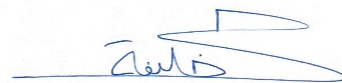


На правах рукописи



ХАЛИФЕ ХАССАН

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВОБОДНО-ПОРШНЕВОГО
ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре «Энергетическое машиностроение» инженерной академии в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы" (РУДН)

Научный руководитель:

Смирнов Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Официальные оппоненты:

Куколев Максим Игоревич

доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства, Инженерно-строительный институт, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Самвелов Андрей Витальевич

кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО НТЦ «Крионекс»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Защита состоится «16» мая 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ПДС 2022.013 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: 115093, г. Москва, Подольское шоссе д.8, корп. 5, аудитория 3036.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Электронная версия автореферата и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте РУДН <https://www.rudn.ru/science/dissovet> и на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>).

Автореферат разослан «__» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 2022.013



Агасиева С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Двигатели Стирлинга (ДС), изобретенные в начале 19 века, в настоящее время используются преимущественно в автономной энергетике и имеют огромный потенциал для будущих миссий по исследованию космоса благодаря таким преимуществам, как длительный срок эксплуатации без технического обслуживания и возможности использовать различные источники тепла. Свободнопоршневой двигатель Стирлинга (СПДС) в настоящее время считается наиболее перспективной и надежной конфигурацией.

Эффективная теплопередача имеет важное значение для СПДС, поскольку она напрямую влияет на технико-экономические показатели (ТЭП) двигателя. СПДС работают за счет циклического нагрева (объем с высокой температурой) и охлаждения рабочего тела (объем с низкой температурой) с регенерацией тепла при течении рабочего тела между объемами. В ходе этого процесса тепло должно эффективно передаваться в теплообменниках СПДС, поэтому большая часть текущих исследований и разработок в этой области сосредоточена на совершенствовании механизмов теплообмена в СПДС, что является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение.

В диссертации предложен метод совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе. Увеличение теплоотвода в охладителе СПДС позволяет увеличить разницу температур в СПДС и уменьшить мертвый объем двигателя, что улучшит технико-экономические показатели СПДС.

Степень разработанности темы. Для исследования рабочего процесса двигателей Стирлинга разработано несколько математических моделей. Вклад в разработку математических моделей ДС в России внесли: Махкамов Х.Х., Довгялло А.И., Некрасова С.О., Куколев М.И., Абакшин А.Ю., Ноздрин Г.А., Зенкин В.А. и Вобылев А.В.. Меньше исследований проведено по улучшению работы системы охлаждения ДС по сравнению с нагревателем и регенератором ДС. Вклад в исследование улучшения теплоотвода в охладителях ДС и влияния мертвого объема на работу ДС в России и за рубежом внесли: Столяров С.П., Савченко В.А., F., Gupte A., Dehghan A., Kanzaka M., Alfarawi S., Kuosa M., Sneft J., Hasanovich L., Feng X. и Nobes D..

Основные методы совершенствования системы охлаждения ДС направлены на увеличение площади поверхности теплообмена и улучшение циркуляции рабочего тела внутри теплообменника. Дальнейшее развитие системы охлаждения требует поиска новых направлений повышения эффективности теплообмена. Одна из концепций, используемых в холодильных установках с импульсной трубкой, потенциально может быть использована в охладителе ДС для улучшения теплообмена. Концепция предполагает реорганизацию течения рабочего тела внутри системы путем замены регенератора на противоточный теплообменник, что приводит к улучшению теплообмена в системе.

Предлагается реорганизовать течение рабочего тела между объемами с максимальной и минимальной температурой в охладителе СПДС таким образом, чтобы увеличить теплоотвод за счет возрастания температуры стенок охладителя и, следовательно, увеличения перепада температур между стенкой и охлаждающей жидкостью. С этой целью течение рабочего тела организуется в системе охлаждения по следующей схеме: течение из объема с максимальной температурой после регенератора в охладителе будет осуществляться по каналам приближенным к рубашке охлаждения, а в обратном направлении (из объема с минимальной температурой) по другим каналам, удаленным от рубашки охлаждения. Данное совершенствование системы охлаждения улучшит технико-экономические показатели СПДС. Для практической реализации предложенной концепции необходимо разработать соответствующий метод совершенствования системы охлаждения.

Цель работы: разработать метод совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС с целью улучшения его технико-экономических показателей (ТЭП).

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработать расчетно-экспериментальную методику исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на теплоотвод в системе охлаждения СПДС и технико-экономические показатели СПДС.
2. Выполнить расчетные исследования с использованием методов расчета второго порядка в среде Matlab для определения рабочих параметров охладителя СПДС мощностью 1 кВт с целью использования их в качестве исходных данных для расчетно-экспериментальных исследований.
3. Разработать испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований с целью получения первичной оценки влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на эффективность теплоотвода.
4. Разработать расчетную модель процессов теплообмена и гидродинамики, исследуемых на испытательном стенде для численного моделирования течения рабочего тела в охладителе с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Провести валидацию расчетной модели на основе экспериментальных исследований с целью проведения расчетных исследований во всем диапазоне режимов работы охладителя СПДС.
5. Разработать расчетную трехмерную модель реальной конструкции охладителя СПДС для численного моделирования течения рабочего тела в охладителе с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent и исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на эффективность теплоотвода.
6. Выполнить анализ влияния разработанного метода на технико-экономические показатели СПДС.
7. Спроектировать конструкцию охладителя СПДС с реорганизованным течением рабочего тела.

Научная новизна заключается в:

- разработке метода совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе с целью улучшения технико-экономических показателей СПДС.
- создании расчетно-экспериментальной методики исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и технико-экономических показателей СПДС.
- разработке методики определения геометрических параметров исследуемых теплообменников, имеющих в качестве основного элемента конструкции сложенные медные ребра. Внесены соответствующие изменения в используемую математическую модель второго порядка, реализованную в среде Matlab для проведения начальной расчетной оценки технико-экономических показателей СПДС.
- разработке расчетных моделей с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent для исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода.
- результатах расчетно-экспериментальных исследований влияние реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и технико-экономических показателей СПДС.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в:

- разработанной расчетно-экспериментальной методики исследования реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и технико-экономических показателей СПДС.
- созданном испытательном стенде для проведения исследований влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на эффективность теплоотвода и для валидации разработанной расчетной модели с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent.

