

На правах рукописи



Агапов Андрей Владимирович

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТРУБЧАТЫХ ВОЗДУХО-ВОЗДУШНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ
АППАРАТОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ,
ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
СПЛАВЛЕНИЯ**

Научная специальность 2.5.15. - «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

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

Научный руководитель: **Ионов Алексей Владимирович**
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов»

Официальные оппоненты: **Хаймович Александр Исаакович**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», заведующий кафедрой «Кафедра технологий производства двигателей».

Левихин Артем Алексеевич
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», заведующий кафедрой «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита состоится «23» декабря 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <https://mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
доктор технических наук, доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Повышение требований к современным газотурбинным двигателям (ГТД), таких как тягово-экономические характеристики, повышение надежности и эффективности двигателя, снижение количества и трудоемкости изготовления деталей, а также уменьшение веса ГТД ставит конструкторов и технологов перед задачей создания принципиально новых конструкций деталей и узлов и применению современных технологий в производстве.

Одним из путей повышения характеристик и эффективности ГТД является повышение температуры газов перед турбиной, а это в свою очередь ставит задачу повышения совершенства системы обеспечения теплового состояния деталей турбины.

Система обеспечения теплового состояния ГТД состоит из многих элементов, одним из которых является воздухо-воздушный теплообменник (ВВТ), предназначенный для охлаждения воздуха, отбираемого из вторичной зоны основной камеры сгорания (ОКС) и подаваемого на охлаждение сопловых лопаток (СЛ) и рабочих лопаток (РЛ) турбины высокого давления (ТВД). ВВТ располагается в наружном контуре (НК) двигателя, охлаждение горячего воздуха осуществляется воздухом НК, омывающим ВВТ.

ВВТ представляет собой набор модулей трубчатых теплообменных аппаратов (ТА), расположенных во втором контуре ГТД. Традиционные конструкции трубчатых ТА для ГТД имеют ограниченную эффективность и трудоемки в производстве. Трудоемкость производства связана с тем, что модуль ВВТ — это сборочный узел, состоящий из нескольких элементов. Традиционная технология производства ВВТ включает в себя изготовление трубок и придание им необходимой формы на гибочных станках, изготовление фланцев на фрезеровальном оборудовании, штамповка проставочных элементов и дистанционных вставок, а далее сборка всех деталей с помощью пайки. На каждую из данных операций имеются свои ограничения, большое количество деталей обуславливает высокий процент брака при изготовлении одного модуля ВВТ и требует большое количество специализированной оснастки.

Одним из наиболее перспективных методов снижения трудоемкости изготовления ВВТ является переход от традиционного производства к производству с применением аддитивных технологий (АТ), а именно технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). В этом случае модуль ВВТ можно производить цельным, а не поддетально с последующей сборкой. Помимо снижения трудоемкости технология СЛС позволяет создавать конструкции, обладающие большей эффективностью (переменные сечения, турболизаторы и ламинизаторы в закрытых полостях, микрорельеф и др.), которые ранее были невозможны или трудны для производства с использованием традиционных методов. Однако, как и любая другая технология, СЛС имеет свои ограничения и недостатки, которые необходимо учитывать при проектировании и производстве.

Анализ современного уровня развития аддитивных технологий показывает, что использование технологии СЛС для изготовления деталей ГТД является актуальной задачей. Все чаще российские и зарубежные компании прибегают к использованию аддитивного оборудования для производства, но проектирование

изделий для производства с применением данных методов все еще остается проблематично в связи с отсутствием методик проектирования под технологию СЛС, инструментов прогнозирования процесса печати, а также ограниченность функционала соответствующего программного обеспечения.

В связи с изложенным **актуальность темы настоящей работы определяется:** в научном плане – необходимостью создания методики проектирования трубчатых воздухо-воздушных теплообменных аппаратов, получаемых методом селективного лазерного сплавления, которая учитывала бы различные возможности и ограничения накладываемые данной технологией; в практическом отношении – использованием селективного лазерного сплавления при производстве деталей и узлов ДЛА и ЭУ сложной конструкции, которую позволяет реализовать данный метод, для достижения более высоких характеристик и/или снижения массогабаритных характеристик.

Степень разработанности темы. Исследованиями в области усовершенствования и разработки новых перспективных конструкций ТА и применения аддитивных технологий в их производстве занимаются многие специалисты как в России, так и за рубежом.

Е. Klein и др. в своей статье рассмотрели прогресс в аддитивном производстве ТА, изделий, полученных из металлических, полимерных и керамических материалов, и обсудили экономическую конкурентоспособность методов АТ. D.C. Deisenroth и др. представили всесторонний обзор ТА на основе полимеров и полимерных композитов, в котором были представлены детали, произведенные при помощи различных методов АТ и проблем в производстве. В.М. Nafis и др. в своей работе рассмотрели радиаторы, изготовленные с применением добавок, для электронного охлаждения и осветили достижения и ограничения аддитивного производства. Потенциал технологии селективного лазерного спекания был подробно рассмотрен D. Jafari и W.W. Wits, где авторы представили обзор различных исследований ТА, которые существуют в литературе, и подчеркнули необходимость определения стандартов для оценки свойств ТА, изготовленных аддитивно.

В России исследованиями перспективных конструкций ТА и применением для их производства аддитивными технологиями занимаются в Центральном институте авиационных материалов (ЦИАМ), Московском авиационном институте (МАИ), Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ) и др. Работа, проведенная в ЦИАМ Светлаковым А.Л. и др., заключалась в исследовании трех типов ТА авиационного назначения: трубчатого, размещенного в канале наружного контура ГТД; пластинчатого с гофрированными, зигзагообразными и микрохолмистыми теплообменными поверхностями; перспективного с ветвящимися каналами. По итогам работы были получены результаты, которые могут быть использованы для проектирования и оптимизации ТА различного назначения.

Так же В ЦИАМ ведутся работы по проектированию и изготовлению методами АТ перспективных ветвистых ТА-демонстраторов с взаимно-пористой теплообменной структурой Мегаррамовой Л.А. и др.

В МАИ были разработаны методики трехмерного расчета пластинчатых ТА. Данные методики позволяют получать достоверную качественную оценку

расчетных зависимостей, а также позволяют увидеть структуру течения по тракту теплообменника (поля температур, давлений и скоростей). В ходе работы были проведены расчетные исследования ТА пластинчатого типа, проведена верификация разработанных методик на основании критериальных зависимостей.

Также в МАИ была проведена работа по расчету и модернизации ВВТ турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой (ТРДДФ). На основе полученных результатов рекомендуется в системе охлаждения турбины ТРДДФ применять ВВТ с овальными трубками, диагональные размеры которых составляют $6,3 \times 4,0$ мм, и микроинтенсификаторами теплообмена с выступами на внутренней поверхности трубок высотой 0,3 мм, установленными с шагом 5,0 мм. Эта конфигурация трубки соответствует наилучшему компромиссу между минимальным значением их внешнего гидравлического сопротивления и максимумом интенсивности охлаждения внутреннего потока воздуха.

В диссертационной работе Селиверстова С.Д. рассматривается возможность применения технологии СЛС для совершенствования конструкции обогреваемых лопаток входных направляющих аппаратов, а также была апробирована методика расчета сопряженного теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX.

В УГАТУ проводится работа по созданию малоразмерного ГТД (мГТД), в ходе которой был разработан перспективный рекуператор для данного двигателя. В рамках этой работы подробно рассмотрены виды различных рекуператоров, а также проработаны различные конструкции рекуператора для мГТД.

В имеющихся работах по данной тематике вопрос разработки и применения методик проектирования конструкций и технологического процесса (ТП) изготовления ТА с применением технологии СЛС раскрывается неполно. Авторы дают лишь общие рекомендации к проектированию конструкций и ТП, что недостаточно для получения изделий с заданными свойствами.

Цель работы: разработка методики проектирования конструкции тонкостенных трубчатых воздухо-воздушных теплообменных аппаратов авиационных газотурбинных двигателей с повышенной эффективностью, оптимизированных для изготовления методом селективного лазерного сплавления.

