше, чем доступно в обозримом будущем.

Поэтому DNS редко применяется в практических задачах и чаще всего служит инструментом для получения больших массивов данных о турбулентных потоках простой структуры [102].

Метод крупных вихрей (LES, large eddy simulation). Впервые этот подход был использован в 1970 году Дирдорфом (Deardorff, 1970) для моделирования турбулентного течения в канале, а затем для моделирования атмосферного пограничного слоя (Deardorff, 1973). Основой вихреразрешающего моделирования турбулентных потоков с очень большими числами Рейнольдса является подтверждаемая экспериментально гипотеза о независимости статистических характеристик крупномасштабных турбулентных движений от молекулярной вязкости. Согласно этому предположению, возможно построение численной модели, описывающей нестационарную динамику только относительно крупных вихрей (вихрей, вносящих основной вклад в энергию турбулентного потока и определяющих взаимодействие турбулентности со средним движением). При этом вычислительные затраты необходимые для реализации такой модели не должны зависеть от числа Рейнольдса, поскольку нет необходимости явно и точно рассчитывать все мелкие вихри [102]. Обоснованием вихреразрешающего имитационного моделирования является разделение между большими и малыми размерами вихрей.

Основные уравнения для LES получаются путем фильтрации нестационарных уравнений Навье-Стокса в физическом пространстве. Процесс фильтрации эффективно отделяет вихри, размеры которых меньше чем ширина фильтра или шаг сетки, используемой в расчетах. Полученные уравнения, таким образом, регулируют динамику крупных вихрей.

Опыт показал, что применение модели LES в пограничном слое при больших числах Re является слишком упрощенной, и, следовательно, бесполезной для многих промышленных моделирований потока. С другой стороны, турбулентные структуры могут быть рассмотрены в широком диапазоне, разделенных

регионах, где крупные турбулентные вихри сопоставимы по размерам с геометрическими структурами, которые их генерируют (аэродинамических клапанов, зданий, тупых задних кромок на лопатках турбины). Модель DES это попытка объединить элементы RANS и LES формулировки для того, чтобы прийти к комбинированной постановке, где RANS используется внутри прилегающих и слегка разделенных пограничных слоев. Модель LES применяется для расчета крупных вихрей, удаленных друг от друга. Такой подход дает много преимуществ, разумеется, не без проблем, так как модель должна автоматически определить различные регионы, где применять ту или иную модель. Модели DES требуют детального понимания способа и требованиям сеток.

Решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS). В данном случае модель воспроизводит только средние значения скорости (и, при необходимости, скалярных величин, например, температуры и влажности воздуха), а влияние всех флуктуаций учитывается при помощи турбулентных замыканий. Под осреднением в RANS понимается осреднение по ансамблю состояний. В силу предполагаемой эргодичности и в случае наличия статистически однородных направлений модели RANS могут быть не только трехмерными, но и двумерными и одномерными. Последние, как правило, используются в качестве блоков, параметризующих турбулентность в геофизических пограничных слоях в глобальных, региональных и мезомасштабных моделях атмосферы и океана. Если турбулентность происходит на фоне какого-либо медленного процесса, то возможно построение нестационарной модели RANS (unsteady RANS – URANS) [5].

Численный метод RANS включает в себя несколько моделей турбулентности: k - ϵ , k - ω , SST модель Ментера.

1. Модель k - ϵ . Для описания турбулентных величин в ней используется система двух нелинейных диффузионных уравнений - для массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ . Простейший вариант данной модели появился более тридцати лет тому назад. С

тех пор k - ϵ модель широко применялась для расчетов большого круга задач, в основном, для описания сдвиговой несжимаемой турбулентности [59].

Не смотря на то, что возможности k - ϵ модели для описания сложных турбулентных течений ограничены, ввиду простоты этой модели, желательно иметь ее вариант, который бы обеспечил приемлемое описание достаточно широкого круга течений.

2. Модель k - ω . Похожа на предыдущую, вместо уравнения диссипации решается уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии.

3. SST модель Ментера [18,19] является некой комбинированной моделью турбулентности, основанной на использовании k - ω модели в пристеночных областях и k - ϵ модели в областях, находящихся на достаточном удалении от стенки. Этот комбинированный метод заключается в преобразовании уравнений k - ϵ модели к k - ω формулировке.

Модели турбулентности, используемые в инженерных расчетах, обычно базируются на решении осредненных уравнений Рейнольдса (RANS) [104].

Рассматривая временной масштаб намного большим, чем время протекания процесса турбулентных флуктуаций, то турбулентный поток, можно сказать, обладает средними характеристиками, с дополнительным временными вариационными, изменяющегося компонента. Например, компонент скорости может быть разделен на средний и временной вариационный компонент.

В целом, модели турбулентности направлены на изменение исходных нестационарных уравнений Навье-Стокса путем введения усредненных и флуктуационных величин для получения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) уравнения. Эти уравнения представляют собой количество среднего потока только при моделировании турбулентности.

В рассматриваемом случае применение стандартной моделей турбулентности (k - ϵ) не корректно, поскольку, в конечном счете, процессы теплопередачи у стенки напрямую зависят от возможностей выбранной модели, а данный тип физической модели хорошо описывает процессы в развитом течении. С другой стороны, применение k - ω модели также не является верным решением, т.к. на

ряду с пристеночным слоем необходимо учитывать развитое турбулентное течение, которое, безусловно, присутствует в данной задаче. Наиболее подходящей является модель SST модель Ментера.

4.3. Верификация метода трёхмерного численного расчета

4.3.1 Построение расчетной сетки для 3D-моделей исследуемого объекта.

Расчетная сетка строится для сектора экспериментального объекта – одной секции (конверта). Расчетная модель представляет собой три геометрических модели, для которых отдельно строятся сетки:

- сетка для металла;
- сетка для горячего теплоносителя;
- сетка для холодного теплоносителя.

Параметры расчетных сеток приведены ниже.

В данном разделе проведено сравнение тетра-сетки и гекса-сетки. Для построения сетки использовался сетко-построитель ICEM CFD.

Металл

Модель металла представляется собой сектор (конверт), выделенный из массива конвертов теплообменника (рисунок 49).

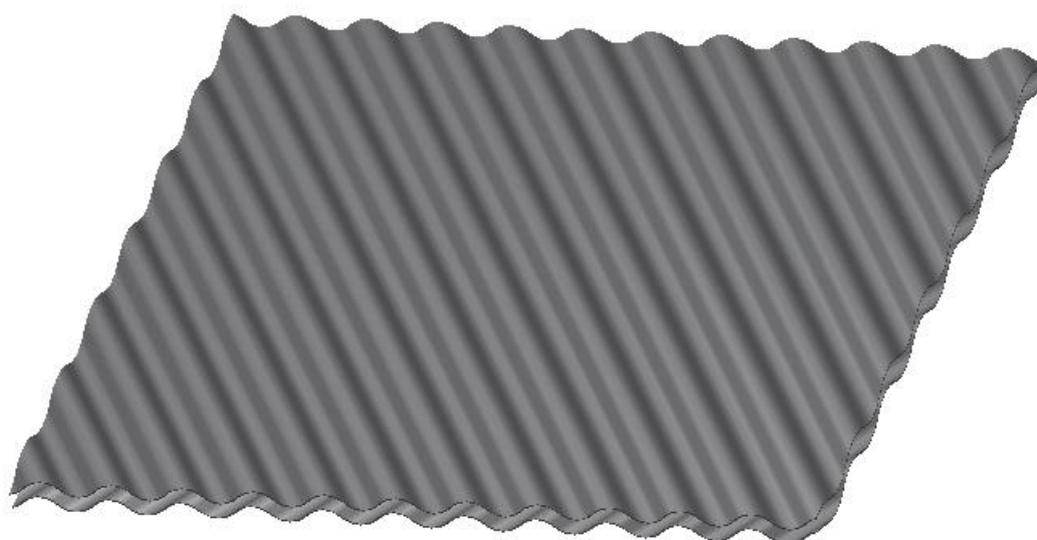


Рисунок 49 – Геометрическая модель теплообменника – конверт

В процессе построения в модели выделяются несколько поверхностей, которые определяют соответствующие процессы, происходящие на той или иной поверхности. Таким образом, в модели металла выделяются поверхности, соприкасающиеся с холодным и горячим теплоносителем, поверхности, не участвующие в процессе теплообмена, а также в отдельную часть выделяются кривые и точки модели. Далее строится расчетная сетка, для металла, ее фрагмент представлен на рисунке 50.

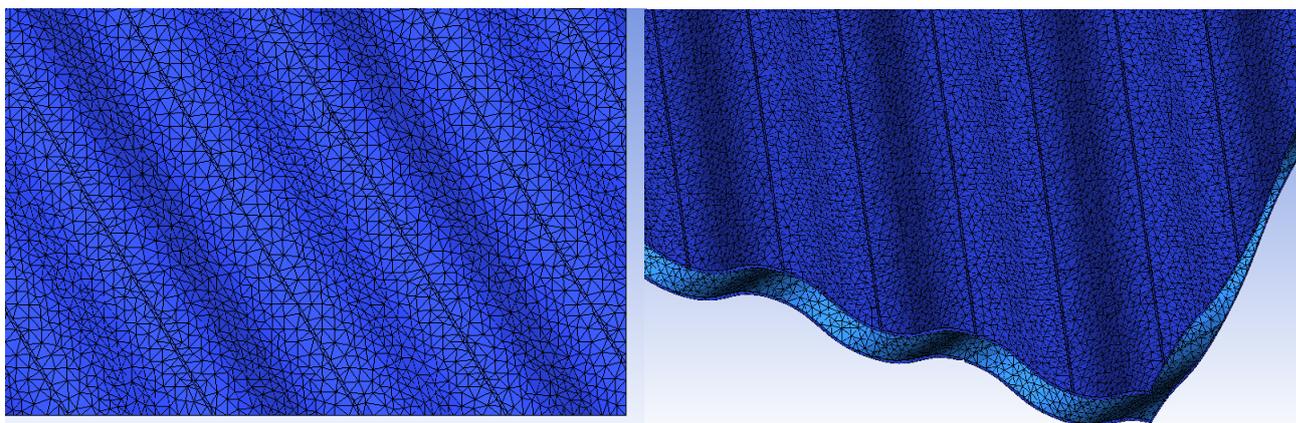


Рисунок 50 – Вид расчетной сетки для металла

Для получения качественной сетки после построения проводится сглаживание и проверка сетки на дефекты ячеек, а также разрывы. Качество сетки в данном случае отображено на рисунке 51. Главным требованием, предъявляемым к расчетной сетке, является минимальное содержание ячеек с качеством меньше 0,1.

Общее количество элементов в расчетной сетке составляет 3349708. Следует отметить, что расчетная сетка строится для полноразмерной модели конверта.

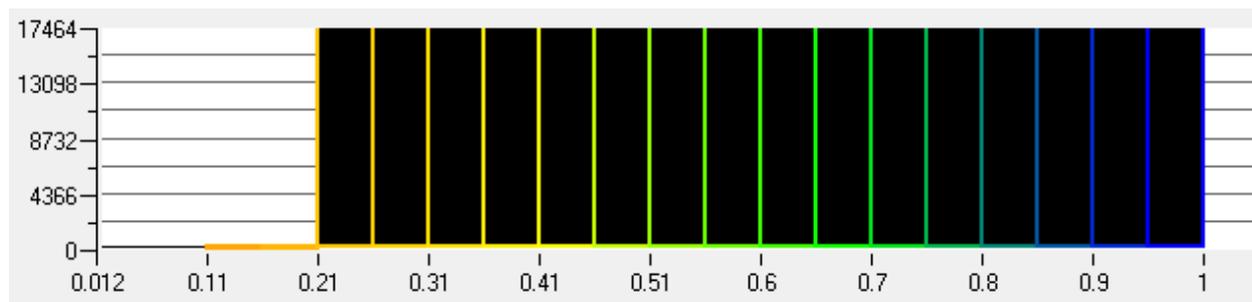


Рисунок 51 – Диаграмма качества расчетной сетки металла

Минимальный размер ячеек: 0,0952637 мм, Максимальный размер ячеек: 0,999902 мм.