- разработанных расчетных моделях с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent с учетом процессов теплообмена и гидродинамики, исследованных на испытательном стенде и в реальной конструкции охладителя СПДС.
- установленных соотношениях влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на технико-экономические показатели СПДС.

Методология и методы исследования. Расчетно-экспериментальная методика исследования реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и технико-экономических показателей СПДС включает несколько этапов. Определение рабочих параметров охладителя СПДС выполнено с использованием методов расчета второго порядка в среде Matlab. Полученные результаты используются в качестве исходных данных для расчетно-экспериментальных исследований. Создается испытательный стенд для первоначальной оценки влияния реорганизации течения рабочего тела на эффективность теплоотвода в охладителе, а также для валидации расчетной модели процессов теплообмена и гидродинамики, исследуемых на испытательном стенде. Для проведения исследований влияния разработанного метода на эффективность теплоотвода, создаются в среде ANSYS Fluent расчетные модели процессов теплообмена и гидродинамики, исследуемых на испытательном стенде и трехмерной модели реальной конструкции охладителя СПДС с реорганизованным течением. Результаты расчетных исследований анализируются и представляется влияние предлагаемого метода совершенствования охладителя на технико-экономические показатели СПДС. В результате проведенных исследований представлен проект конструкции охладителя с реорганизованным течением.

Объектом исследования является СПДС мощностью 1 кВт. Для валидации расчетных исследований использовался разработанный испытательный стенд.

Предметом исследования является совершенствование системы охлаждения СПДС за счет реорганизации течения рабочего тела в охладителе с целью улучшения технико-экономических показателей СПДС.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе с целью улучшения технико-экономических показателей СПДС;
- Расчетно-экспериментальная методика исследования реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС;
- Результаты расчетно-экспериментальных исследований.

Степень достоверности и апробация результатов научных положений и полученных результатов обусловлены:

- корректной постановкой задач, использованием теории теплообмена, применением численных методов.
- качественным совпадением расчетных и экспериментальных данных по параметрам улучшения теплоотвода при реализации разработанного метода.

Теоретические и расчетные результаты, полученные в данной работе приняты для внедрения в программах НИОКР ООО «Наука-Энерготех» по автономным источникам питания на базе свободнопоршневого двигателя Стирлинга «ЭВОГРЕСС»; Получен патент на изобретение концепции конструкции охладителя СПДС с реорганизованным течением рабочего тела в охладителе.

Основные результаты диссертационных исследований были представлены на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- Международная научно-техническая конференция 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса (МАДИ, 2019 г.).
- Международная научно-практическая конференция «Технологии машиностроения, энергетики и наземного транспорта» (РУДН, 2020 г.).
- Международная конференция MIST: Aerospace-III 2020: Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации (Красноярск, 2020 г.)

- Всероссийская научно-техническая конференция «Ракетно-Космические Двигательные Установки» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020 г.).
- 19-я Международная конференция по двигателям Стирлинга (Италия, 2021 г.).
- Семинар «Совершенствование технико-экономических показателей двигателя Стирлинга» (РУДН, 2021 г.).
- Международная научно-практическая конференция имени Н. Д. Кузнецова "Перспективы развития двигателестроения" (Самарский университет, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них опубликовано: в международной базе цитирования Scopus/Web of Science – 6/1, а также 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы. Объем диссертации составляет 189 страниц основного текста, содержащего 13 таблиц и 115 рисунков, список литературы содержит 114 работы отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации обоснована актуальность исследуемой темы, проведен анализ работ отечественных и зарубежных исследователей. На основании проведенного анализа были сформированы основные задачи и цель исследования.

Двигатель Стирлинга (ДС) – это тепловая машина, работающая по замкнутому термодинамическому циклу, в которой циклические процессы сжатия и расширения происходят при различных уровнях температур, а управление потоком рабочего тела осуществляется путем изменения его объема. Свободнопоршневой двигатель Стирлинга (СПДС) в настоящее время считается наиболее перспективной и надежной конфигурацией.

СПДС отличается простой механической конструкцией, состоящей в основном из двух движущихся частей (поршень и вытеснитель), размещенных в общем цилиндре (Рисунок 1). Такая конструкция способствует повышению надежности работы двигателя. Также, СПДС обеспечивает высокий механический и электрический КПД и обеспечивает прямую выходную электрическую мощность переменного тока за счет использования встроенного линейного генератора переменного тока с постоянными магнитами.

Для определения технико-экономических показателей (ТЭП) ДС и исследование влияния параметров ДС на его мощностные и экономические показатели разработаны различные термодинамические математические модели рабочего цикла ДС разного порядка сложности. Использование математической модели второго порядка совместно с CFD-моделированием в среде ANSYS Fluent для математического моделирования рабочего цикла СПДС и процессов теплообмена считается эффективным подходом для экономии ресурсов и преодоления экспериментальных ограничений при исследовании СПДС.

К основным факторам, влияющим на ТЭП ДС можно отнести:

1. Параметры состояния рабочего тела: максимальная и минимальная температура; давление; физико-химические показатели рабочего тела.
2. Особенности элементов конструкции:
 - движущиеся детали (поршень, вытеснитель);

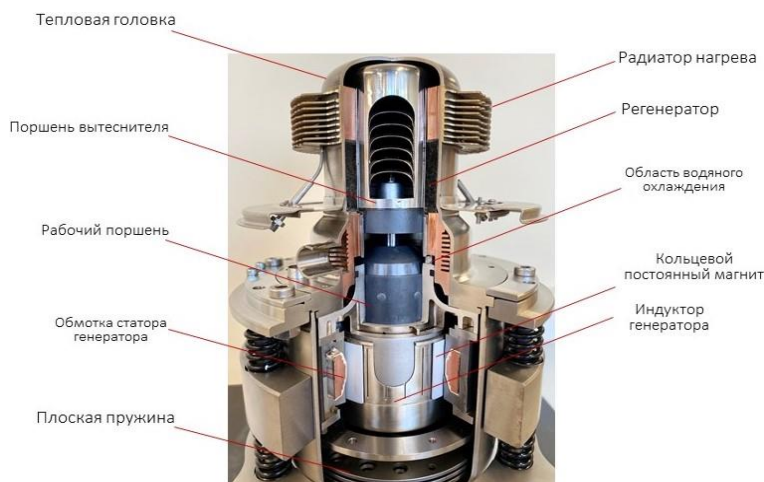


Рисунок 1 - СПДС мощностью 1 кВт

Источник: ООО «Наука-Энерготех»

- теплообменные аппараты (нагреватель; регенератор; охладитель) и связанный с ними мертвый объем в ДС.