Задачи работы:

1. Провести анализ имеющихся и перспективных технологических решений конструирования и производства теплообменных аппаратов различных типов, а также анализ использования в производстве теплообменных аппаратов аддитивных технологий;
2. Провести гидрогазодинамический расчет конструкции ВВТ-прототипа и верифицировать методику моделирования по результатам, полученным на испытаниях в составе двигателя;
3. Исследовать влияние различных параметров (форма трубок, наличие интенсификаторов, шероховатость поверхности, форма проставочных элементов) на снижение температуры и гидравлическое сопротивление охлаждаемого теплоносителя;
4. Определить возможные толщины неподдерживаемых трубок в зависимости от угла их расположения относительно платформы построения при производстве методом селективного лазерного сплавления;
5. Спроектировать конструкцию ВВТ для производства методом СЛС;

6. Определить оптимальное расположение модуля ВВТ при печати на установке селективного лазерного сплавления при условии минимизации короблений и поддерживающих структур в межтрубном пространстве и во внутренней полости трубок;
7. Сформулировать рекомендации и методику проектирования конструкции ВВТ, получаемой методом селективного лазерного сплавления.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – свойства и характеристики, влияющие на эффективность воздухо-воздушного теплообменного аппарата авиационного газотурбинного двигателя. Предмет исследования – конструкция и технология изготовления трубчатых воздухо-воздушных теплообменных аппаратов, изготовленных с применением технологии селективного лазерного сплавления.

Новизна результатов исследований:

1. Разработана комплексная методика проектирования тонкостенных трубчатых элементов, позволяющая реализовать конструкцию ВВТ, получаемую при производстве с применением технологии СЛС, которая учитывает форму трубок, наличие и геометрию интенсификаторов теплообмена, расположение в камере построения и влияние получаемой шероховатости при печати, наличие и форму проставочных элементов.
2. Выявлена и расчётно подтверждена возможность увеличения эффективности ВВТ за счет использования в его конструкции овальной формы трубок, ТЛЖТ-рельефов и скрепляющих пластинчатых элементов с учетом применения метода СЛС при изготовлении.
3. Установлена зависимость влияния на эффективность работы ВВТ (изменение температуры и гидравлического сопротивления охлаждаемого воздуха) при использовании ТЛЖТ-рельефа на низкоэффективных участках трубок с учетом геометрии данного типа интенсификаторов теплообмена.
4. Расчётно определены и экспериментально подтверждены границы применимости технологии СЛС для материала ХН50ВМТЮБ-ВИ при изготовлении трубчатых тонкостенных элементов в зависимости от угла расположения относительно платформы построения при условии отсутствия поддерживающих структур к поверхности трубок.
5. Предложена конструкция ВВТ для производства с применением технологии СЛС, которая обладает улучшенными характеристиками по сравнению с используемой конструкцией (увеличена теплоотдача при незначительном увеличении гидравлического сопротивления).

Теоретическая значимость работы заключается в определении влияния на эффективность ВВТ (снижение температуры охлаждаемого теплоносителя) и влияние на его гидравлическое сопротивление различных конструктивных параметров (форма трубок, наличие ТЛЖТ-рельефа на низкоэффективных участках трубок, форма проставочных элементов, и т.д.) с учетом применения технологии СЛС при его изготовлении.

Получены зависимости влияния наличия ТЛЖТ-рельефа в конструкции трубок на низкоэффективных участках и их формы на снижение температуры охлаждаемого теплоносителя и увеличение гидравлического сопротивления.

Расчётно определены и экспериментально подтверждены возможные толщины трубок в зависимости от угла расположения относительно платформы построения при производстве методом СЛС.

Практическая значимость результатов исследований заключается в получении методики и рекомендаций для проектирования конструкции ВВТ для производства с применением технологии СЛС; увеличении снижения температуры охлаждаемого теплоносителя при незначительном повышении гидравлического сопротивления для спроектированной конструкции ВВТ.

Методы исследований. Поставленные цели достигались путем расчетно-теоретических исследований. Для проведения вычислительных исследований использовались программные комплексы ANSYS CFX, ANSYS Additive Workbench и SpaceClaim Additive. Результаты проведенных вычислительных исследований гидрогазодинамики сравнивались с данными, полученными при испытаниях, проведенных на натурном двигателе. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных средств измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная методика и рекомендации проектирования тонкостенных трубчатых элементов, позволяющая реализовать конструкцию ВВТ, получаемую при производстве с применением технологии СЛС, которая учитывает форму трубок, наличие и геометрию интенсификаторов теплообмена, расположение в камере построения и влияние получаемой шероховатости при печати, наличие и форму проставочных элементов.
2. Результаты расчетных исследований рабочего состояния эвольвентно-трубчатых ВВТ перекрёстного тока различных конфигураций, полученных из проектировочных и поверочных расчётов, с использованием ANSYS CFX, а также их сопоставление с результатом экспериментального исследования натурального ВВТ.
3. Конструкция эвольвентно-трубчатого ВВТ, спроектированная для производства с применением технологии СЛС.
4. Рекомендации по выбору толщины стенки трубок ВВТ в зависимости от их расположения относительно платформы построения при производстве методом СЛС.
5. Зависимости влияния наличия ТЛЖТ-рельефа на поверхности трубок ВВТ и его конструктивных параметров на изменение теплоотдачи и гидравлического сопротивления внутреннего теплоносителя.

Вклад автора в проведенное исследование заключается в проектировании различных вариантов конструкций ВВТ, проведении математического моделирования их работы при заданных условиях, сравнении полученных результатов между собой и выявлении наиболее перспективного варианта. Автором были спроектированы образцы для определения возможной толщины стенок трубок в зависимости от угла расположения относительно платформы построения при производстве методом СЛС и образцы для определения шероховатости внутренней поверхности трубок после печати и опрессовки для определения работоспособности изделия. Расчетными методами выявлено влияние шероховатости на течение охлаждаемого теплоносителя и после анализа

литературы определен наиболее подходящий метод постобработки ВВТ для снижения шероховатости. Спроектирована конструкция трубок с ТЛЖТ-рельефом на низкоэффективных участках и исследовано влияние их наличия и формы на снижение температуры и гидравлическое сопротивление, получены соответствующие зависимости. Спроектирована конструкция ВВТ для производства методом СЛС и проведен анализ расположения на платформе построения данного ВВТ с учетом минимизации поддерживающих структур и минимизации короблений после остывания. Расчетными методами определены низкоэффективные зоны на предложенных пластинах, заменяющих проставочные элементы, которые можно удалить из конструкции ВВТ для снижения веса изделия. Сформулированы рекомендации по выбору конструктивных параметров для трубчатых ВВТ для производства с использованием технологии СЛС.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы были представлены на Международной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» на секции «Современные технологии в авиа- и ракетостроении» (г. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, апрель 2020 г. и март 2024 г.); на Международной конференции «Авиация и космонавтика» на секции «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» (г. Москва, МАИ (НИУ), ноябрь 2020 г., 2021 г., 2022 г., 2023 г.); на XLVII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» на секции «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» (г. Москва, МАИ (НИУ), апрель 2021 г.); на I Международной молодежной научной конференции «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование» (г. Москва, НИТУ «МИСиС», апрель 2020 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 131 наименования и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 190 страниц, 136 рисунков и 12 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы цель работы и задачи для её достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов исследований, публикации по теме диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ технологических решений, связанных с проектированием и производством теплообменных аппаратов (ТА) с использованием аддитивных технологий (АТ). Рассмотрены работы по разработке различных видов ТА и их производству с применением АТ.

Показано, что АТ позволяют оптимизировать процесс производства ТА, делая его более экономичным и быстрым, а также создавать сложные конструкции, которые ранее были невозможны при использовании традиционных технологий.

На основании параметров печати и требований к точности изготовления модуля воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ), наиболее перспективной

технологией является селективное лазерное сплавление (СЛС). Эта технология обладает рядом преимуществ, таких как высокий коэффициент использования материала, универсальность, высокая точность и качество поверхности. Оптимальный выбор стратегии сканирования позволяет повысить эффективность процесса. Технология СЛС позволяет сократить время и стоимость производства за счет отсутствия необходимости использования специального инструмента и сокращения количества технологических этапов.