Как видно из диаграммы, в рассматриваемой ситуации содержание ячеек с низким качеством составляет меньше одного процента, из этого можно сделать вывод, что сетка удовлетворяет требованиям по качеству.

Горячий теплоноситель

Модель для горячего теплоносителя представляет собой твердотельную модель, полученную вычитанием не относящихся к горячему теплоносителю элементов (рисунке 52).

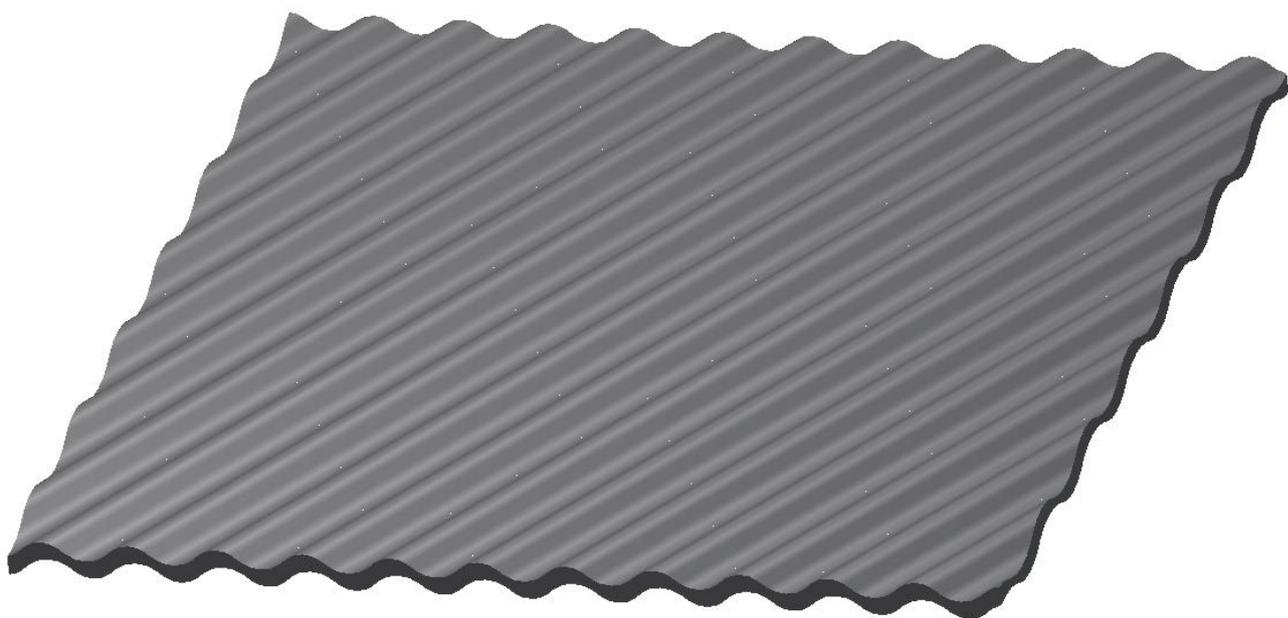


Рисунок 52 – Геометрическая модель горячего теплоносителя

Аналогично этапам построения сетки для металла, модель горячего теплоносителя разбивается на части по поверхностям. После разбиения выделяются четыре части: вход, выход теплоносителя, поверхность соприкосновения металла с горячим теплоносителем и поверхность, на которую накладывается зависимость периодичности. Далее происходит расчет сетки, получившийся результат представлен на рисунке 53.

Общее количество элементов в расчетной сетке составляет 7362993. Минимальный размер ячеек: $6,4 \cdot 10^{-7}$ мм, Максимальный размер ячеек: 0,999998 мм. Качество ячеек приведено в диаграмме (рисунок 54).

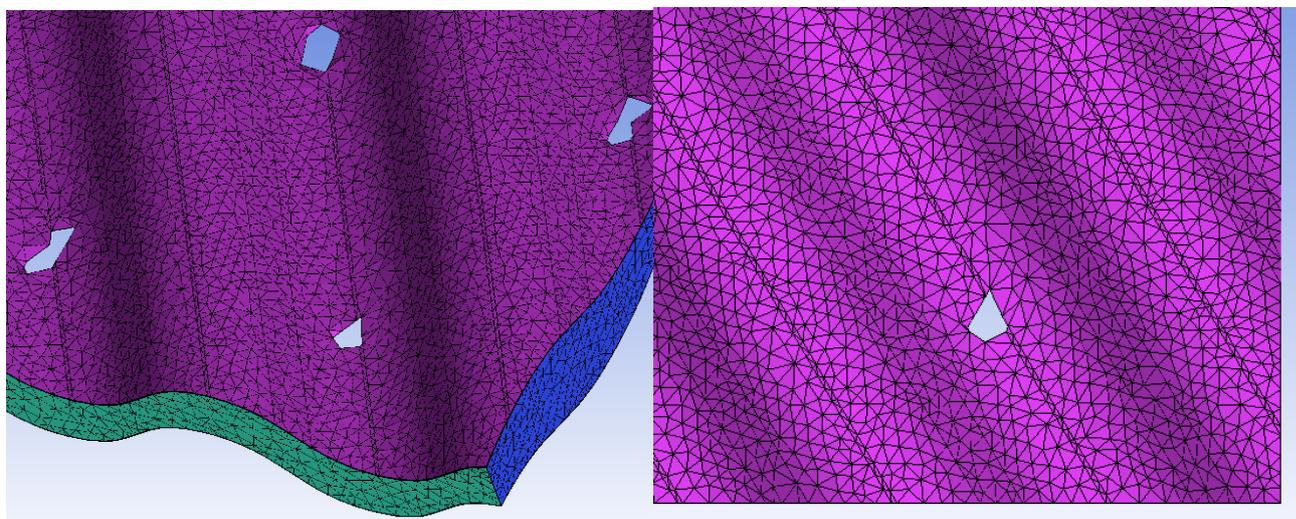


Рисунок 53 – Вид расчетной сетки для горячего теплоносителя

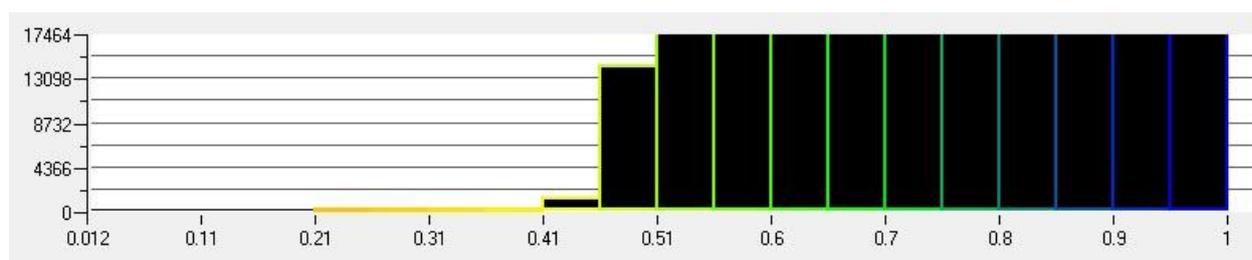


Рисунок 54 – Диаграмма качества расчетной сетки горячего теплоносителя

Как видно из таблицы, в рассматриваемой ситуации содержание ячеек с низким качеством составляет меньше одного процента, из этого можно сделать вывод, что также, как и для металла, сетка для горячего теплоносителя удовлетворяет требованиям по качеству.

Холодный теплоноситель

Холодный теплоноситель также представляет собой твердотельную модель, полученную вычитанием не относящихся к холодному теплоносителю элементов (рисунок 55). Данная модель включает в себя два хода теплообменного аппарата. Соединение ходов осуществляется поворотным каналом.

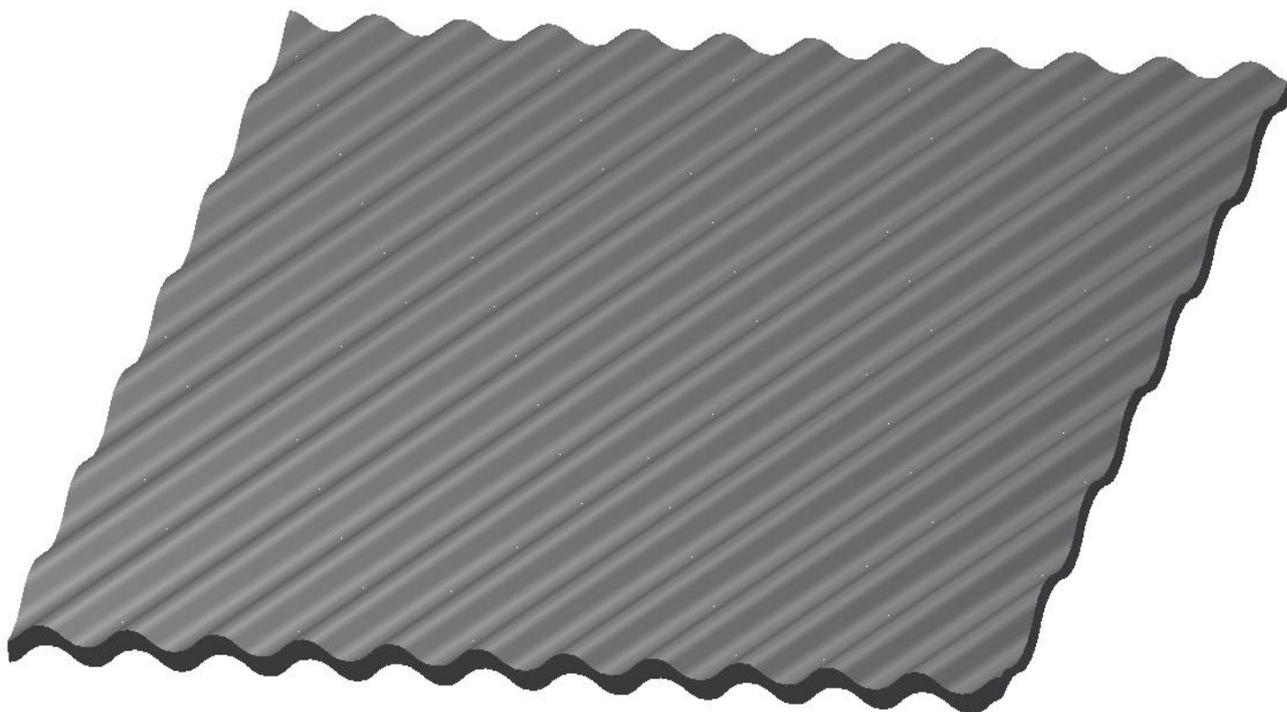


Рисунок 55 – Геометрическая модель холодного теплоносителя

Аналогично этапам построения сетки для металла и модели горячего теплоносителя холодный теплоноситель разбивается на пять частей: вход, выход теплоносителя, поверхность соприкосновения металла с холодным теплоносителем и адиабатическая часть. Далее происходит расчет сетки, получившийся результат представлен на рисунке 56.

Общее количество элементов в расчетной сетке составляет 8680542. Минимальный размер ячеек: 0,208095мм. Максимальный размер ячеек: 0,999999 мм.

Качество ячеек приведено в диаграмме (Рисунок 57).