Охладителям ДС уделяется относительно меньше внимания исследователей по сравнению с нагревателями и регенераторами, несмотря на их влияние на ТЭП ДС. Вклад в исследование улучшения теплоотвода в охладителях ДС и влияния мертвого объема на работу ДС в России и за рубежом внесли: Столяров С.П., Савченко В.А., F., Gupte A., Dehghan A., Kanzaka M., Alfarawi S., Kuosa M., Sneft J., Hasanovich L., Feng X. и Nobes D..

Разработка эффективного охладителя приведет к улучшению ТЭП ДС, особенно с учетом минимизации мертвого объема двигателя при сохранении высокой эффективности теплообменника. Мертвый объем определяется как объем, занимаемый рабочим газом в ДС и не участвующий в процессах объемного расширения и сжатия. Теплообменники (нагреватель, охладитель и регенератор) в ДС способствуют увеличению мертвого объема.

Для количественной оценки величины мертвого объема в ДС используется коэффициент мертвого объема (X). Коэффициент X определяется как отношение общего мертвого объема ($V_{\text{мерт.}}$) к рабочему объему вытеснителя ($V_{\text{выт.}}$):

$$X = \frac{V_{\text{мерт.}}}{V_{\text{выт.}}} \quad (1)$$

Совершенствование охладителя СПДС, направленное на уменьшение мертвого объема при сохранении его высокой эффективности, является одним из перспективных направлений улучшения работы СПДС.

Количество теплоты, отводимой в охладителе, можно определить по следующей формуле:

$$Q = \alpha \cdot A (T_{\text{ст.}} - T_{\text{ож}}), \text{ Вт} \quad (2)$$

Где

Q – Тепловой поток, передаваемый в охлаждающую жидкость, Вт;

α – Коэффициент теплоотдачи, Вт/м²*К;

A – Площадь поверхности теплообмена между охлаждающей жидкостью и стенкой охладителя, м²;

$T_{\text{ст.}}, T_{\text{ож}}$ – Средняя температура стенки и средняя температура охлаждающей жидкости, К.

Основными направлениями для увеличения теплоотвода в охладителе являются:

1. Увеличение площади поверхности теплообмена;
2. Увеличение коэффициента теплоотдачи;
3. Увеличение температурного перепада между стенкой и жидкостью в охладителе.

Исследования по совершенствованию системы охлаждения ДС в основном проводятся в первых двух направлениях: разработка конструкций, увеличивающих поверхность теплообмена, а также улучшающих циркуляцию рабочего тела внутри теплообменника. При этом рассматриваются используемые в настоящее время конструкции охладителей, в которых течение рабочего тела происходит попеременно в прямом и обратном направлениях в одних тех же каналах.

Перспективным подходом для поддержания максимально возможной разницы температур, является совершенствование конструкции охладителя за счет реорганизации течения рабочего тела на основе разделения потоков рабочего тела в зависимости от направления движения в охладителе. Данное совершенствование охладителя ДС позволит повысить эффективность теплоотвода и, следовательно, уменьшить размеры охладителя и мертвый объем ДС, понизить минимальную температуру рабочего цикла, что улучшит ТЭП ДС.

Целью диссертации является разработка метода совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС с целью улучшения его ТЭП.

Во второй главе приводится разработанный метод совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС. Предложена расчетно-экспериментальная методика исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и ТЭП СПДС. Выполнено математическое моделирование индикаторного процесса СПДС в среде Matlab с использованием методов расчета второго порядка для определения рабочих параметров охладителя СПДС, а также проведено численное моделирование процессов теплообмена при течении рабочего тела в охладителе СПДС с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent.

В текущих конструкциях охладителя СПДС, рабочее тело (гелий), выходящее из регенератора и протекающее через охладитель, отдает тепло охлаждающей жидкости (вода), постоянно циркулирующей в рубашке охлаждения, и направляется в объем с минимальной температурой (в зону сжатия). Затем рабочее тело поступает обратно в охладитель (по тому же каналу) с более низкой температурой, в процессе теплообмена, температуры стенки охладителя уменьшается и, следовательно, это приводит к уменьшению градиента температуры между стенкой и водой в рубашке охлаждения.

Для увеличения теплового потока, отводимого от рабочего тела в охладителе, предлагается метод совершенствования охладителя СПДС, основанного на поддержании более высокой температуры стенки охладителя за счет реорганизации течения рабочего тела в охладителе (Рисунок 2). Охладитель разделяется на две группы каналов: первая группа для течения рабочего тела из регенератора в зону сжатия, приближенным к рубашке охлаждения; вторая группа (того же размера, что и каналы первой группы) для течения рабочего тела из зоны сжатия обратно в зону расширения, удаленным от рубашки охлаждения.