Во второй главе диссертационного исследования разработана методика математического моделирования работы ВВТ для оценки возможности перехода от традиционного метода производства к технологии с применением СЛС. Исследуемый ВВТ-прототип представляет собой рядный пятиповоротный теплообменник перекрестного тока из 41 модуля с трубками диаметром 5 мм и толщиной стенки 0,3 мм, установленный на корпусе камеры сгорания авиационного ГТД (рис. 1). Данная конструкция выбрана из-за наличия реальных результатов испытаний на натурном двигателе.

Моделирование проводилось в ANSYS CFX с граничными условиями, определенными на основе стендовых испытаний при максимальном режиме охлаждения. Расчеты с упрощенной геометрией выявили значительные расхождения с экспериментальными данными, поэтому были проведены детализированные расчеты с учетом всех конструктивных элементов, что позволило получить близкие к экспериментальным результатам (таблица 1).

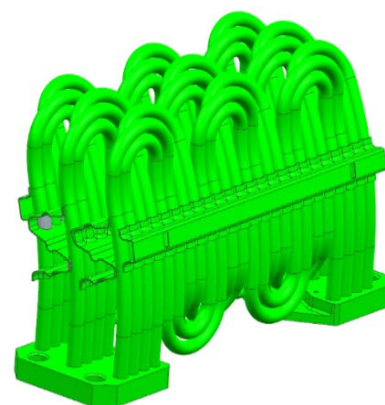


Рис. 1 – Модель исследуемого ВВТ

Таблица 1 – Результаты численного моделирования работы ВВТ

Конструкция ТА Параметр	ВВТ без проставочных элементов	ВВТ со всеми элементами участвующими в теплообмене	Результаты испытаний натурного двигателя
Температура воздуха на выходе (К)	725,9	710,8	707,45
Давление воздуха на выходе (МПа)	2,52	2,5	2,59
Граничные условия для воздуха наружного контура	Inlet: T=491 К, P=0,527 МПа Outlet: G=0,691 кг/с		
Граничные условия для вторичного воздуха камеры сгорания	Inlet: T=803 К, P=2,665 МПа Outlet: G=0,154 кг/с		

Для дальнейших исследований необходимо упростить расчетную модель и использовать метод зональной оптимизации, так как полная модель модуля ВВТ требует много времени и вычислительных мощностей. Суть метода заключается в оптимизации конструкции на части модуля, что позволяет сократить вычислительные затраты при сохранении точности результатов. Оптимизацию

можно проводить на одной трубке или на одном ряде трубок. Расчеты на одном ряде трубок показали сходимость с результатами полной модели и экспериментальными данными, что подтверждает возможность использования упрощенной модели для оптимизации конструкций ВВТ. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты численного моделирования упрощенных моделей

Используемая расчетная модель	Модель с одной трубкой	Модель с одним рядом трубок	Полная модель ВВТ
Тепловой поток через стенку одной трубки	12,1463	13,0129	13,3037

Таким образом, была разработана и верифицирована методика расчета теплогидравлического состояния ВВТ, являющаяся эффективным инструментом для проектирования и оптимизации трубчатых теплообменников, снижая необходимость в проведении натурных испытаний.

В третьей главе исследования рассматривается влияние геометрических и технологических параметров на эффективность модуля ВВТ и возможность его производства с использованием метода СЛС.

При проектировании трубчатого ВВТ необходимо учитывать баланс между увеличением поверхности теплообмена и ростом массы конструкции. Увеличение площади теплообмена повышает эффективность, но приводит к увеличению массы, требуя поиска компромисса между этими параметрами. Также необходимо учитывать геометрические ограничения, связанные с расположением ВВТ в двигателе.

Для достижения оптимальных характеристик были рассмотрены трубки овального сечения и профилированные витые цилиндрические трубки вместо традиционных цилиндрических. Овальные трубки имеют меньшие потери давления и более интенсивный теплообмен, а профилированные витые трубки позволяют увеличить поверхность теплообмена без изменения габаритных размеров модуля.

Были спроектированы конструкции ВВТ с овальными трубками размером 6,0×4,0 мм и с профилированными витыми цилиндрическими трубками диаметром 5 мм. Было проведено моделирование теплогидравлического состояния спроектированных конструкций и сравнение полученных результатов с оригинальной конструкцией. Выявлено, что ВВТ с трубками овального сечения обладает наилучшими показателями теплообмена и потерь давления. Результаты расчётов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов различных конструкций ВВТ

Конструкция ТА	“Оригинальный” ВВТ с трубками круглого сечения	ТА с трубками овального сечения	ТА с витыми трубками
Температура воздуха на выходе (К)	726	713	730

Снижение температуры охлаждаемого воздуха (К)	118	131	114
Снижение температуры охлаждаемого воздуха (%)	16,25	18,37	15,62
Давление воздуха на выходе (МПа)	3,012	2,95	2,97
Потери полного давления охлаждаемого воздуха (МПа)	0,188	0,25	0,23
Потери полного давления охлаждаемого воздуха (%)	6,24	8,47	7,74
Граничные условия для воздуха наружного контура	Inlet: T=491°K, P=0,527 Мпа Outlet: G=0,524 кг/с		
Граничные условия для вторичного воздуха камеры сгорания	Inlet: T=844°K, P=3,2 Мпа Outlet: G=0,210 кг/с		

Так как модуль ВВТ проектируется для производства с применением СЛС, то можно заменить используемую конструкцию на пластинчато-трубчатую, заменив проставочные элементы пластинами, выращенными вместе с трубками, что позволит увеличить площадь теплообмена и обеспечить необходимую жесткость. Данная конструкция нереализуема традиционными методами, а СЛС снимает это ограничение. Для эффективного производства ВВТ методом СЛС необходимо оптимизировать конструкцию изделия и его расположение в камере построения. Основными задачами оптимизации являются минимизация короблений и количества поддерживающих структур, особенно внутри трубок и межтрубном пространстве, из-за сложности их удаления после изготовления. Для определения оптимального расположения модуля ВВТ в камере построения был использован модуль ANSYS Additive Prep. Определено оптимальное расположение модуля ВВТ, минимизирующее использование поддержек и отсутствие их внутри трубок. Моделирование показало, что расположение модуля под углом от 80° до 140° по оси X является наиболее оптимальным. Учитывая это, решено разместить пластины под углом 40° (рис. 2), что позволило избежать использования поддержек в межтрубном пространстве. По итогам исследования была получена управляющая программа для СЛС установки с оптимальным расположением модуля ВВТ (рис. 3), обеспечивающим минимальные коробления после остывания и минимальное количество необходимых поддержек.

Для повышения эффективности ВВТ важно минимизировать толщину стенок трубок, потому что это влияет на коэффициент теплопередачи и массу конструкции. Для анализа возможности печати использовался модуль ANSYS Mechanical Workbench Additive. Моделирование проводилось на конструктивно подобных образцах (КПО) с толщиной стенок трубок от 0,1 мм до 0,5 мм с шагом 0,1 мм и углами наклона трубок относительно платформы печати от 0° до 90°. По результатам моделирования (рис. 5) была получена карта возможных толщин стенок в зависимости от угла расположения (рис. 6), где красные зоны указывают на непригодные варианты, желтые — на возможные с поддержками, а зеленые — на удовлетворительные варианты без поддержек.

По результатам проведенных работ была спроектирована промежуточная конструкция ВВТ для производства с использованием технологии СЛС (рис. 7). В конструкцию прототипа были внесены следующие изменения: форма трубок изменена с цилиндрической на овальную; геометрия фланцев крепления изменена без изменения габаритных размеров и мест крепления; проставочные элементы и дистанционные проставки заменены на пластины; расположение пластин оптимизировано для минимизации поддержек и короблений при печати; толщина стенок в трубках изменяется по длине в зависимости от угла нависания над платформой построения при печати на установке СЛС.