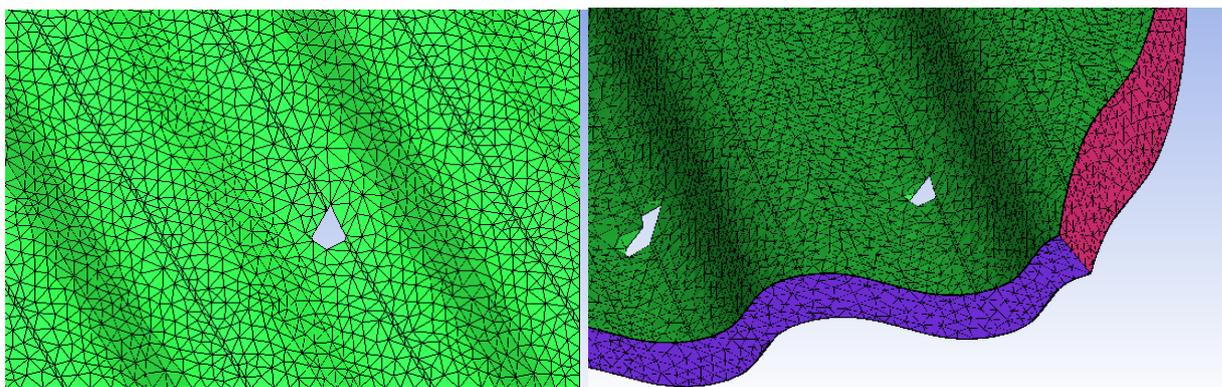


Рисунок 56 – Вид расчетных ячеек сетки для холодного теплоносителя

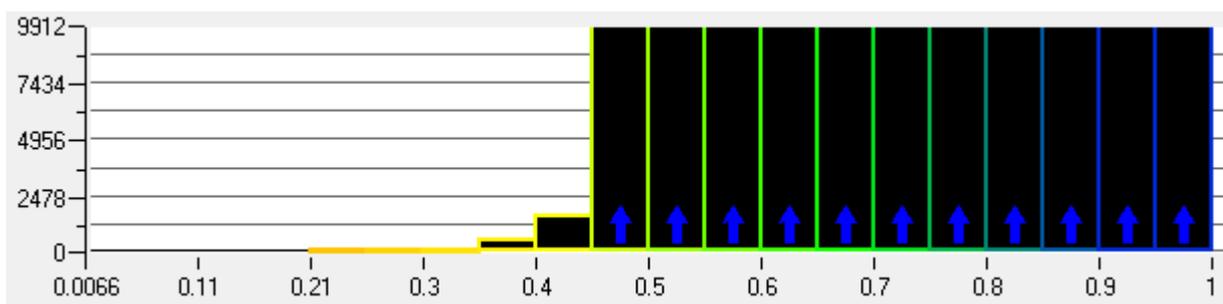


Рисунок 57 – Диаграмма качества расчетной сетки холодного теплоносителя

Анализ данных для расчетной сетки холодного теплоносителя показал, что содержание ячеек с низким качеством составляет меньше одного процента, из этого можно сделать вывод, что также как и для металла и для горячего теплоносителя сетка для модели холодного теплоносителя удовлетворяет требованиям по качеству.

4.3.2 Экспериментальное исследование и верификация метода трёхмерного численного расчета

Верификация данных производилась по эксперименту, проведенному в работе [103]. На рисунках представлены результаты верификации. Расчетные и экспериментальные данные сравнивались при одинаковых условиях, в итоге получились две зависимости: зависимость температуры на выходе из горячего и холодного контуров от расхода G и абсолютных потерь $P_{абс}$ от расхода G .

На рисунке 61 показаны основные размеры гофра.

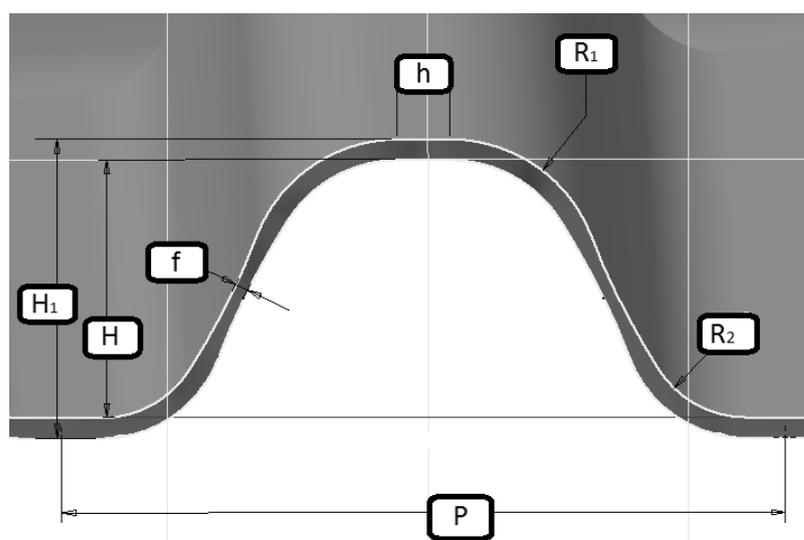


Рисунок 58 - Основные геометрические параметры гофра

Данный эксперимент проведен с использованием аэродинамической трубы открытого типа, состоящей из входной секции с вентилятором и нагревательными элементами, отстойных камер с фильтрами, спрямляющего аппарата, имеющего сотовую конструкцию, измерительную секцию и рабочую, где расположены пластины. Вентилятор подает поток воздуха, соответствующий числам Рейнольдса от 500 до 10^4 , нагревательные элементы имеют диапазон нагрева воздуха между 25 и 60°C . Для измерений использовались манометр, цифровой вольтметр, теплоконтроллер, контролирующий температуру в водяной ванне. Схема установки представлена на рисунке 59.

В данной работе в эксперименте выбран термохромный жидкокристаллический метод. Термохромные жидкие кристаллы изменяют падающий белый свет и отображают цвета, чьи длины волн являются функцией от температуры. При данном методе, кристаллы могут быть нанесены на поверхность или распылены в потоке, они используются для визуализации температурного поля. Существует несколько видов кристаллов, однако все виды также различаются по отображаемым диапазонам температур: $30-115^\circ\text{C}$ и $0,5-20^\circ\text{C}$.

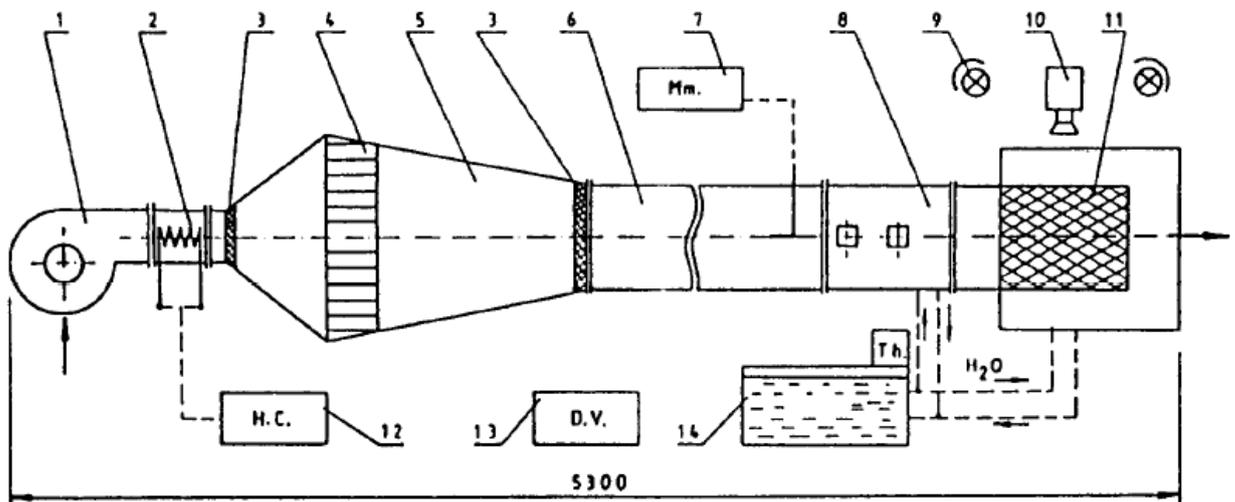


Рисунок 59 - Схема испытательной установки

- 1- вентилятор; 2- нагревательный элемент; 3- фильтр; 4- спрямляющий аппарат сотовой конструкции; 5- большая спрямляющая камера; 6- спрямляющий участок; 7-микроманометр; 8- измерительная секция; 9- вольфрамовая лампа; 10- регистрирующая камера; 11- рабочая секция; 12- теплоконтроллер; 13- цифровой вольтметр; 14 – водяная ванна.**

Для верификации на основе данных из эксперимента выбран угол скрещивания гофр равный 60° с параметрами гофра, представленными в таблице 6.

Таблица 6 - Геометрические параметры гофра экспериментальной пластины.

Н, мм	Н1, мм	Р, мм	dg	Р/Н1	Р/Н
8,75	8,00	32,00	13,84	4,00	3,66

Для обработки результатов использовались следующие формулы:

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot d_r \cdot \rho}{\nu} \quad (20)$$

где ν – динамическая вязкость теплоносителя;

d_r - гидравлический диаметр;

V - средняя скорость потока;

ρ – средняя плотность.

Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_r}{\lambda} \quad (21)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

λ - коэффициент теплопроводности среды;

Коэффициент потерь [49]:

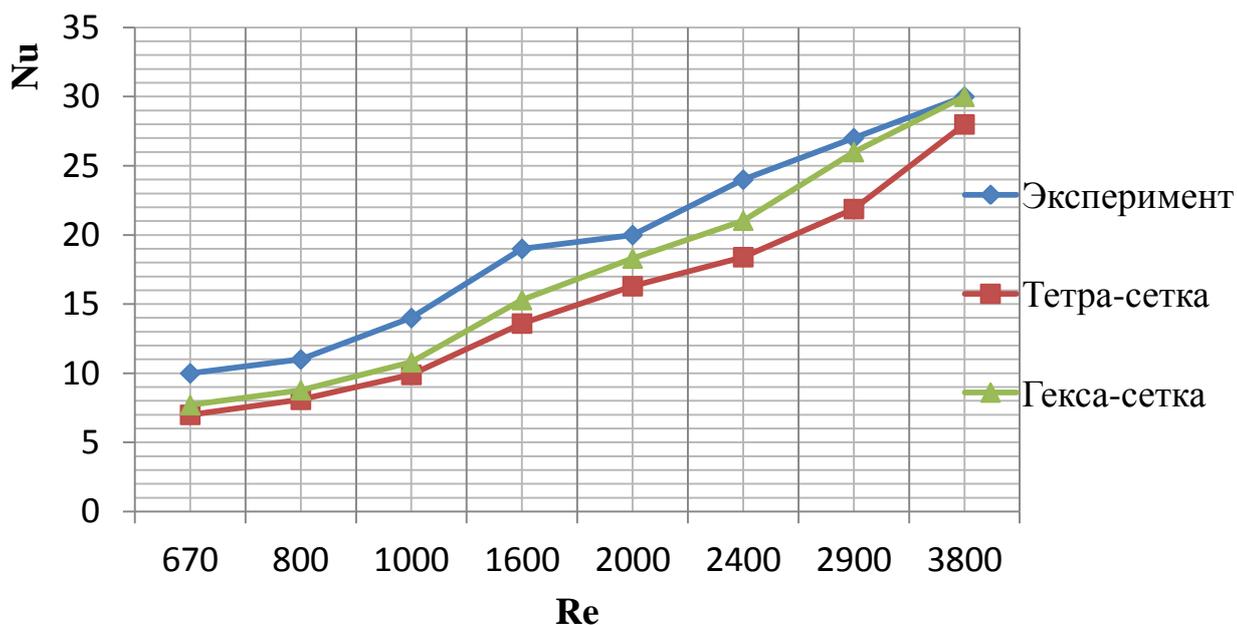
$$f = \frac{\Delta P \cdot d_r}{2 \cdot \rho \cdot \Delta a \cdot V^2} \quad (22)$$

где ΔP - абсолютные потери давления;