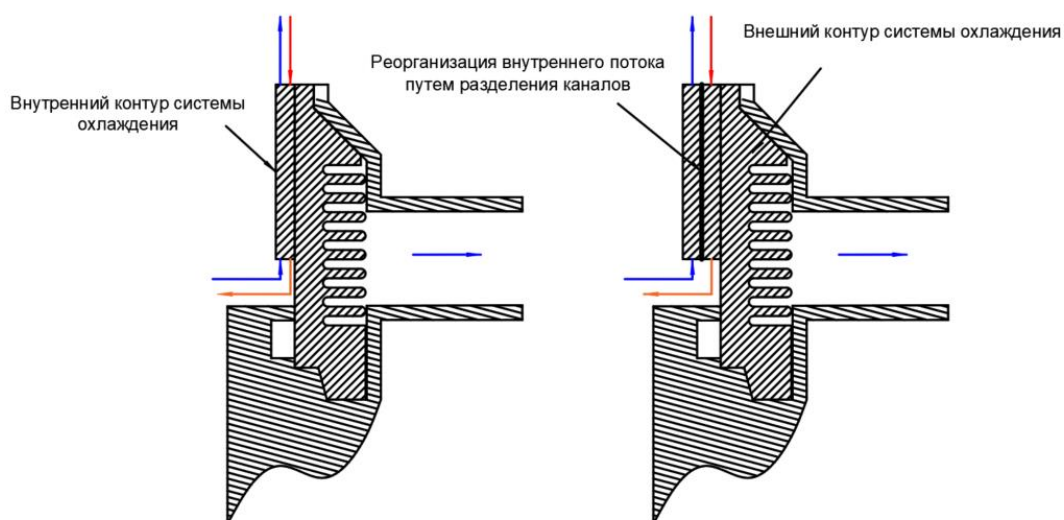


Рисунок 2 - Принципиальная схема предлагаемого метода реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС

Источник: составлено автором

Для реализации предложенного способа совершенствования охладителя СПДС был разработан метод, включающий расчетно-экспериментальную методику исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на теплоотвод и ТЭП СПДС с последующими исследованиями и проектированием.

Расчетно-экспериментальная методика включает четыре основных этапа (Рисунок 3):

1. Математическое моделирование рабочего цикла СПДС;
2. Экспериментальное исследование с проведением валидации расчетной модели охладителя;
3. Численное моделирование с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent и расчетное исследование;
4. Анализ влияния предложенного метода совершенствования системы охлаждения на ТЭП СПДС.

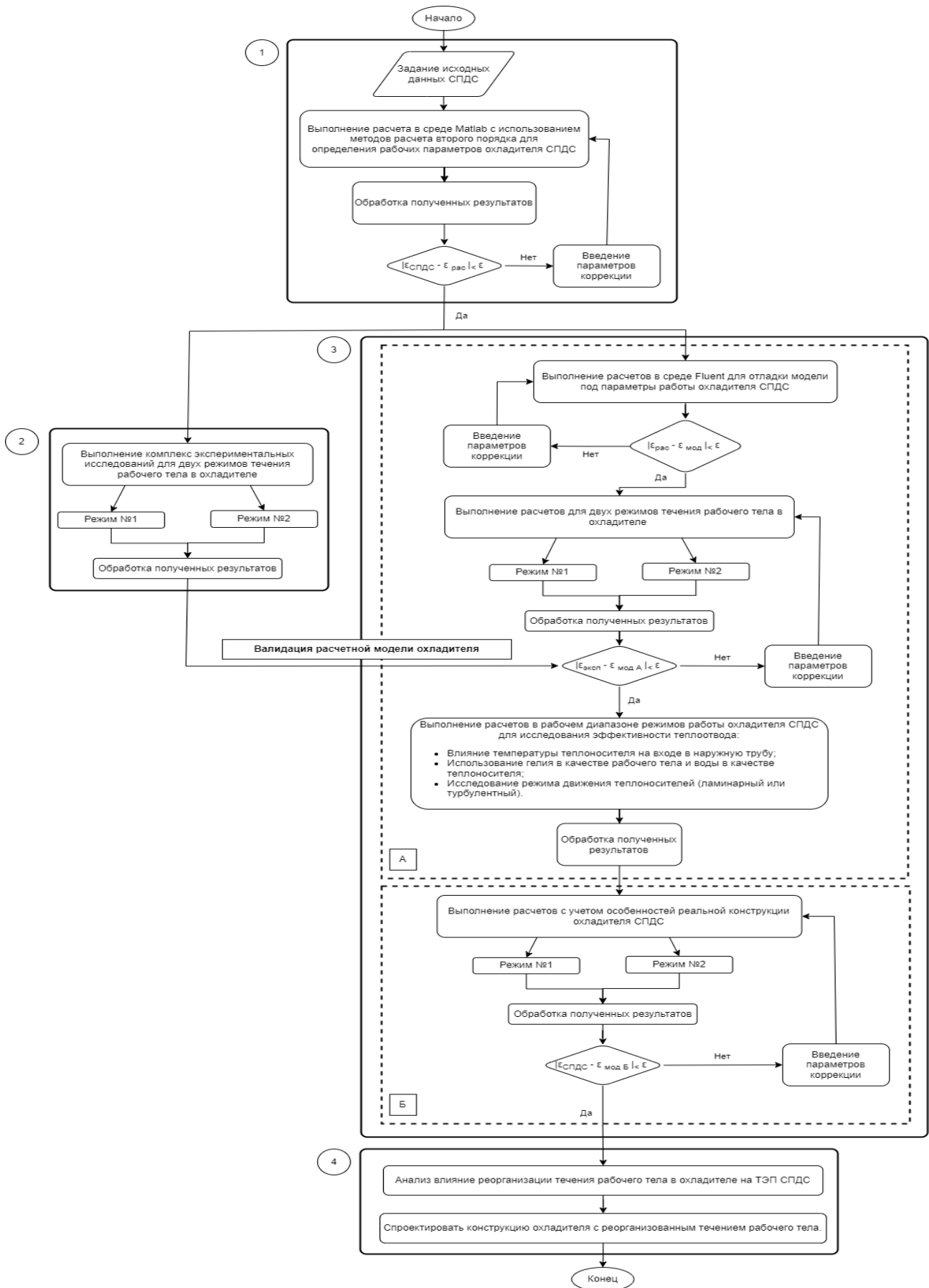


Рисунок 3 - Блок-схема методики исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС

Источник: составлено автором

Определение параметров рабочего тела в охладителе СПДС (режим течения и средняя температура рабочего тела в охладителе) выполнено с использованием методов расчета второго порядка в среде Matlab. Полученные результаты используются в качестве исходных данных для расчетно-экспериментальных исследований.