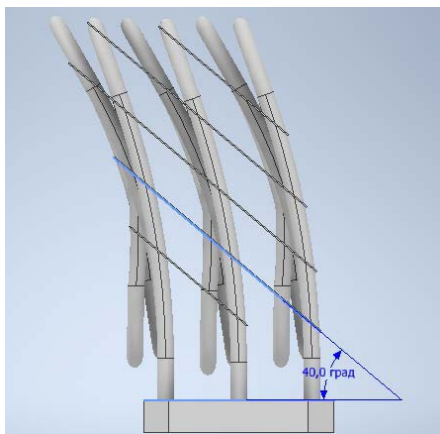


Рис. 2 – Расположение пластин

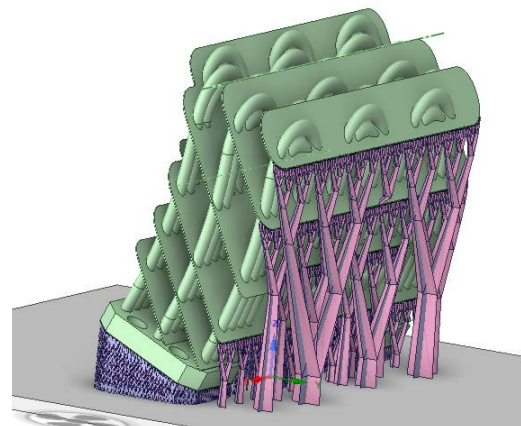


Рис. 3 – Оптимальное расположение модуля ВВТ

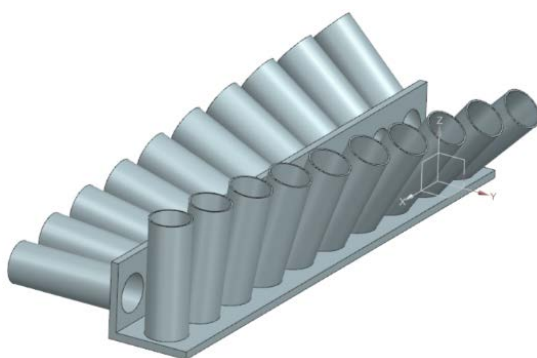


Рис. 4 – КПО для определения возможных толщин трубок

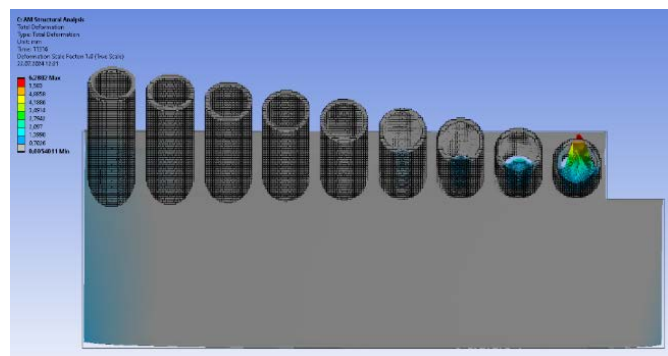


Рис. 5 – Пример результатов моделирования процесса СЛС

Угол расположения относительно платформы	Толщина стенки трубки				
	0,1 мм	0,2 мм	0,3 мм	0,4 мм	0,5 мм
0°	Red	Red	Red	Red	Red
5°	Red	Red	Red	Red	Red
10°	Red	Red	Red	Red	Red
15°	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
20°	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
25°	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
30°	Red	Yellow	Green	Green	Green
35°	Yellow	Yellow	Green	Green	Green
40°	Yellow	Yellow	Green	Green	Green
45°	Yellow	Green	Green	Green	Green
50°	Green	Green	Green	Green	Green
55°	Green	Green	Green	Green	Green
60°	Green	Green	Green	Green	Green
65°	Green	Green	Green	Green	Green
70°	Green	Green	Green	Green	Green
75°	Green	Green	Green	Green	Green
80°	Green	Green	Green	Green	Green
85°	Green	Green	Green	Green	Green
90°	Green	Green	Green	Green	Green

■ – Печать возможна без поддержек
■ – Печать возможна с поддержками внешней поверхности трубок
■ – Печать невозможна без поддержек

Рис. 6 – Карта применимости метода СЛС

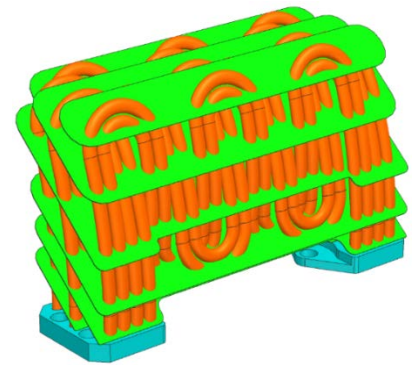


Рис. 7 – Промежуточная конструкция ВВТ

Для подтверждения повышения эффективности ТА и выявления низкоэффективных зон на пластинах для их оптимизации и снижения массы всего модуля ВВТ был проведен расчет спроектированной конструкции. Результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты гидрогазодинамического расчета, сконструированного ВВТ и ВВТ-прототипа

Конструкция ТА	Спроектированный ВВТ	ВВТ-прототип
Температура воздуха на выходе из ВВТ [К]	688,3	713,6
Снижение температуры ΔT [К]	155,7	130,4
Давление воздуха на выходе из ВВТ [МПа]	3,175	3,012
Потери давления ΔP [МПа]	0,025	0,188
Граничные условия для внешнего теплоносителя	Inlet: T=491°K, P=0,527 МПа Outlet: G=0,524 кг/с	
Граничные условия для внутреннего теплоносителя	Inlet: T=844°K, P=3,2 МПа Outlet: G=0,21 кг/с	

Из результатов видно, что спроектированная конструкция снижает температуру теплоносителя и гидравлическое сопротивление, сохраняя расход воздуха. Построены изотермические поверхности на модели ВВТ (рис. 8), показывающие зоны с температурой 600 К и меньше, которые можно считать неэффективными по теплосъему. Это позволяет оптимизировать пластинчатые элементы по форме для снижения массы модуля ВВТ.

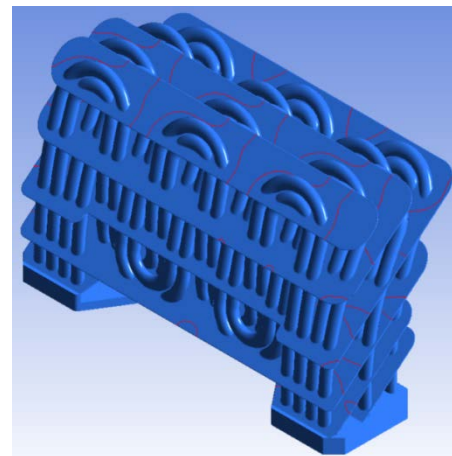


Рис. 8 – Изотермические поверхности

Четвертая глава посвящена исследованиям влияния шероховатости поверхности трубок, получаемой при печати и наличия интенсификаторов потока в виде ТЛЖТ-рельефа на эффективность ВВТ.

При численном моделировании течения в трубках ВВТ поверхности трубок принимались гидравлически гладкими. Однако, учитывая изменение технологии производства ВВТ с традиционной на СЛС и то, что большинство каналов не являются гидравлически гладкими, необходимо провести исследование влияния шероховатости на эффективность его работы, в частности на изменение понижения температуры охлаждаемого воздуха и потери давления.