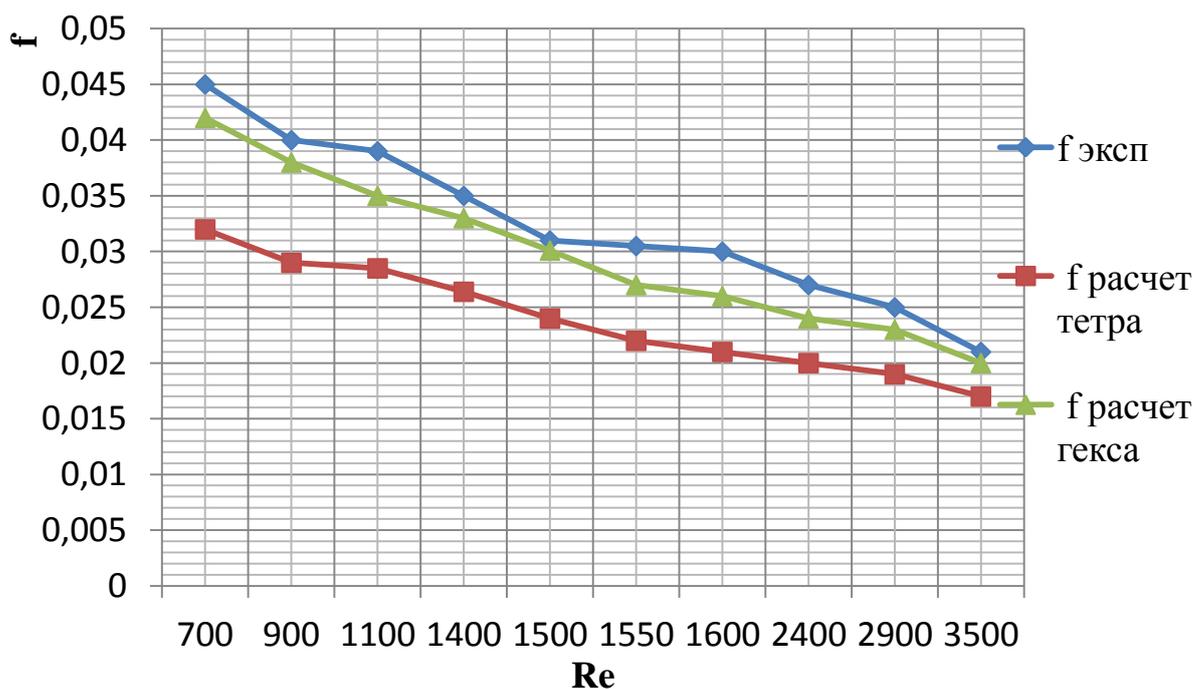
Δa - длина единичной ячейки.

При верификации рассматривались два вида сеток: тетра-сетка и гекса-сетка. Результаты верификации представлены на рисунке 60. В первом случае (тетра-сетки) пограничный слой не строился. Во втором случае пограничный слой построен, высота первого пристеночного элемента составляла 0,05 мм.

Результаты численного моделирования показали хорошую сходимость с экспериментальными данными, особенно при числах Рейнольдса выше 2000. В случае гекса-сетки при $Re = 2700$ и выше произошло максимальное сближение расчетной и экспериментальных кривых 1%.



а)



б)

Рисунок 60 - Верификация расчетных и экспериментальных данных

а) Зависимость $Nu(Re)$ при угле скрещивания гофров 60° .

б) Зависимость $f(Re)$ при угле скрещивания гофров 60° .

Расхождение экспериментальных и расчетных данных при числах Рейнольдса меньше 2000 составляет ~20% у гекса-сетки и 25-27% для тетра-сетки.

При более высоких числах Рейнольдса сходимость расчетных и экспериментальных данных растет: у гекса-сетки — 1-8% и 9-15 % для тетра-сетки.

Рассматривая график зависимости потерь коэффициента потерь давления от числа Рейнольдса, также можно заметить хорошую сходимость результатов. Здесь также расчетная гекса-сетка имеет более высокую сходимость не ниже 88%, тетра-сетка имеет сходимость 73-80%.

Из этого можно сделать вывод, что обе сетки дают удовлетворительные результаты по расчетам. Однако, построение гекса-сетки представляет собой трудоемкий процесс, отнимающий много времени. Не смотря на менее точные результаты, полученные при расчете с тетра-сеткой, с учетом затраченного времени целесообразно использовать именно этот вариант построения сетки. В реальных условиях, расчет ТА для ГТД сложного цикла проводится при числах Рейнольдса ≈ 1600 и выше. Расчет с использованием тетра-сетки позволяет получить расчетные данные с погрешностью не более 10-20 % при таких числах Re и занимает меньше времени в несколько раз, поэтому данный вид сетки выбран как наиболее целесообразный вариант.

4.4. Программа оценочного аналитического расчета

Использование методики трехмерного расчета целесообразно для уточненного расчета. Рассматривая ситуацию, когда необходимо провести подбор размеров теплообменного аппарата для имеющейся конструкции данный тип расчета не подходит, так как расчет различных типоразмеров займет большое количество времени. В связи с этим, возникает задача создания программы оценочного расчета, позволяющего сузить круг типоразмеров и проводить уточненный расчет для меньшего количества вариантов теплообменных аппаратов.

Определим основные требования к алгоритму программы оценочного расчета.

1. К задаваемым параметрам должны относиться геометрические размеры пластины. Данное требование обусловлено тем, что для проектирования авиационных двигателей с регенерацией тепла определяющим фактором являются вес и габариты. Также при создании двигателя с регенерацией тепла целесообразно использовать уже имеющиеся конструкции с дополнительным оснащением их теплообменным аппаратом

2. В результате расчета должны быть выходные средние температуры по теплоносителям, потери давления и КПД, вес теплообменной секции.

Учитывая данные требования, проведено трехмерное расчетное исследование. Основной целью исследования является получение критериальных зависимостей $Nu(Re)$ и коэффициента потерь $\xi(Re)$. Поскольку на критериальные зависимости влияет величина гидравлического диаметра то, в процессе исследования рассмотрены несколько высот профиля пластины при варьировании входными и выходными параметрами (температурой и давлением) при различных углах скрещивания ($65, 80, 100, 120^\circ$) (рисунок 61). Размер исследуемой пластины составлял 100×100 мм, толщина металла 0,2 мм. На рисунках 62-67 приведены поля температур, давлений для холодного и горячего теплоносителей исследуемой пластины (высота профиля гофра пластины 1,6 мм, угол скрещивания 80°).

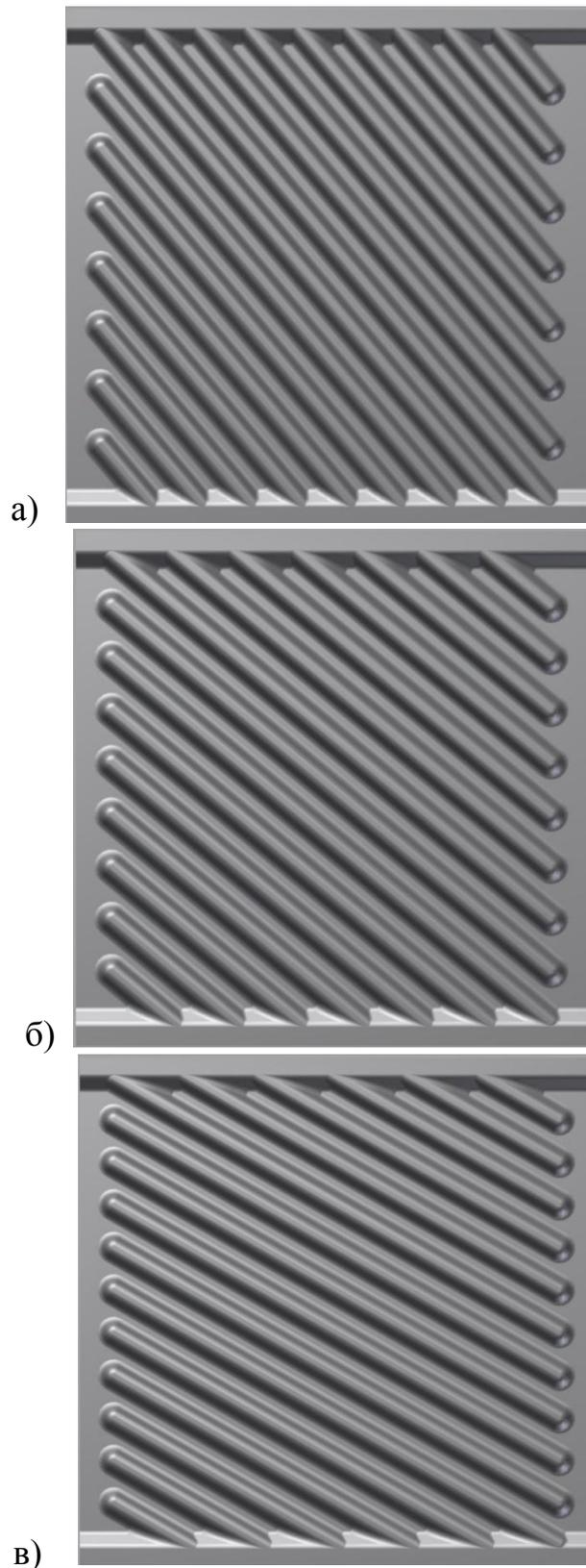


Рисунок 61 – Варианты исследуемых пластин

а) 80°, б) 100°, в) 120°

При подготовке расчета на входе задавались температура и расход теплоносителей, а на выходе среднее давление. Расход варьировался от 1 гр. до 5 гр. Расчет проводился в диапазоне температур от 400 К до 800 К и давлений до 3,2 атм.