Для исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на величину теплоотвода на отдельных режимах течения рабочего тела и для валидации расчетной модели, создан специализированный испытательный стенд для проведения комплекса экспериментальных исследований. В качестве теплообменника экспериментальной установки использовался двухтрубный теплообменник. В конструкции стенда предусматривается возможность исследования двух режимов течения рабочего тела:

- Режим №1 - попеременное течение в прямом и обратном направлениях в одном канале (действующая конструкция охладителя СПДС);
- Режим №2 – течение только в одном направлении (на основе предложенного метода).

Полученные результаты экспериментальных исследований обрабатываются и анализируются, и далее используются для валидации расчетной двухтрубной модели охладителя, учитывающей процессы теплообмена и гидродинамики при течении рабочего тела в охладителе с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Численное моделирование разделено на два этапа.

На первом этапе (А на блок схеме – Рисунок 3) создается расчетная двухтрубная модель охладителя для исследования процессов теплообмена подобная конструкции, исследуемой на испытательном стенде. Полученные расчетные результаты сравниваются с экспериментальными результатами и при их количественном расхождении вводятся корректирующие параметры для повышения точности модели. После валидации расчетной модели, проводятся расчетные исследования в диапазоне режимов работы охладителя СПДС, которые выходят за пределы возможностей моделирования на испытательном стенде, с последующим анализом результатов.

На втором этапе (Б на блок схеме – Рисунок 3) создается расчетная трехмерная модель процессов теплообмена и гидродинамики с учетом особенностей реальной конструкции охладителя СПДС. Далее проводятся расчетные исследования для двух режимов течения на номинальном режиме работы СПДС (50 Гц) с последующим анализом результатов. Полученные расчетные результаты сравниваются с опытными данными по температуре воды на выходе из рубашки охлаждения и количеству отводимого тепла, полученными на реальной конструкции СПДС мощностью 1 кВт и при их количественном расхождении вводятся корректирующие параметры для повышения точности модели.

На заключительном этапе (4 на блок схеме – Рисунок 3) на основе полученных расчетно-экспериментальных результатов анализируется влияние реорганизации течения рабочего тела в охладителе на ТЭП СПДС за счет снижения мертвого объема СПДС при уменьшении размеров охладителя и возможного уменьшения минимальной температуры в СПДС. В результате разработанного метода совершенствования системы охлаждения СПДС и проведенных исследований представляется конструкция охладителя с реорганизованным течением рабочего тела.

При математическом моделировании индикаторного процесса СПДС в среде Matlab была разработана методика определения геометрических параметров исследуемых теплообменников, имеющих в качестве основного элемента конструкции сложенные медные ребра. Были внесены соответствующие изменения в используемую математическую модель второго порядка, реализованную в среде Matlab для проведения начальной расчетной оценки технико-экономических показателей СПДС.

В результате расчетов в среде Matlab были получены рабочие параметры охладителя СПДС, которые сложно получить экспериментально. Режим течения в охладителе характеризовался средним числом Рейнольдса $Re_{cp} \approx 1000$. Средняя температура рабочего тела в охладителе была определена равной ≈ 55 °С. Эти параметры использовались в качестве исходных

данных для расчетно-экспериментальных исследований предлагаемого метода реорганизации течения рабочего тела в охладителе.

Численное моделирование процессов теплообмена и гидродинамики, исследуемых на испытательном стенде и соответствующей двухтрубной модели охладителя, а также трехмерной модели реальной конструкции охладителя СПДС с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent, выполнялись с применением основных уравнений, таких как закон сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнения $k-\varepsilon$ модели турбулентности. За счет симметричной конструкции рассматриваемого теплообменника на испытательном стенде и охладителя СПДС, расчетная область была сокращена наполовину для уменьшения вычислительных ресурсов.

Сначала расчетные исследования были проведены на двухтрубной модели (Рисунок 4) с целью определения эффективности предлагаемого метода для улучшения теплоотвода в охладителе. Все геометрические параметры и начальные условия соответствовали аналогичным параметрам, задаваемых на испытательном стенде. После

валидации двухтрубной расчетной модели для оценки влияния на величину теплоотвода предлагаемой реорганизации течения рабочего тела в среде ANSYS Fluent проводились исследования влияния температуры теплоносителя на входе в наружную трубу; использования гелия в качестве рабочего тела и воды в качестве охлаждающей жидкости и режимов движения рабочего тела и теплоносителя (ламинарный или турбулентный).

Для уточнения количественной оценки эффективности предлагаемого метода улучшения теплоотвода в охладителе и возможности применения предлагаемого метода на практике проводились исследования на трехмерной модели охладителя СПДС.

При моделировании охладителя СПДС использовалась пористая модель. Пористая среда моделируется путем добавления источника импульса, состоящего из двух членов (вязких потерь и инерционных потерь) к уравнениям течения жидкости. Стандартное уравнение сохранения энергии в областях пористых сред решается с модификациями только параметров теплопроводности и переходных составляющих, учитывающих тепловую инерцию твердой области среды.

Расчетные исследования выполнялись для двух режимов течения рабочего тела в охладителе на номинальном режиме работы СПДС мощностью 1 кВт (50 Гц). Для исследования теплоотвода в охладителе СПДС при режиме №1 и режиме №2 были разработаны две трехмерные модели (Рисунок 5).