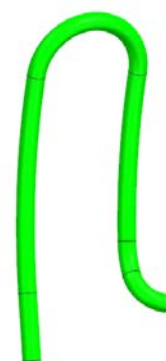


Рис. 9 – Модель трубки для проведения численного моделирования

Была проведена серия CFD-расчетов одной трубки в ANSYS CFX с включенной моделью пристеночных функций и без нее, полученные результаты сравнивались между собой. Грани внутренней поверхности трубки (рис. 9) были разбиты на участки, для каждого задавались эквивалентные шероховатости по результатам измерения с натурального образца и преобразованные по формуле 1. Расчет проводился по ранее разработанной и верифицированной методике из главы 2. Результаты расчетов представлены в таблице 5.

$$k_s = 2,19 * Ra^{0.877} \quad (1)$$

Таблица 5 – Результаты перепада температур и давлений для трубки с гладкой и шероховатой стенками

Вид трубки в расчете	Трубка с гладкой стенкой	Трубка с учетом шероховатости
ΔT [К]	22,496	24,356
ΔP [Па]	23920	46123
Граничные условия для внешнего теплоносителя	Inlet: T=491°K, P=0,527 МПа Outlet: G=0,161 кг/с	
Граничные условия для внутреннего теплоносителя	Inlet: T=803°K, P=2,665 МПа Outlet: G=0,01283 кг/с	

Результаты показывают, что шероховатость незначительно влияет на изменение температуры, но сильно влияет на потери давления. Это указывает на необходимость проведения постобработки после печати для снижения шероховатости внутренних стенок трубок ВВТ.

Наиболее подходящим методом обработки для модуля ВВТ является химический, так как конструкция включает элементы сложной формы с внутренними полостями. Наружные поверхности могут обрабатываться любым методом.

Также исследовалась возможность увеличения эффективности ВВТ путем интенсификации потока. Применение интенсификаторов, как известно, увеличивает гидравлическое сопротивление, но вихревые интенсификаторы в конструкции теплообменных поверхностей вызывают рост теплообмена и равноценный рост сопротивления. Следовательно, такая форма интенсификаторов наиболее предпочтительна для использования в исследуемом ВВТ.

По результатам ранее проводимых работ различными исследователями была выбрана технология, основанная на применении ТЛЖТ-рельефов (Tornado Like Jets Terrain). Основным преимуществом использования данных поверхностей является возникновение процессов самоорганизации потоков.

В качестве интенсификаторов были выбраны эллиптические лунки с соотношением малого и большого диаметров 1/3, которые располагаются в шахматном порядке на прямых участках до поворотного колена трубок. Конструкция показана на рис. 10.

Таблица 6 – Сравнение результатов расчетов

Форма трубок	Трубки с гладкой стенкой	Трубки с ТЛЖТ-рельефом
ΔT , [К]	13,7185	17,3441
ΔP , [Па]	36640,3	39627,3
Граничные условия для внешнего теплоносителя	Inlet: $T=491^\circ\text{K}$, $P=0,527\text{ МПа}$ Outlet: $G=0,161\text{ кг/с}$	
Граничные условия для внутреннего теплоносителя, через одну трубку	Inlet: $T=803^\circ\text{K}$, $P=2,665\text{ МПа}$ Outlet: $G=0,01283\text{ кг/с}$	

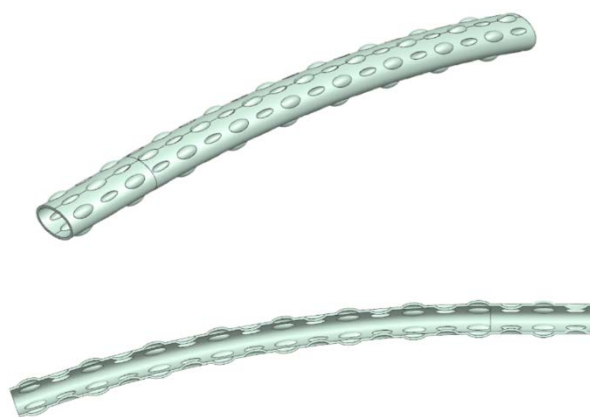


Рис. 10 - Конструкция трубки с ТЛЖТ-рельефом

Для определения влияния интенсификаторов на эффективность теплообмена были проведены гидрогазодинамические расчеты одного ряда трубок ВВТ. Результаты сравнивались по разности температур и давлений на входе и выходе. Сравнение приведено в таблице 6.

Результаты показывают, что применение ТЛЖТ-рельефа для интенсификации теплообмена целесообразно, но незначительно повышается гидравлическое сопротивление, при условии сохранения расхода теплоносителей в заданном объеме. Полученные данные хорошо согласуются с теорией и проводимыми ранее исследованиями.

Для определения оптимальной геометрии интенсификаторов ВВТ, обеспечивающей максимальную теплоотдачу при минимальном гидравлическом сопротивлении, необходимо провести серию гидрогазодинамических расчетов трубки с ТЛЖТ-рельефом различной конфигурации. В расчетах применяется упрощенная модель запараметризованной геометрии одной интенсифицированной трубки (рис. 11). Управляющим параметром был принят малый радиус внутреннего эллипса r_{min} и толщина стенки трубки h , для других параметров использовались следующие выражения:

$$R_{min} = r_{min} * 3, \text{ мм} \quad (2)$$

$$r_{max} = r_{min} + h, \text{ мм} \quad (3)$$

$$R_{max} = R_{min} + h, \text{ мм} \quad (4)$$

$$C_1 = R_{max} + 1, \text{ мм} \quad (5)$$

$$C_2 = C_1 + R_{max} + 1, \text{ мм} \quad (6)$$

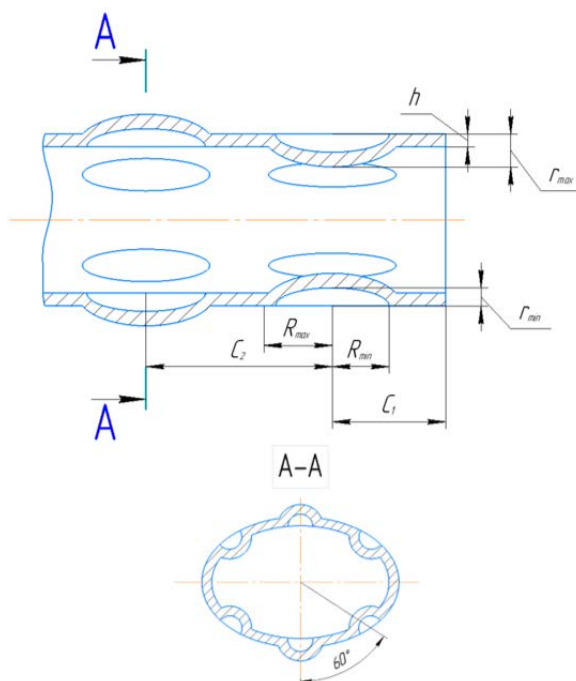


Рис. 11 – Эскизное изображение геометрии трубки

где, R_{min} – большой радиус внутреннего эллипса; r_{max} – малый радиус внешнего эллипса; R_{max} – большой радиус внешнего эллипса; C_1 – расстояние до центра лунки от края трубки; C_2 – расстояние между центрами лунок.

Малый радиус внутреннего эллипса изменялся от 0,3 мм до 0,65 мм с шагом 0,02 мм, толщина стенки была принята равной 0,3 мм. Наиболее показательные результаты расчетов внесены в таблицу 7. Также был проведен расчет одной гладкой трубки для сравнения с полученными результатами.