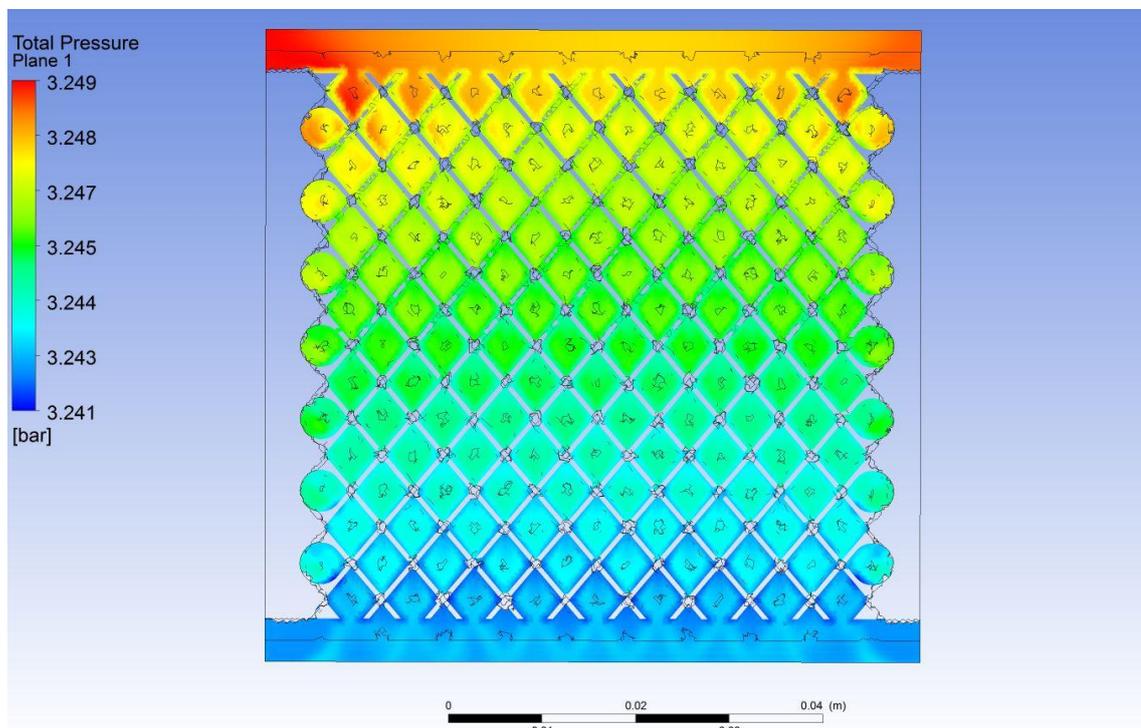


Рисунок 62 – Поле давлений для холодного теплоносителя

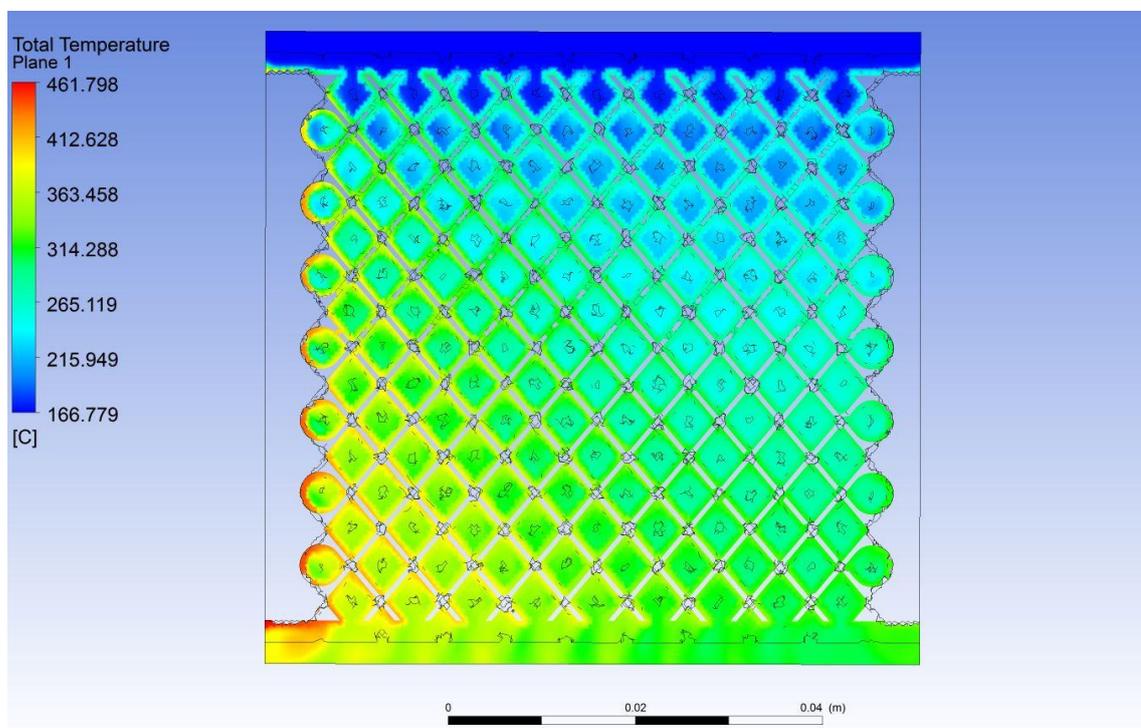


Рисунок 63 – Поле температур для холодного теплоносителя

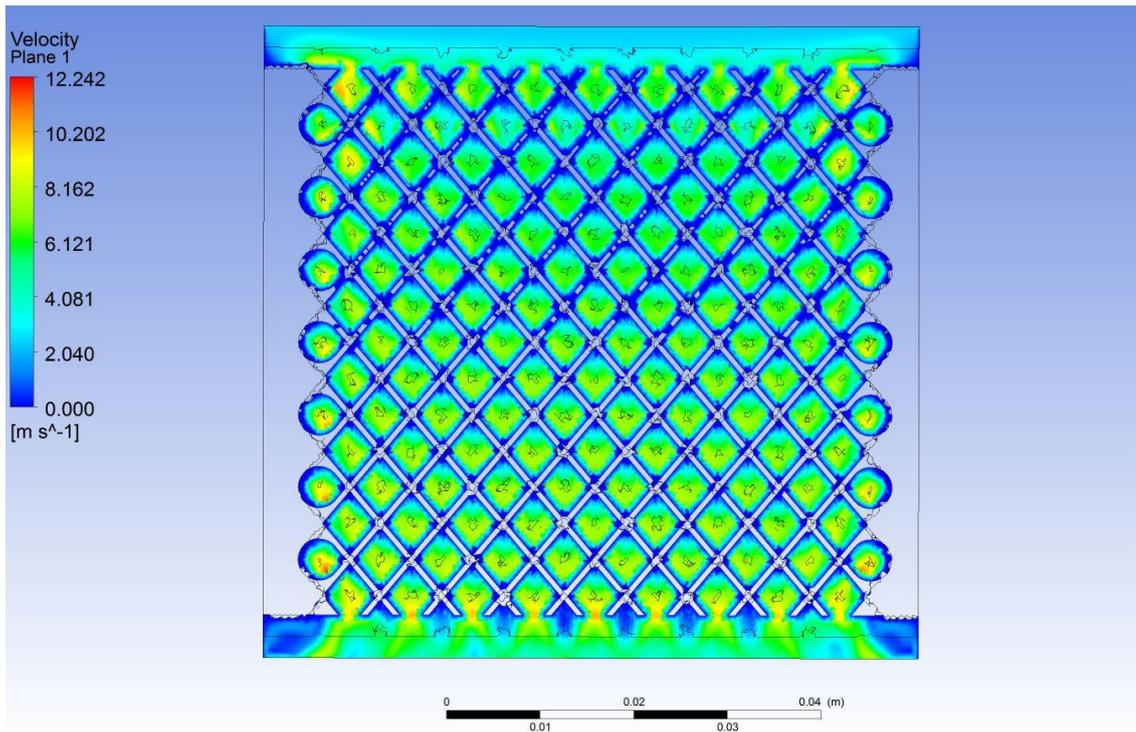


Рисунок 64 – Поле скоростей для холодного теплоносителя

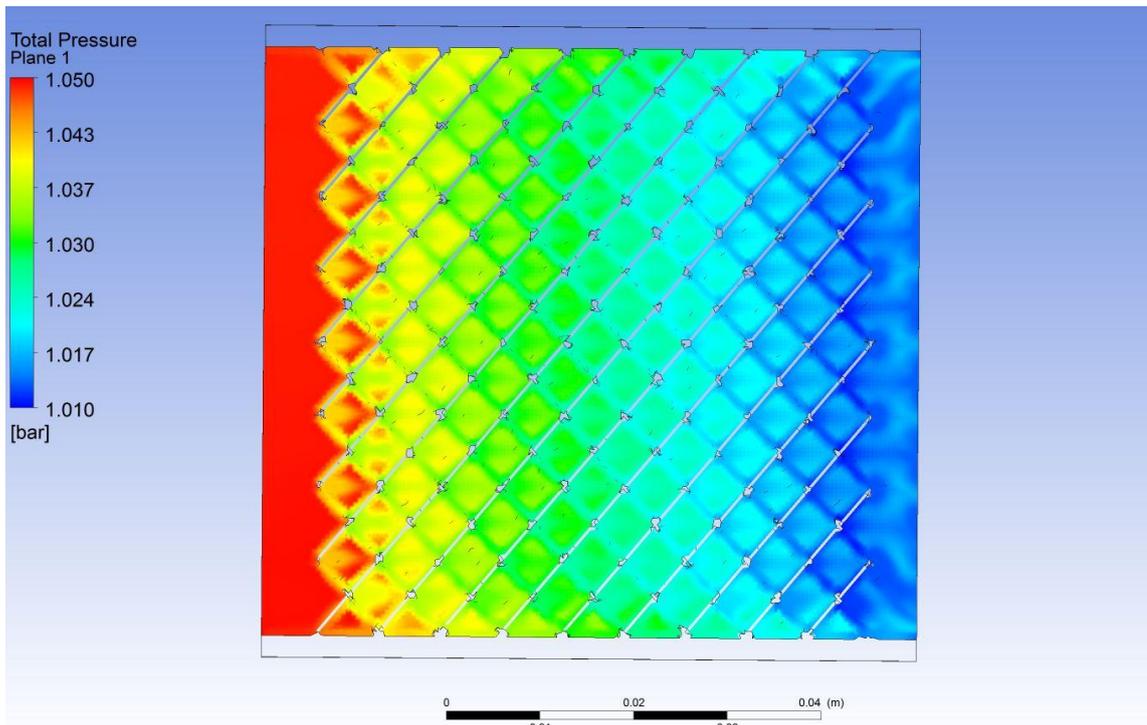


Рисунок 65 – Поле давлений для горячего теплоносителя

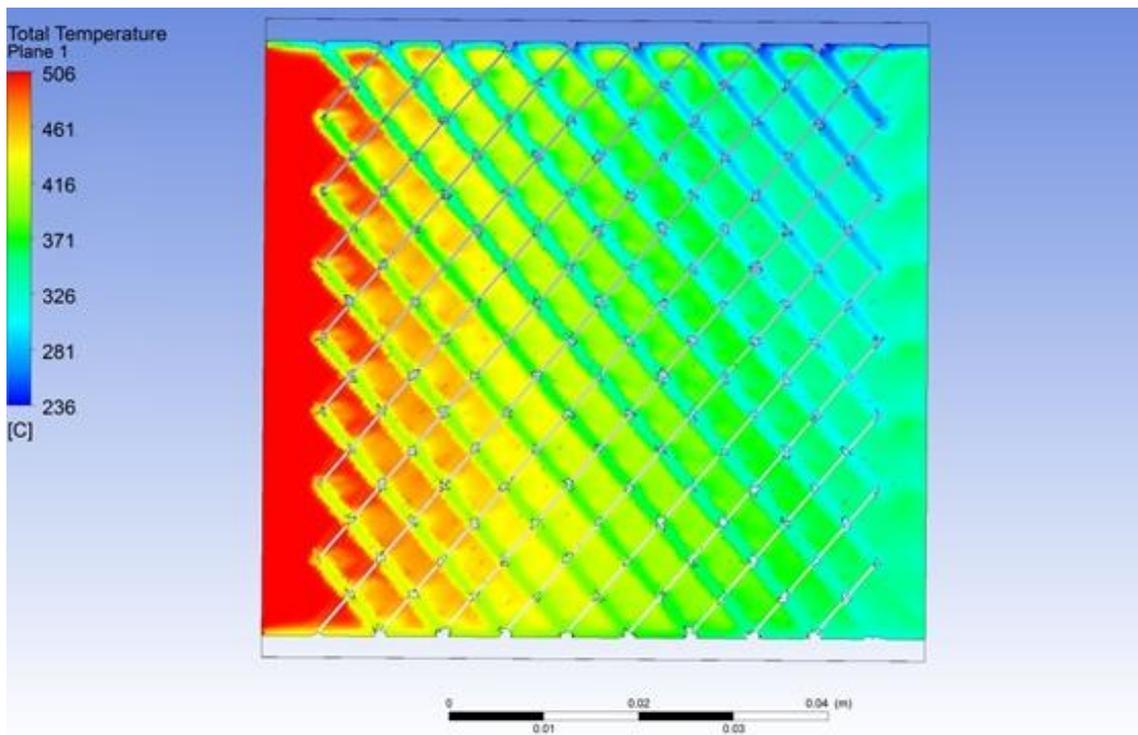


Рисунок 66 – Поле температур для горячего теплоносителя

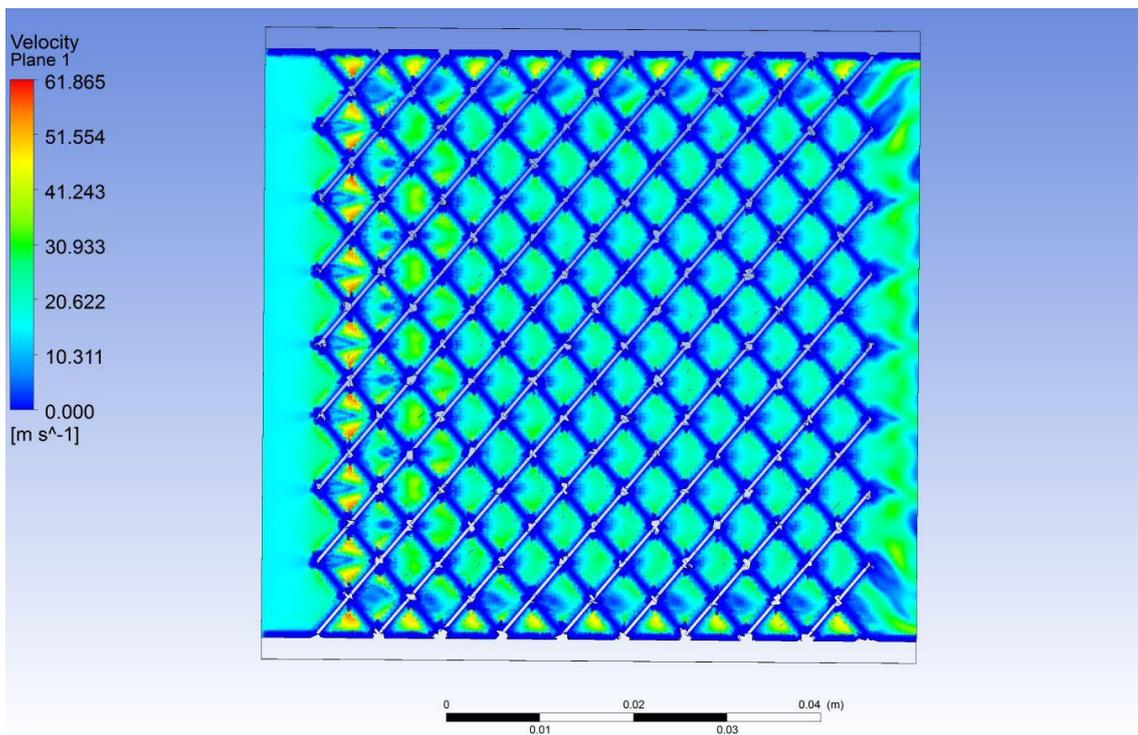
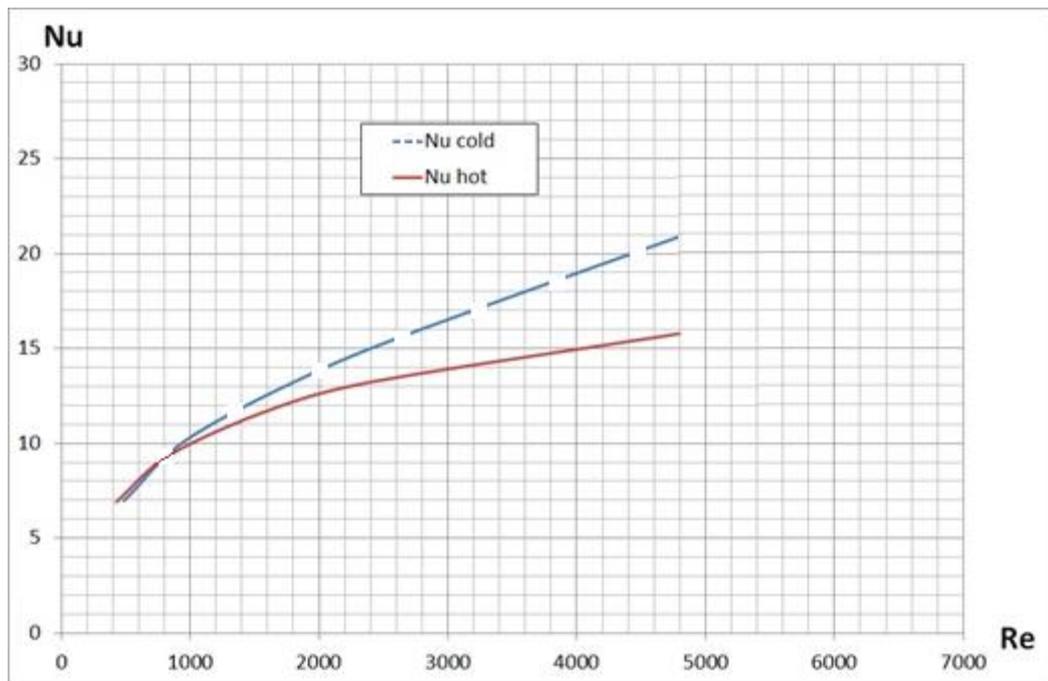


Рисунок 67 – Поле скоростей для горячего теплоносителя

По полученным расчетам были рассчитаны требуемые критериальные зависимости, показанные на рисунок 68.



а)

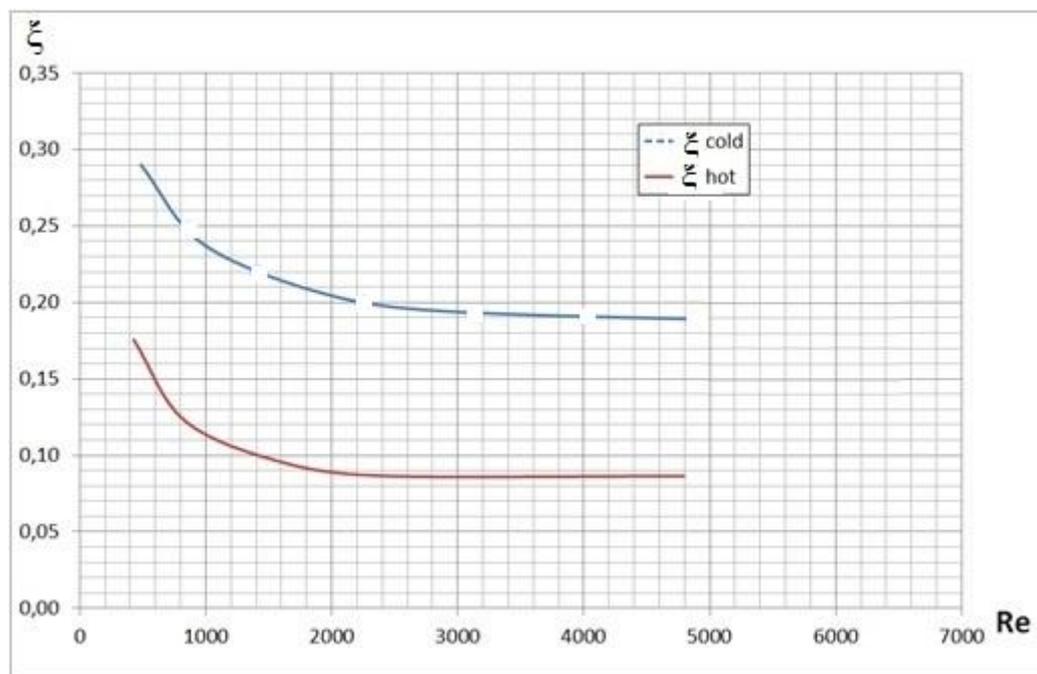


Рисунок 68 – Критериальные зависимости

а) Зависимость $Nu(Re)$ для угла скрещивания 100°

б) Зависимость $\xi(Re)$ для угла скрещивания 100°

Полученные критериальные зависимости легли в основу программы аналитического расчета. Алгоритм, который представлен ниже.

Таблица 7 - Задаваемые геометрические параметры

Геометрия конверта		
L, м – длина пластины.	B, м – ширина пластины.	H, м – высота конверта.

Таблица 8 - Задаваемые геометрические характеристики поверхности

Геометрические характеристики поверхности			
d_r , м – гидравлический диаметр.	$\eta_{гор.}$ – коэффициент, характеризующий отношение площади живого сечения к фактической площади сечения по горячей стороне.	$\eta_{хол.}$ – коэффициент, характеризующий отношение площади живого сечения к фактической площади сечения по холодной стороне.	k_v , 1/м – коэффициент, характеризующий отношение площади теплообмена (без учета высоты гофра, т.е. произведение длины и ширины пластины) к объему конверта.

Расчетные коэффициенты характеристик поверхности вычитываются исходя из трехмерной модели конверта и в рамках расчета для одной высоты профиля гофра пластины принимаются постоянными.

Таблица 9 - Задаваемые термодинамические характеристики

Термодинамические характеристики				
R, Дж/кгК – Универсальная газовая постоянная.	G_r , кг/с – расход горячего теплоносителя.	G_x , кг/с – расход холодного теплоносителя.	p_{r1} , Па – давление на входе в конверт горячего теплоносителя.	p_{x1} , Па – давление на входе в конверт горячего теплоносителя.