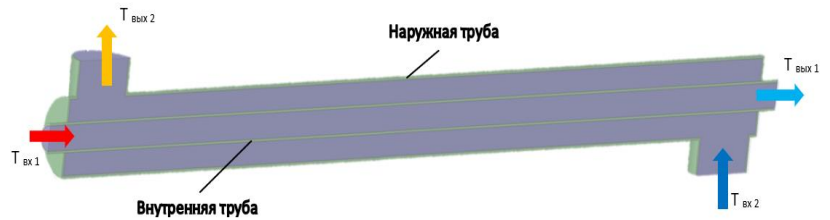


Рисунок 4 - Двухтрубная модель охладителя

Источник: составлено автором

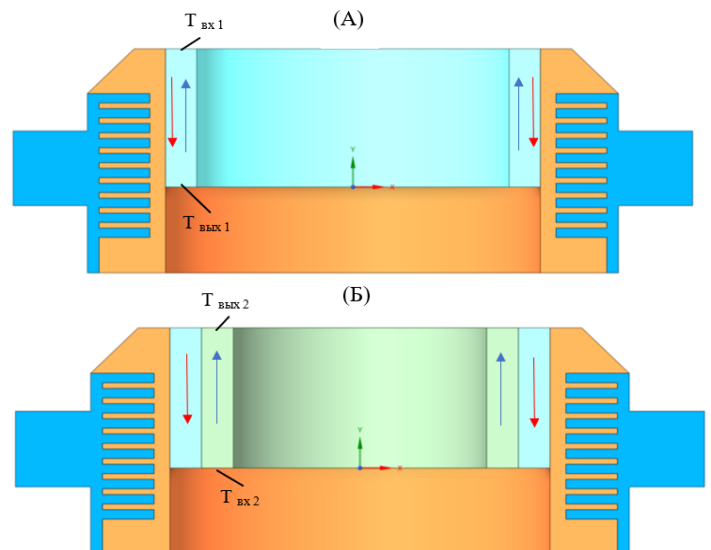


Рисунок 5 - Трехмерные модели текущей конструкции охладителя СПДС (А - режим №1) и предлагаемой конструкции охладителя с реорганизованным течением (Б - режим №2).

Источник: составлено автором

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований на разработанном специализированном испытательном стенде для определения эффективности теплоотвода за счет реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС. На основе экспериментальных данных проводится валидация двухтрубной расчетной модели охладителя, реализованной в среде ANSYS Fluent.

При разработке конструкции стенда предусматривалась возможность исследования двух режимов течения рабочего тела (Режим №1 - попеременное течение в прямом и обратном направлениях в одном канале (действующая конструкция охладителя СПДС) и Режим №2 - течение только в одном направлении (на основе предложенного метода)). В качестве теплоносителя использовался воздух. Материал внутренней трубы — медь, в соответствии с охладителем СПДС.

Испытательный стенд и схема стенда показаны на рисунке 6 и рисунке 7, соответственно. Воздух в ресивер подается воздуходувкой, где поток равномерно распределяется установленной внутри ресивера решеткой перед направлением на мерные сопла. Подачу воздуха из воздуходувки и величину напора можно регулировать с помощью регуляторов-дросселей.

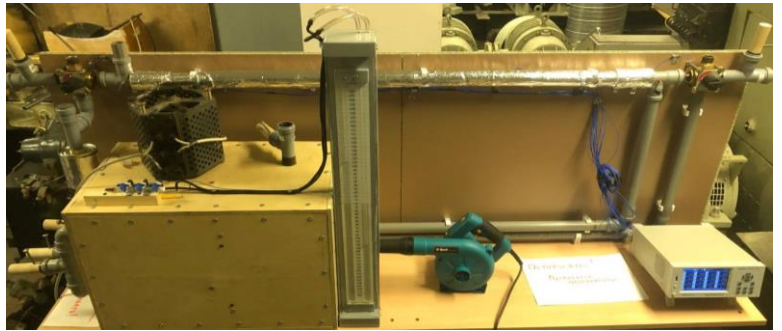


Рисунок 6 - Испытательный стенд

Источник: составлено автором

Из ресивера выходят три мерных сопла. Сопла созданы на 3D принтере по формуле Витошинского. Профиль сопла обеспечивает в минимальном сечении сопла постоянный профиль скоростей потока воздуха. В минимальном сечении сопла в кольцевом зазоре регистрируется статическое давление потока воздуха. Таким образом, мы обеспечиваем измерение расхода воздуха, зная перепад давления на входе и в минимальном сечении сопла. Измерение перепада давления производится с помощью манометра для всех 3 мерных сопел.

После каждого сопла воздух поступает к трем разным элементам (Рисунок 7). Из сопла №3 воздух поступает в нагревательный элемент, где нагревается до необходимой температуры, после чего поступает на вход внутренней медной трубы. В обоих режимах (Режим №1 и Режим №2) используется нагретый воздух из сопла. Из сопла №2 воздух поступает на вход наружной трубы. Через второе сопло непрерывно подается воздух в течение всего времени проведения эксперимента для обоих режимов. Из сопла №1 воздух поступает к выходу внутренней медной трубы. Воздух из этого сопла входит во внутреннюю медную трубу только при режиме №1. В режиме №2 воздух из сопла №1 через 4-ходовой переключатель поступает в атмосферу.

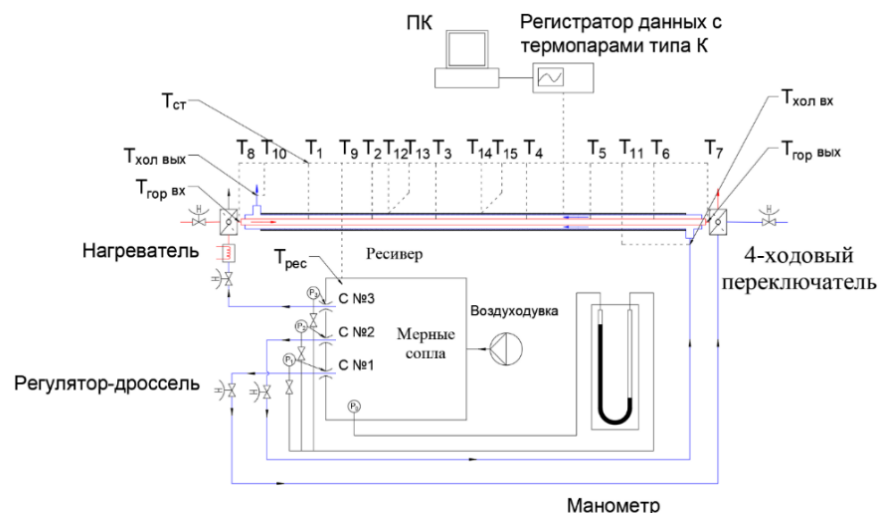


Рисунок 7 - Принципиальная схема испытательного стенда

Источник: составлено автором

Переключение потока при обоих режимах осуществлялось двумя переключателями, установленными на обоих концах внутренней медной трубы. Переключение производилось через определенный промежуток времени в режимах №1 и №2. Регистратор температуры фиксирует

измерения температуры одновременно в 16 точках с помощью термопар типа – К для дальнейшей обработки после эксперимента.