Таблица 7 – Результаты расчетов влияния формы лунок

r_{min} , мм	0	0,3	0,38	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
ΔT , [K]	11,9	12,9	14	15,2	16,3	17,2	18,2	18,8	19,3
ΔP , [Па]	10242,5	15238,8	20356,5	21216,3	26536,5	31740	35212,3	42579	49265,2

По полученным результатам построены графики снижения температуры и потерь давления в зависимости от геометрии лунок (рис. 12 и 13). Используя метод аппроксимации, получены функции, которые в достаточной степени описывают характер поведения исследуемых параметров в зависимости от изменения

геометрии лунок. Так, график снижения температуры можно описать функцией 7, а график потерь давления функцией 8. Полученными зависимостями можно пользоваться при проектировании ВВТ с интенсифицированными ТЛЖТ-рельефом трубками овальной формы. С учетом технических требований, предъявляемых к исследуемому ВВТ, на низкоэффективных участках трубок можно применять интенсификаторы в виде ТЛЖТ-рельефа с малым радиусом внутреннего эллипса r_{min} равным 0,4 – 0,45 мм.

$$\Delta T = 18,376 * r_{min}^2 + 0,7534 * r_{min} + 11,713, [K] \quad (7)$$

$$\Delta P = 1024 * r_{min}^3 + 122513 * r_{min}^2 - 20226 * r_{min} + 10236, [Pa] \quad (8)$$

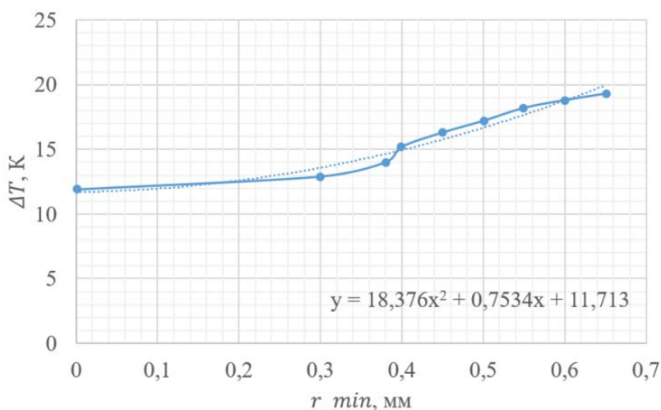


Рис. 12 – График зависимости снижения температуры в зависимости от формы лунок

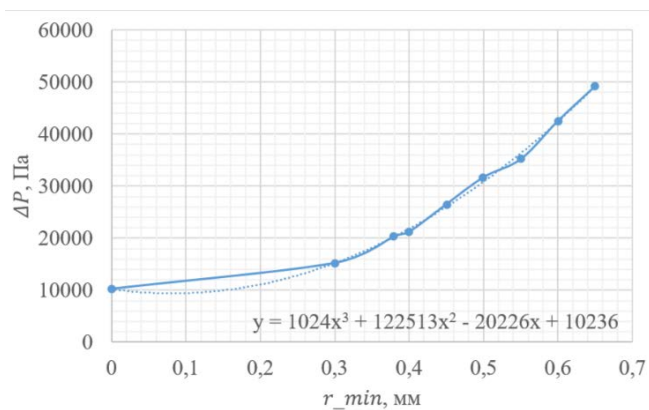


Рис. 13 – График зависимости потерь давления в зависимости от формы лунок

Пятая глава посвящена анализу результатов исследований эксплуатационных характеристик.

Для верификации результатов, полученных в главе 3, необходимо провести тестовую печать КПО (рис. 6) методом СЛС и сравнить полученные изделия с результатами математического моделирования процесса печати. На рисунках 14 и 15 показаны напечатанные образцы. Результаты печати спроектированных образцов хорошо согласуются с результатами, полученными по итогам численного моделирования процесса печати методом СЛС.



Рис. 14 – Напечатанные образцы (трубки с углами от 45° до 90°)



Рис. 15 – Напечатанные образцы (трубки с углами от 0 до 45°)

Также была поставлена задача исследовать влияние шероховатости поверхности, получаемой методом СЛС, на теплогидравлическое состояние ВВТ.

Для этого необходимо определить реальную шероховатость поверхности изделия. Для измерения шероховатости был напечатан образец, показанный на рис. 16, а готовое изделие – на рис. 17.



Рис. 16 – Модель образца для выращивания Рис. 17 – Выращенный образец

Для измерения шероховатости внутренней поверхности выращенный образец был разделен вдоль оси трубки. Были выбраны три участка под углами 0° , 45° и 90° к плоскости печати для исследования зависимости шероховатости от угла нависания детали. Измерения проводились по шести точкам, среднее значение R_a на нависающем участке трубки составило 9,671, на переходном участке — 8,881, на прямом участке — 8,730.

В главе 4 было проведено исследование влияния ТЛЖТ-рельефа на низкоэффективных участках трубок на эффективность теплообмена. Результаты показали, что применение интенсификаторов данного вида целесообразно.

Изготовление трубок с ТЛЖТ-рельефом традиционными способами затруднено из-за сложности изготовления трубок с лунками. Единственным методом производства трубчатого ВВТ с такими интенсификаторами является СЛС. Однако требуется отсутствие поддерживающих структур во внутренней полости трубок при печати, что ставит вопрос о возможности производства методом СЛС. Необходимо провести тестовую печать интенсифицированных ТЛЖТ-рельефом трубок. Был спроектирован и выращен образец – часть овальной трубки с интенсификаторами потока в виде ТЛЖТ-рельефа на прямых участках, толщиной стенок 0,2 мм на прямых участках и 0,3 мм на поворотном участке. В конструкцию образцов были заложены фланцы для испытаний на герметичность.

Для сравнения был напечатан участок трубки без интенсификаторов с использованием поддержек к внешней поверхности трубки, так как иначе вырастить их невозможно. Поддержек во внутренней полости нет. На рис. 18 показаны образцы после отделения от платформы построения.

По результатам выращивания образцов, метод СЛС позволяет получать точную модель тонкостенных трубок с интенсификаторами и без них с малыми отклонениями по форме.



Рис. 18 – Напечатанные образцы

Одним из главных недостатков метода СЛС является возможность возникновения сквозных пор, что может привести к утечкам и неправильной работе изделия. Все изготовленные образцы были проверены на герметичность. Опрессовка конструкции проводилась в течение 30 минут при давлении 40 атм согласно техническому заданию. Герметичность образца была проверена методом обмыливания, утечек не обнаружено.

В шестой главе представлена методика проектирования и рекомендации по конструированию трубчатых ВВТ для СЛС. Организация работ базируется на общих принципах и правилах проектирования деталей и узлов, но с учетом особенностей метода СЛС.

По итогам проведенных работ была разработана методика проектирования трубчатых ВВТ, схематично показанная на рис. 23.

Основной этап методики – проектирование конструкции ВВТ для производства методом СЛС. Работа конструктора и технолога может начинаться с этого этапа. Общая схема работы представлена на рис. 24.

На данном этапе рассматриваются три параметра для проектирования конструкции ВВТ. Первый блок – выбор конфигурации ВВТ: форма трубок, профилирование, расположение и т.д. Из рассмотренных вариантов выбирается наиболее подходящий под поставленные задачи. Второй и третий блоки относятся к ограничениям и возможностям метода СЛС: форма и расположение скрепляющих элементов при минимизации поддерживающих структур и короблений, толщины стенок трубок в зависимости от угла их расположения относительно платформы построения.