T_{r1} , К – температура на входе в конверт горячего теплоносителя.	T_{x1} , К – температура на входе в конверт горячего теплоносителя.	σ_0 – заданная степени регенерации. Определяет начальную точку расчета.		

Расчет основывается на итерационном подходе. Последовательность расчета:

1) Определение температуры на выходе из конверта.

$$T_{x2} = T_{r1} - \sigma_0 \cdot (T_{r1} - T_{x1})$$

$$T_{r2} = T_{x1} + \sigma_0 \cdot (T_{r1} - T_{x1})$$

2) Определение средней температуры теплоносителя.

$$T_{xcp} = 0,5 \cdot (T_{x1} + T_{x2}) \cdot 0,82$$

$$T_{rcp} = 0,5 \cdot (T_{r1} + T_{r2}) \cdot 0,82$$

где 0,82 – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность температуры. Данный коэффициент получен расчетно-опытным путем.

3) Определение средней плотности теплоносителя.

$$\rho_{xcp} = \frac{P_{x1}}{R \cdot T_{cp,x1}}$$

$$\rho_{rcp} = \frac{P_{r1}}{R \cdot T_{cp,r1}}$$

4) Определение площади живого сечения.

$$F_{жсхол} = L \cdot H \cdot \eta_{хол}$$

$$F_{жсгор} = L \cdot H \cdot \eta_{гор}$$

5) Определение средней скорости теплоносителя.

$$V_{срхол} = \frac{G_x}{\rho_{xcp} \cdot F_{жсхол}}$$

$$V_{сргор} = \frac{G_r}{\rho_{rcp} \cdot F_{жсгор}}$$

6) Определение динамической вязкости по эмпирической зависимости [23].

$$\nu_x = 5,0679 \cdot 10^{-6} + 5,006 \cdot 10^{-8} \cdot T_{xcp} - 1,262 \cdot 10^{-11} \cdot T_{xcp}^2$$

$$\nu_r = 5,0679 \cdot 10^{-6} + 5,006 \cdot 10^{-8} \cdot T_{rcp} - 1,262 \cdot 10^{-11} \cdot T_{rcp}^2$$

7) Определение теплопроводности по эмпирической зависимости [23].

$$\lambda_x = 2,23 \cdot 10^{-3} + 8,91 \cdot 10^{-5} \cdot T_{xcp} - 2,2857 \cdot 10^{-8} \cdot T_{xcp}^2$$

$$\lambda_r = 2,23 \cdot 10^{-3} + 8,91 \cdot 10^{-5} \cdot T_{rcp} - 2,2857 \cdot 10^{-8} \cdot T_{rcp}^2$$

9) Определение числа Рейнольдса.

$$Re_x = \frac{V_{срхол} \cdot d_{гх} \cdot \rho_{хср}}{\nu_x} \quad (30)$$
$$Re_\Gamma = \frac{V_{сргор} \cdot d_{гг} \cdot \rho_{гср}}{\nu_\Gamma}$$

Где $\nu_{\Gamma, x}$ - динамические вязкости для горячего и холодного теплоносителей.
 $d_{\Gamma\Gamma}, d_{гх}$ - гидравлический диаметр по горячей и холодной стороне соответственно.