Для корректной оценки теплоотвода от внутренней трубы основным показателем оценки улучшения считался средний тепловой поток от наружной трубы:

$$Q_{\text{нар}} = \dot{M}_{\text{нар}} \cdot c_{p\text{нар}} (T_{\text{вых, нар}} - T_{\text{вх, нар}}) \quad (3)$$

Где

$Q_{\text{нар}}$ – тепловой поток в наружной трубе, Вт;

$\dot{M}_{\text{нар}}$ – массовый расход теплоносителя в наружной трубе, кг/с;

$c_{p\text{нар}}$ – теплоёмкость теплоносителя в наружной трубе, Дж/кг*К;

$T_{\text{вых, нар}}, T_{\text{вх, нар}}$ – температура теплоносителя на выходе и входе, К.

Данный подход был выбран, потому что течение в наружной трубе было постоянным в течение всего процесса, в отличие от колебательного течения внутри медной трубы.

Полученные результаты показали, что средняя температура стенки по внутренней трубе выше в режиме № 2 по сравнению с режимом № 1 на ≈ 1 °С (Рисунок 8).

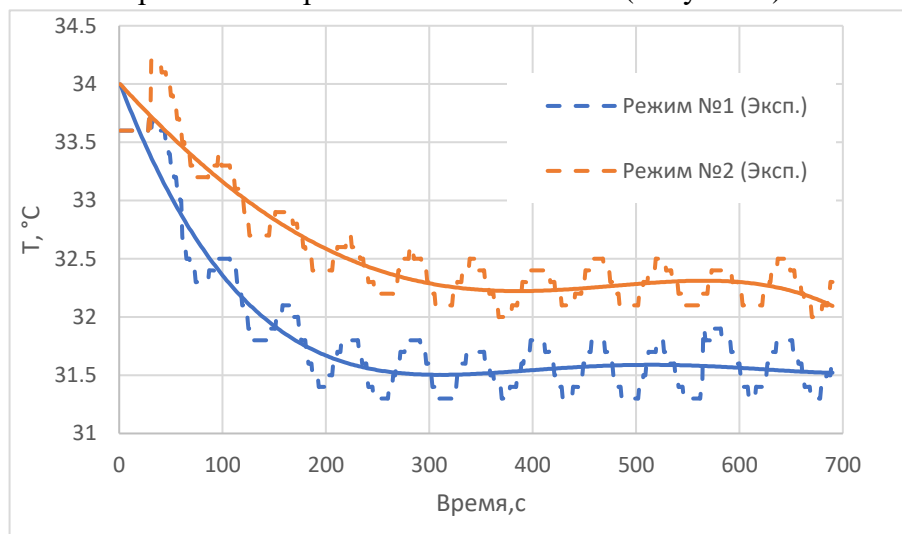


Рисунок 8 - График изменения температуры воздуха на выходе из наружной трубы по времени

Источник: составлено автором

Более высокая средняя температура стенки вдоль внутренней трубы приводит к большей разнице температур между рабочим телом и теплоносителем в наружной трубе, что привело к увеличению отвода теплоты до 17 % (Рисунок 9) при режиме №2 (предлагаемый способ реорганизации течения в охладителе).

В четвертой главе приведены результаты расчетных исследований при численном моделировании с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent для исследуемого СПДС. Проведена валидация двухтрубной расчетной модели охладителя на основе экспериментальных исследований. Выполнены исследования влияния на эффективность теплоотвода различных параметров течения рабочего тела и охлаждающей жидкости за пределами рабочего диапазона испытательного стенда. Для уточнения количественной оценки эффективности теплоотвода с помощью предложенного метода и

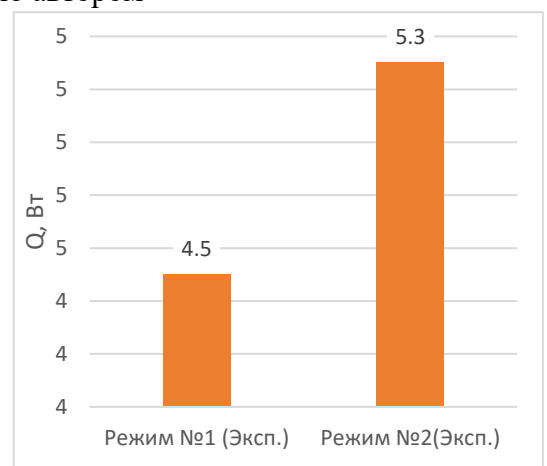


Рисунок 9 - Сравнение теплоотвода из наружной трубы для режимов №1 и №2 при $T_{\text{вх, нар}} = 30$ °С.

Источник: составлено автором

возможности применения на практике, проведены исследования на трехмерной модели охладителя СПДС. Выполнена оценка эффективности предложенного метода на ТЭП СПДС и предложена конструкция охладителя с реорганизованным течением.

Численное моделирование процессов теплообмена и гидродинамики в охладителе для тестовой задачи, исследуемой на испытательном стенде выполнено с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Все геометрические параметры и начальные условия соответствовали аналогичным параметрам, задаваемых на испытательном стенде.

Результаты расчетных исследований тестовой задачи, показали такой же характер изменения температур стенки внутренней трубы, как и в экспериментальных исследованиях (Рисунок 10). Увеличение теплоотвода составило $\approx 22\%$ по сравнению с полученными в ходе эксперимента $\approx 17\%$. Такое отклонение обусловлено погрешностью эксперимента и неизбежными потерями тепла при проведении эксперимента.