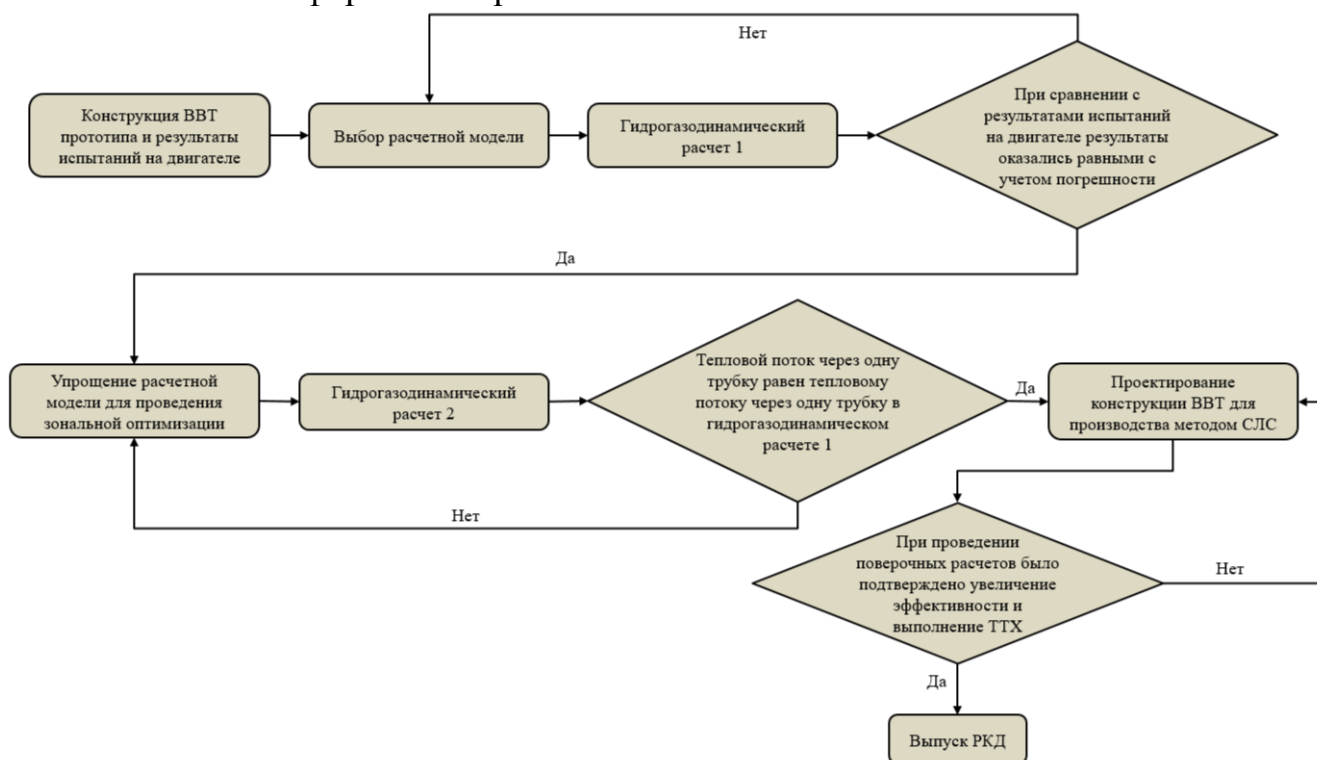


Рис. 23 – Схема процесса проектирования трубчатых ВВТ, получаемых методом СЛС

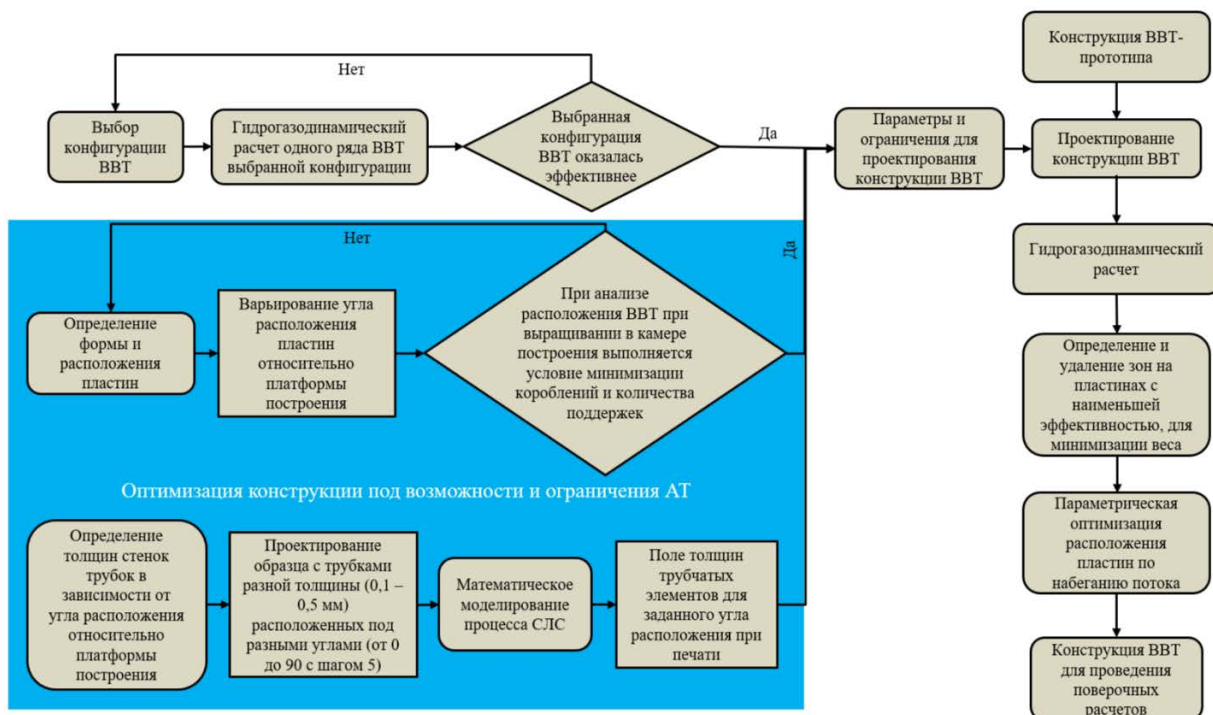


Рис. 24 – Этап проектирования конструкции ВВТ для производства методом СЛС

Внутри данного блока можно рассматривать больше условий, влияющих на конечную конструкцию ВВТ. Например, влияние расположения изделия в камере построения на шероховатость поверхности и другие условия могут сузить набор возможных вариантов конструкции. Итогом работы в данном блоке является набор параметров и ограничений на конструкцию ВВТ, используемых в следующем блоке (рис. 25) для проектирования.

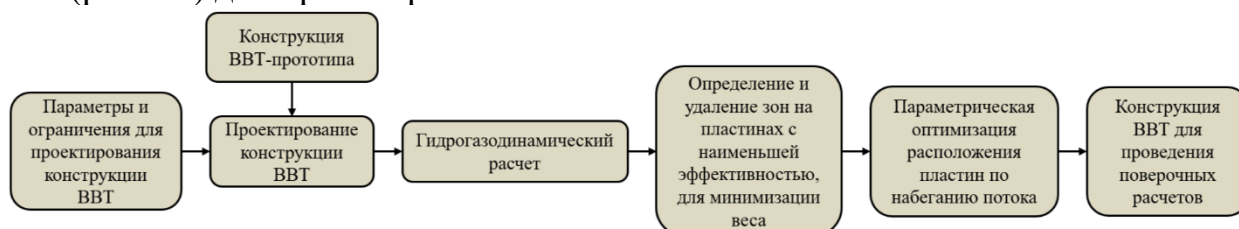


Рис. 25 – Блок проектирования конструкции ВВТ с учетом полученных параметров и ограничений

На данном этапе проектирования ВВТ создается промежуточная конструкция на основе прототипа с учетом параметров и ограничений. Затем проводятся работы по оптимизации параметров, результатом которых становится конечная конструкция ВВТ. На ней выполняются поверочные расчеты для подтверждения выполнения необходимых условий и тактико-технических характеристик.

По предложенной методике была спроектирована конструкция модуля ВВТ, показанная на рис. 26.

Проектирование конструкции проводилось на основе конструкции ВВТ-прототипа, используемого в авиационных ГТД в настоящее время. Были введены ограничения на изменение габаритов модуля ВВТ и мест его крепления к корпусу КС, а также на расход воздуха на основных режимах охлаждения.

В конструкцию ВВТ внесены следующие изменения:

- Предложено использовать трубки овальной формы, так как в ходе исследований было подтверждено увеличение эффективности ВВТ с данным видом трубок;
- В связи с использованием в конструкции ВВТ трубок овальной формы и ограничений на изменение габаритных размеров всего модуля и мест крепления к корпусу КС необходимо перепроектировать фланцы, что позволяет увеличить полость отбора воздуха на охлаждение и за счет этого снизить массу;
- Решено отказаться от использования проставочных элементов и дистанционных вставок в конструкции, заменив конструкцию ВВТ на трубчато-пластинчатую, расположение пластин при этом оптимизированно для минимизации короблений и использования поддерживающих структур при производстве методом СЛС;
- При проведении математического моделирования процесса печати методом СЛС определены границы применимости данного метода для производства тонкостенных трубчатых элементов, которые были подтверждены экспериментально, что позволяет снизить толщину стенок трубок на некоторых ее участках до 0,2 мм, а это в свою очередь приводит к увеличению теплосъема и снижению массы;
- Предложено использовать в конструкции трубок интенсификаторы потока в виде ТЛТ-рельефа. Это позволяет при сохранении массогабаритных характеристик увеличить площадь теплообмена и коэффициент теплопередачи, что приводит к увеличению перепада температуры по горячему контуру при незначительном увеличении гидравлического сопротивления. Также были определены оптимальные размеры лунок для данного типоразмера трубок;
- Предложено убрать часть материала на низкоэффективных участках на пластинах, что позволит снизить массу модуля ВВТ в целом.