10) Определение числа Нуссельта по критериальным зависимостям.

$$Nu_x = 4,838 - 1612,92 \cdot Re_x - 1,2 + 0,001258 \cdot Re_x^{0,9} \quad (31)$$
$$Nu_\Gamma = 9,659 - 10906,8 \cdot Re_\Gamma - 1,3 + 0,000731 \cdot Re_\Gamma^{1,1}$$

11) Определение коэффициента теплоотдачи.

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_{гх}} \quad (32)$$

$$\alpha_\Gamma = \frac{Nu_\Gamma \cdot \lambda_\Gamma}{d_{гг}}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_\Gamma}{\lambda} \quad (33)$$

12) Определение коэффициента теплопередачи.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\Gamma} + \frac{1}{\alpha_x}} \quad (34)$$

13) Определение площади теплообмена.

$$F_{Т0} = L \cdot B \cdot H \cdot k_v \quad (35)$$

14) Определение теплового потока через пластину.

$$Q = k \cdot (T_{гср} - T_{хср}) \cdot F_{Т0} \quad (36)$$

15) Определение степени регенерации.

$$\sigma = \frac{Q}{(T_{\Gamma 1} - T_{x1}) \cdot c_p \cdot G_{max}} \quad (37)$$

16) Определение коэффициента потерь давления для каждого из теплоносителей.

$$\xi_x = -0,2698 + 7,007 \cdot Re_x^{-0,5} + 0,05796 \cdot Re_x^{0,2} \quad (38)$$

$$\xi_{\Gamma} = -0,2773 + 7,852 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,6} + 0,135 \cdot Re_{\Gamma}^{0,1}$$

17) Определение относительных потерь давления.

$$\Delta p_x = \xi_x \cdot \left(\frac{\rho_{\text{хсп}} \cdot V_{\text{срхол}}^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{L}{d_{\text{ГХ}}} \right)$$

$$\Delta p_{\Gamma} = \xi_{\Gamma} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{Гср}} \cdot V_{\text{сргор}}^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{B}{d_{\text{ГГ}}} \right)$$
(39)

18) Определение относительных потерь давления.

$$\Delta P_{\%x} = \frac{\Delta p_x}{p_{x1}} \cdot 100\%$$

$$\Delta P_{\%Г} = \frac{\Delta p_{\Gamma}}{p_{Г1}} \cdot 100\%$$
(40)

18) Определение веса теплообменной секции.

$$m = 2 \cdot n_{\kappa} [\rho_m \cdot (L \cdot B \cdot H)]$$
(41)

Где n_{κ} – количество конвертов в теплообменнике; ρ_m – плотность материала пластины.

По результатам расчетов могут быть определены эффективность и суммарные потери давления в теплообменнике, выявлены его оптимальные массогабаритные показатели при заданных температурах и давлениях по обеим сторонам.

Малоразмерный ГТД сложного цикла

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

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

В конструкции данного ГТД жаровые трубы камеры сгорания и модули теплообменника интегрированы в единый узел [109]. Модуль, включающий теплообменный аппарат представлен на рисунке 69.

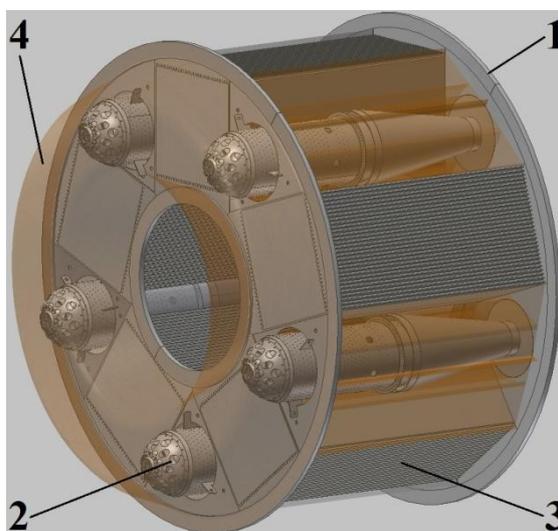


Рисунок 69 - Схема модуля камеры сгорания и теплообменника

1 – корпус, 2 – жаровая труба, 3 – блок теплообменника, 4 – раздаточный коллектор.

Модули теплообменника и жаровые трубы равномерно расположены по окружности, причем жаровые трубы размещены между модулями теплообменника. Такая компоновка обеспечивает дополнительный подогрев воздуха в теплообменнике (кроме подогрева воздуха горячими газами из-за свободной турбины), а кольцевые стойки включены в силовую схему двигателя, что обеспечивает хорошую механическую прочность и повышает экономичность ГТД. При проектировании к данному модулю предъявлялось множество требований, из которых основными были ограничения по габаритным размерам и потерям давления.

Благодаря использованию методики расчета, проектирования и изготовления удалось подобрать приемлемые размеры и удовлетворить требованиям по потерям давления и эффективности. Были рассмотрены две поверхности теплообмена: с непрерывными волнистыми гофрами и поверхность типа «набивка Френкеля».

Программой аналитического расчета проведена оценка габаритов пластин теплообменников с данными поверхностями. На этом этапе были определены габаритные размеры пластин при максимальном использовании пространства между жаровыми трубами и максимальной степени регенерации. Оценка показала, что поверхность с непрерывными волнистыми гофрами имеет более высокую степень регенерации, однако, вместе с тем и более высокие потери давления, по сравнению с поверхностью типа «набивка Френкеля». Было принято решение, продолжить исследование обеих конструкций пластин. На втором этапе были получены геометрические модели пластины, оснастки и теплоносителей. Далее проведен более глубокий анализ посредством метода трехмерного численного расчета и принято решение использовать геометрию пластины с поверхностью типа «набивка Френкеля». На следующем этапе геометрические 3D-модели оснастки были отправлены на производство.

Таким образом, реализация предложенной методики позволяет решить поставленные задачи для ГТД с регенерацией тепла при минимальных затратах времени и материальных затрат, а также создать модельный ряд высокоэффективных теплообменников различной размерности и назначения.

ВЫВОДЫ

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

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

3 Разработан метод трехмерного численного расчета параметров теплообменного аппарата, позволяющий провести, так называемый виртуальный эксперимент и оценить теплогидравлические параметры теплообменного аппарата. Данный метод позволяет визуализировать результаты расчета, таким образом, построить поля температур, давлений и скоростей теплоносителей.

4 Проведена верификация разработанного метода трехмерного численного расчета. В процессе исследования были рассмотрены структурированная и неструктурированная сетки. Основываясь на максимальном сокращении времени расчета предпочтение отдано неструктурированной сетке, поскольку при минимальных временных затратах возможно получить приемлемую сходимость результатов. Погрешность расчета составляет до 20...25%.

5 Выполнено расчетное исследование для получения критериальных зависимостей для разработки метода аналитического расчета. Данный метод является первоначальным этапом методики расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата и позволяет получить оценку геометрии пластины, а именно эффективность и потери давления.

6 Разработанная методика апробирована при разработке малоразмерного ГТД с регенерацией тепла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке методики проектирования, расчета и изготовления пластинчатого теплообменного аппарата для малоразмерных ГТД. 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 по эффективности при условии приемлемых потерь давления.

2 Проанализированы технологии изготовления теплообменного аппарата. Технология штамповки на инструментальных штампах наиболее высоко 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, штампа и теплоносителей, позволившие значительно сократить время расчета и подготовки к изготовлению теплообменного аппарата.

5 Разработан метод трехмерного численного расчета параметров теплообменного аппарата, позволяющий провести, так называемый виртуальный эксперимент и 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 исследования были рассмотрены структурированная и неструктурированная сетки. Основываясь на максимальном сокращении времени расчета предпочтение отдано неструктурированной сетке,

поскольку при минимальных временных затратах возможно получить приемлемую сходимость результатов. Погрешность расчета составляет до 20...25%.

7 Выполнено расчетное исследование для получения критериальных зависимостей для разработки метода аналитического расчета. Данный метод является первоначальным этапом методики расчета, проектирования и изготовления теплообменного аппарата и позволяет получить оценку геометрии пластины, а именно эффективность и потери давления.

8 Апробация разработанной методики при разработке малоразмерного ГТД с регенерацией тепла, позволила подтвердить ее работоспособность.

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.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

- Расчетно-экспериментальное исследование поверхности теплообмена, сочетающей поверхность типа «набивка Френкеля» и лунки.

-Исследования влияния формы гофра на входе в теплообменник на гидравлические потери.

- Разработка оснастки для изготовления пластины, позволяющая увеличить высоту профиля пластины до 2,5...3 мм без разрывов и удовлетворительными показателями прочности. Разработка штамповки с помощью прокрутки на вальцах особой формы.

- Апробация метода лазерной сварки для соединения пластин в конверт.

- Разработка схем малоразмерных ГТД с регенерацией тепла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – М., 2009. – 144 с.
2. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. Технология самолетостроения. – М.: Машиностроение, 1970. – 589 с.
3. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 160 с.
4. Акаро И.Л. Разрезка проката и труб на заготовки под штамповку. – М.: МАМИ, 1972. – 132 с.
5. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2 т. / пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
6. Андреев В.А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
7. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.; СПб.: Энергия, 1966. – 184 с.
8. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.
9. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
10. Бутузов Е.А. Специальные виды штамповки. М.: Высш. шк., 1962. – 206 с.
11. Васильев В.И., Ильященко Д.П., Павлов Н.В. Введение в основы сварки: учеб. пособие / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 338 с.
12. Васильева М.В., Колесов А.Е. Построение геометрии и генерация сеток [Электронный ресурс]. – URL: <http://chpc.ru/wp-content/uploads/2013/01/s2-grid.pdf>
13. Витинг А.Р. Эмпирические корреляционные зависимости для расчета характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления в пластинчато-

ребристых теплообменниках с ребрами, расположенными в шахматном порядке и каналами прямоугольного сечения // ASME. Теплопередача. – 1975. – № 3.

14. Вукалович М.П. Новиков И.И. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1979. – 296 с.

15. Вулканович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Т. 6. – М.: Машгаз, 1958. – 161 с.

16. Выборочное лазерное спекание (SLS) [Электронный ресурс]. – Информационный портал 3D-печати и сопутствующих технологий. – URL: http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/

17. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 423 с.

18. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

19. Глущенков В.А. Специальные виды штамповки. Часть 1. Штамповка эластичными средами: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 72 с.

20. Данилов М.А., Попова Т.В. 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., г. Новосибирск. – Новосибирск: International Scientific Institute «Educatio», 2014. – С. 111–113.

21. Дойников Н.М., Турилов Г.И., Хомутов А.И. Машиноведение: учеб. пособие. – М.: Учпедгиз, 1959. – 396 с.

22. Дрейцер Г.А. Компактные теплообменные аппараты. – М.: Машиностроение, 1986. – 74 с.

23. Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., и др. Термодинамические свойства воздуха. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 276 с.

24. Дробыш М.В., Попова Т.В., Ломазов В.С. Разработка ключевых технологий для малоразмерных газотурбинных двигателей с регенерацией тепла

[Электронный ресурс]. – Материалы 29-го Конгресса Международного Совета по аэроавиатическим наукам (ICAS), 7–12 сентября 2014 г., г. Санкт-Петербург. – URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_1007_paper.pdf

25. Евсеев Г.А. Инженерный метод расчета плоского теплообменника «жидкость – жидкость» с прямоугольными каналами // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 4. – С. 69–71.

26. Егоров К.С., Щеголев Н.Л. Исследование характеристик высококомпактных пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена со смещенным ребром // Наука и образование.– 2012. – № 6 – С.24

27. Емельянов А.Л., Кожевникова Е.В. Испытания воздушных трубчато-пластинчатых теплообменников // Холод. техника. – 2011. – № 7. – С. 27–30.

28. Жаднов О.В. Пластинчатые теплообменники – дело тонкое // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 3(55). – С. 39–53.

29. Жакаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

30. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.

31. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.

32. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.

33. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.

34. Карапузова Н.Ю., Фокин В.М. Расчет теплообменных аппаратов: метод. указания. – Волгоград, 2013. – 68 с.

35. Кичигин М.А., Костенко Г.Н. Теплообменные аппараты и выпарные установки. М.: Государственное энергетическое издательство, 1955. – 392 с.

36. Кожухотрубный (кожухотрубчатый) теплообменник. Устройство и принцип работы [Электронный ресурс]. – Портал теплообменного оборудования. – URL: <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-shelltube/>

37. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мыгачев Б.А. и др. Пластичность и разрушение. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.
38. Кузьма-Китча Ю.А., Дзюбенко Б.В., Кутепов А.М. и др. Интенсификация тепло - и массообмена в энергетике. М.: ФГУП "ЦНИИАТОМИНФОРМ", 2003. – 232 с.
39. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. – М.: Энергия, 1967. – 226 с.
40. Ломазов В.С., Князев А.Н., Попова Т.В. и др. Малоразмерный газотурбинный двигатель с регенерацией тепла // Патент № 2563079 С1, Заявка: 2014120770/06, 23.05.2014. – 2015.
41. Ломазов В.С., Попова Т.В., Ситников С.А. Технологическое обоснование программы аналитического расчета пластинчатого теплообменного аппарата // Технология металлов. – М.: Наука и Технология, 2015. – № 8.
42. Любченко Е.А., Чуднова О.А. Планирование и организация эксперимента [Электронный ресурс]. – URL: <http://zsk-ostrov.dvfu.ru/documents/41-440/1976024/Планирование%20эксперимента-ч1.pdf>
43. Мамченко В.О., Малышев А.А. Пластинчатые теплообменники в низкотемпературной технике и биотехнических процессах. – СПб.: ИТМО, 2014. – 117 с.
44. Мартыненко О.Г. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
45. Мартыновский В.С. Циклы схемы и характеристики термотрансформаторов. – М.: Энергия, 1979. – 285 с.
46. Микротурбины CAPSTONE [Электронный ресурс]. – Портал Группы компаний БПЦ. – URL: <http://www.bpcenergy.ru/oborudovanie/capstone/>
47. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Сравнение теплообменных поверхностей по относительным габаритным показателям. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с. (Известия вузов).

48. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Веселов В.А. Топливо-масляный матричный теплообменник // Труды ЦИАМ. Теплообменные аппараты газотурбинных двигателей. – 1977. – № 1282.

49. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. Результаты исследования матричных теплообменников // Труды МГТУ им. Баумана. Криогенная техника и кондиционирование. – 1980. – № 318.

50. Михеев М.А., Михеева И.М., Краткий курс теплопередачи. – М.; СПб.: Госэнергоиздат, 1961. – 208 с.

51. Модели турбулентности [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.extra.oscfd.ru/%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B1%D1%83%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8>

52. Никитенко В.М., Курганова Ю.А. Штампы листовой штамповки. Технология изготовления штамповой оснастки [Электронный ресурс]. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 68 с. – URL: <http://window.edu.ru/resource/788/71788/files/ulstu2010-54.pdf>

53. О когенерации, малой энергетике и строительстве тепловых электростанций [Электронный ресурс]. – Портал энергетического оборудования. – URL: http://www.cogeneration.ru/honeywell/parallon_75.html

54. Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Семенов Ю.П. Основы гидравлики и теплотехники. – М.: Лесная промышленность, 1976. – С. 408.

55. Павленко А.П. Применение обобщенных решений для проектирования балочных элементов конструкций самолета и формирования функциональных сплайнов [Электронный ресурс]. – Библиотека технических наук. – URL: <http://tekhnosfera.com/primenenie-obobschennyh-resheniy-dlya-proektirovaniya-balochnyh-elementov-konstruktsiy-samoleta-i-formirovaniya-funktsion#ixzz2y78vVqw9>

56. Параметрическое моделирование [Электронный ресурс]. – URL: ru.wikipedia.org/wiki/Параметрическое_моделирование

57. Перепелица Б.В. Экспериментальное исследование влияния структуры турбулентного потока на распределение температуры в компактном теплообменнике // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15. № 4. – С. 603–609.
58. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Атомиздат, 1974. – 408 с.
59. Пластинчатый теплообменник. Устройство и принцип работы [Электронный ресурс]. – Портал теплообменного оборудования. – URL: <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-phe/>
60. Попов Е.А., Коновалов В.Е., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МЕТУ, 2003. – 480 с.
61. Попова Т.В. Анализ микротурбин со сложными термодинамическими циклами // Тезисы докладов LX Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок. – СПб., 2012. – С. 132–138.
62. Попова Т.В., Дробыш М.В., Силуянова М.В. Применение CALS-технологий для создания энергетических ГТУ со сложными термодинамическими циклами малой мощности // Применение ИПИ–технологий в производстве: тезисы докладов Девятой Всероссийской научно-практической конференции. – М.: МАТИ, 2011.
63. Попова Т.В., Силуянова М.В. Исследование стационарной микрогазотурбинной теплоэлектростанции на твердом возобновляемом топливе // XXXVII Гагаринские чтения: науч. тр. ММНК. – М.: ГОУ ВПО «МАТИ» – РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2011.
64. 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>
65. 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 (24).
66. Пульманов Н.В. Газовая турбина вместо ДВС [Электронный ресурс]. – URL: <http://energyua.com/2007/06/30/839.html>

67. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / под общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 424 с.
68. Расчетная сетка [Электронный ресурс]. – Универсальная интернет-энциклопедия. – URL: [http://rfwiki.org/Сетка_\(расчетная\)](http://rfwiki.org/Сетка_(расчетная))
69. РДМУ 95-77: метод. указания по проектированию технологической оснастки для штамповки деталей из листовых материалов эластичной средой. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 68 с.
70. Резка труб на заготовки / В.Б. Чижик-Полейко и др. – М.: НИИМАШ, 1976. – 48 с.
71. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
72. РТМ 1516-75. Вырезка и пробивка деталей из листа полиуретаном. – М.: НИАТ, 1977. – 72 с.
73. Савостин А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей теплообмена. – М.: Теплоэнергетика, 1970. – 108 с.
74. Сагдеева Ю.А., Копысов С.П., Новиков А.К. Введение в метод конечных элементов [Электронный ресурс]. – URL: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/6649/2011272930.pdf>
75. Селективное лазерное спекание (SLS) [Электронный ресурс]. – Информационный портал технологии 3D-печати. – URL: <http://3dpr.ru/selektivnoe-lazernoe-spekanie-sls>
76. Селиверстов В.М., Бажан П.И. Термодинамика, теплопередача и теплообменные аппараты: учеб. для ин-тов водного транспорта. – М.: Транспорт, 1988. – 287 с.
77. Стоянов Н.М. Энергетическое обоснование кризиса течения жидкости в каналах пластинчатых теплообменных поверхностей // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – № 6.
78. Сухов В.В., Казаков Г.М. Основы конструирования и расчёта теплообменных аппаратов: метод. указания. – Ниж. Новгород, 2009. – 138 с.

79. Схемы и циклы простейших ГТУ [Электронный ресурс]. – Корпоративный портал Томский Политехнический университет. – URL: http://portal.tpu.ru/SHARED/n/NATASHA/Material/Tab6/Modul_2.pdf
80. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1977. – 108 с.
81. Френкель Н.З. Гидравлика. – М.: Госэнергиздат, 1970. – 456 с.
82. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с.
83. Ходырев В.А. Применение полиуретана в листоштамповочном производстве. – Пермь, 1973. 220 с.
84. Шалавин В.В. Штамповка деталей из прессованных профилей эластичной средой // Штамповка в мелкосерийном производстве: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1979. – С. 79–85.
85. Шевич Ю.А., Даниленко Т.К., Соловьев Н.А. Исследование характеристик теплообменных поверхностей планарных микрорефрижираторов // Труды МГТУ им. Баумана. Криогенная техника и кондиционирование. – М., 1991.
86. Штамповка [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B0>
87. Яковлев А.А., Куликов Е.М., Шапошников В.А. Пластинчатый теплообменник высокого давления // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1999. – № 11.
88. Ястребенецкий А.Р., Коваленко Л.М. Исследование теплоотдачи и гидравлических сопротивлений в пластинчатых теплообменниках // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1959. – № 2.
89. Ansys CFX-Solver Theory Guide [Электронный ресурс]. – URL: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/CFX/xthry.pdf>
90. Broichhausen Engine Technology Prepared in Europe // Innovation by Successful Partnerships. – Munich: ISABE, 2005.

91. Focke W.W., Knibbe P.G. Flow visualization in parallel-plate ducts with corrugated walls [Электронный ресурс]. – URL: http://www.researchgate.net/publication/279069376_Friction_and_Colburn_Factor_Correlations_and_Shape_Optimization_of_Chevron-type_Plate_Heat_Exchangers
92. Focke W.W., Zachariades J., Olivier J. Влияние угла наклона гофра на теплогидравлические характеристики пластинчатых теплообменников // Международный журнал тепло- и массообмена. – 1985. – Vol. 28 (8). – P. 1469–1479.
93. Gaiser G. and Kottke V. Visualization of flow phenomena and local heat and mass transfer in corrugate passages. // In Flop, Visualization V (ed. by R. Reznicek). – Hemisphere; N. Y., 1990. – P. 835–842.
94. Gaiser G. and Kottke V. Характер течения и местный тепломассоперенос в гофрированных пакетах [Электронный ресурс]. – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.270120157/abstract>
95. Gaiser G. and Kottke V., Effects of corrugation parameter on local and integral heat transfer in plate heat exchangers and regenerators // Proceedings of the Ninth International Heat Transfer Conference. – Hemisphere; Washington, DC, 1990. – С. 85–90.
96. Gradeck M., Lebouche M. Wall shear measurements inside corrugated channels using the electrochemical technique // Experiments in Fluids. – 1998. – Vol. 24. No. 1. – P. 17–26.
97. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative transfer. N. Y.: McGraw-Hill, 1967. – 52 p.
98. Menter F.R., Kuntz M. Adaptation of Eddy-Viscosity Turbulence Models to Unsteady Separated Flow Behind Vehicles [Электронный ресурс]. – URL: <https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fextras.springer.com%2F2004%2F978-3-642-535864%2F339.pdf&name=339.pdf&lang=en&c=562c97284a1c>
99. Menter F.R., Kuntz M. Development and Application of a Zonal DES Turbulence Model for CFX-5, CFX-Validation // Report. CFX-VAL17/0503.

100. Okada K., Ono M., Tomimara T., Okuma T., Konno H., Ohtani S. Design and heat transfer characteristics of new plate heat exchanger. [Электронный ресурс]. – URL: <http://web.firat.edu.tr/iats/cd/subjects/Energy/ETE-31.pdf>
101. Rosenblad G. and Kullendorff A. Estimating heat transfer rates from mass transfer studies on plate heat exchanger surfaces [Электронный ресурс]. – URL: [http://C:/Users/%D0%A2%D0%B0%D0%BD%D1%8F%20%D0%93%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C/Downloads/International%20Journal%20of%20Heat%20and%20Mass%20Transfer.%20Volume%203%20issue%205%20\(1975\).pdf](http://C:/Users/%D0%A2%D0%B0%D0%BD%D1%8F%20%D0%93%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C/Downloads/International%20Journal%20of%20Heat%20and%20Mass%20Transfer.%20Volume%203%20issue%205%20(1975).pdf)
102. Spalart P.R. Strategies for turbulence modeling and simulations // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2000. – Vol. 21. – C. 252–263.
103. Stasiek J., Collins M.W., Ciofalo M., Chew P.E. Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages-I. Experimental result [Электронный ресурс]. – URL: http://www.din.unipa.it/Struttura/Personale/Profili/ciofalo_allegati/Paper_IJHMT_96_exp.pdf
104. Strelets M. Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows // 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA. 2001. Doc. 2001-0879.