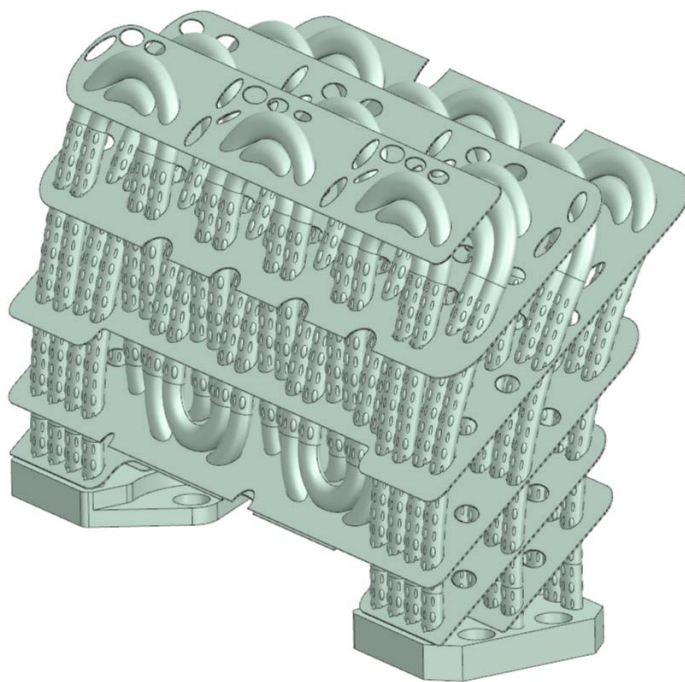


Рис. 26 – Пример окончательной конструкции ВВТ

Все предложенные изменения возможны при производстве заготовки модуля ВВТ методом СЛС. Также это позволяет значительно упростить технологический процесс производства модулей ВВТ без необходимости производить большое количество дополнительной оснастки и последующей сборки и пайки. Все полученные результаты проведенных исследований применимы при проектировании любой конструкции ВВТ подобной рассмотренной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения данной диссертационной работы представлено решение важной задачи в области авиационного двигателестроения, имеющей существенное значение для конструкторско-технологического совершенствования трубчатых воздухо-воздушных теплообменных аппаратов авиационных газотурбинных двигателей за счет разработанной методики проектирования их конструкции для производства с применением метода СЛС.

По итогам выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ имеющихся и перспективных технологических решений конструирования и производства теплообменных аппаратов различных типов, а также анализ использования в производстве теплообменных аппаратов аддитивных технологий. По результатам анализа выявлена необходимость разработки обобщенной методики проектирования трубчатых теплообменных аппаратов, предназначенных для производства методом СЛС;
2. Проведен гидрогазодинамический расчет конструкции ВВТ-прототипа и верифицирована методика моделирования по результатам, полученным на испытаниях в составе двигателя. Данная методика может применяться инженерами при проектировании конструкций трубчатых ВВТ, так как она позволяет получить достаточно точные результаты без необходимости проведения экспериментальных работ для подтверждения увеличения эффективности спроектированной конструкции.;
3. Исследовано влияние различных параметров (форма трубок, наличие интенсификаторов, шероховатость поверхности, форма проставочных элементов, способы постобработки) на снижение температуры и гидравлическое сопротивление охлаждаемого теплоносителя. Получены соответствующие зависимости и рекомендации по конструированию и постобработке трубчатых ВВТ, получаемых методом СЛС;
4. Проведено исследование возможности производства тонкостенных трубчатых элементов методом СЛС без поддерживающих структур численными методами. По результатам исследования получена карта возможных толщин трубчатых элементов в зависимости от угла расположения относительно платформы построения. Предложенной картой возможных толщин трубчатых элементов инженеры могут пользоваться при проектировании различных изделий, имеющих соответствующие элементы, предназначенных для производства методом СЛС;
5. Экспериментально подтверждена область применимости метода СЛС для производства тонкостенных трубчатых элементов, а также возможность производства трубок овальной формы с малыми диаметральными размерами с интенсификаторами потока в виде ТЛЖТ-рельефа и без него. Все произведенные изделия удовлетворяют заявленным требованиям и подтверждается необходимость проведения постобработки для достижения необходимого качества поверхности;
6. Определено оптимальное расположение модуля ВВТ при печати на установке селективного лазерного сплавления при условии минимизации короблений и поддерживающих структур в межтрубном пространстве и во внутренней полости трубок;

7. Сформулированы рекомендации и разработана обобщенная методика проектирования конструкции трубчатых ВВТ, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Полученная методика может служить методической рекомендацией для конструкторов и технологов при проектировании/усовершенствовании и изготовлении тонкостенных трубчатых изделий методом СЛС. Это позволит сократить число итераций при проектировании новых конструкций, получаемых методом СЛС или упростить технологический процесс при переходе от традиционного производства к производству с применением метода СЛС;
8. По разработанной методике и предложенным рекомендациям была спроектирована конструкция трубчатого ВВТ для производства методом СЛС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним:

1. Агапов А. В., Ионов А. В., Стародумов А. В. Применение селективного лазерного сплавления при модернизации и производстве трубчатого воздухо-воздушного теплообменника // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – Т. 27. – №. 1 (99). – С. 116-129.

2. Агапов А.В., Ионов А.В. Влияние шероховатости поверхности трубок, получаемой методом селективного лазерного сплавления, на эффективность воздухо-воздушного теплообменника // Инженерный журнал: наука и инновации. : электрон. журн. 2024. № 9(153) Сентябрь. – ISSN 2308-6033 (online). URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/arise/teje/2388.html>. Дата публикации: 17.09.2024.

3. Агапов А.В., Ионов А.В. Влияние луночных интенсификаторов и их формы на эффективность трубчатых воздухо-воздушных теплообменных аппаратов // Тепловые процессы в технике. – 2024. – Т. 16. № 6. – С. 277–282.

Другие публикации:

4. Агапов, А. В. Применение материалов и методов аддитивных технологий в проектировании и изготовлении элементов газотурбинных двигателей / А. В. Агапов, А. В. Ионов // Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование: материалы I Международной молодежной научной конференции, Москва, 21–24 апреля 2020 года. – Москва: Международный Информационный Нобелевский Центр "Нобелистика", 2020. – С. 6-17.

5. Агапов А. В., Ионов, А. В., Селиверстов, С. Д., Вавилкин, О. Н., Стародумов, А. В. Исследование применения методов аддитивных технологий в модернизации трубчатого воздухо-воздушного теплообменника // Авиация и космонавтика: Тезисы 20-ой Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 88-90.

6. Агапов, А. В. Перспективные конструкции и методики проектирования теплообменных аппаратов изготавливаемых с применением аддитивных технологий / А. В. Агапов, С. Д. Селиверстов // XLVII Гагаринские чтения 2021: Сборник тезисов работ XLVII Международной молодежной научной конференции, Москва, 20–23 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 114-115.

7. Агапов, А. В. Исследование эффективности теплообменных аппаратов различных конструкций, спроектированных для производства с помощью селективного лазерного спекания / А. В. Агапов, А. В. Ионов // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 85-86.

8. Агапов, А. В. Исследование работы полной модели ВВТ и определение математической модели для проведения зональной оптимизации / А. В. Агапов, А. В. Ионов // Авиация и космонавтика: Тезисы 22-ой Международной конференции, Москва, 20–24 ноября 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 61.

9. Агапов, А. В. Совершенствование трубчатых воздухо-воздушных теплообменных аппаратов ГТД / А. В. Агапов, А. В. Ионов // Молодежь. Техника. Космос: Труды XVI Международной молодежной научно-технической конференции – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2024.