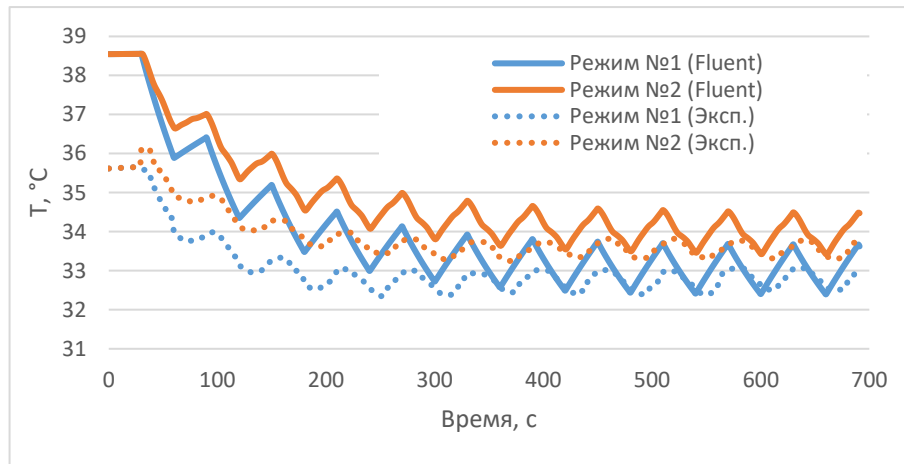


Рисунок 10 - График изменения средней температуры стенки внутренней трубы по времени ($T_{\text{вх нар}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Источник: составлено автором

После валидации расчетной модели проводились следующие исследования:

1. Влияние температуры теплоносителя на входе в наружную трубу;
2. Использование гелия под давлением 3 МПа в качестве рабочего тела и воды в качестве охлаждающей жидкости;
3. Исследование режима движения рабочего тела и теплоносителя (ламинарный или турбулентный).

Результаты расчетов с различной температурой на входе в наружную трубу показали, что среднее увеличение теплоотвода для различных температур на входе в наружную трубу составляет $\approx 19 - 20\%$ (Рисунок 11).

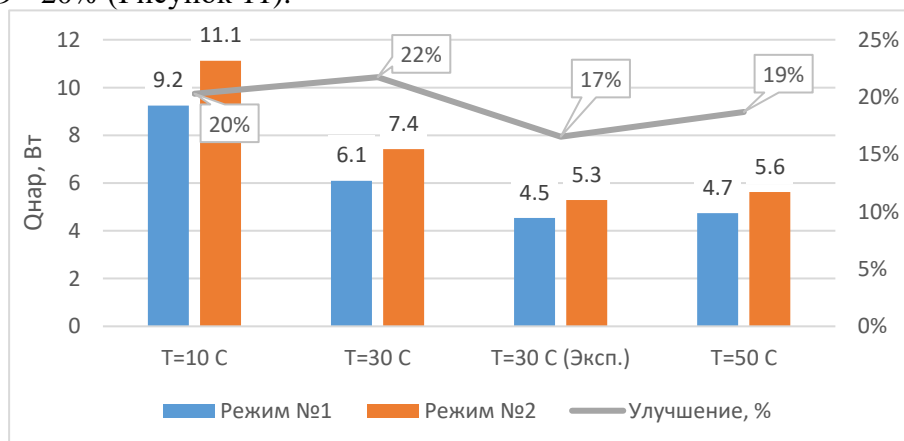


Рисунок 11 - Сравнение отвода тепла ($T_{\text{вх нар}}=10/30/50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Источник: составлено автором

По результатам проведенного исследования влияния режимов течения рабочего тела (гелия) и охлаждающей жидкости (воды) на эффективность теплоотвода (Рисунок 12) было установлено, что:

- при любых режимах течения рабочего тела и охлаждающей жидкости предлагаемая реорганизация течения рабочего тела в охладителе (режим течения №2) позволяет улучшить теплоотвод.
- наибольший теплоотвод наблюдается при турбулентных течениях рабочего тела и охлаждающей жидкости ($Re_{внут}=5000$, $Re_{нар}=10000$). По сравнению с вариантом ламинарного течения рабочего тела и турбулентным охлаждающей жидкости ($Re_{внут}=1000$, $Re_{нар}=10000$) наблюдаются наилучшие значения по улучшению теплоотвода (22%) ($Re_{внут}=5000$, $Re_{нар}=10000$).
- при ламинарном течении охлаждающей жидкости величина теплоотвода уменьшается. При этом эффективность от реорганизации течения рабочего тела (режим течения №2) будет наибольшей.

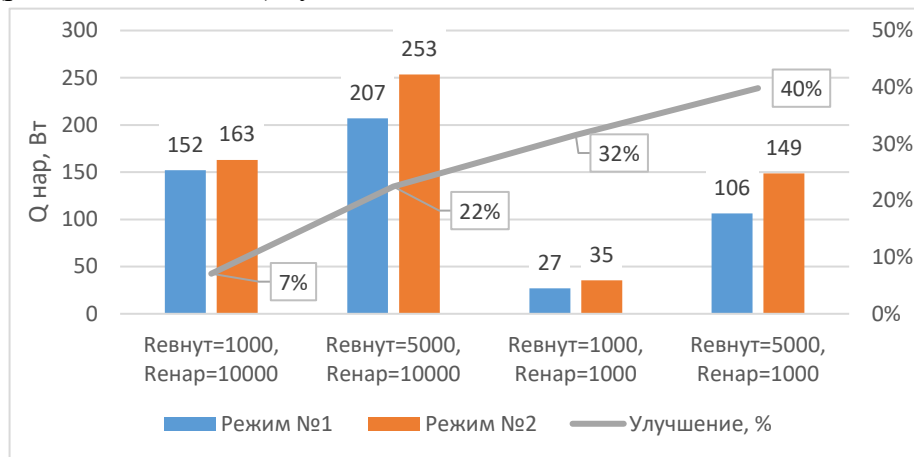


Рисунок 12 - Результаты исследования влияния режимов течения рабочего тела (гелия) и охлаждающей жидкости (воды) на эффективность теплоотвода

Источник: составлено автором

Проведенные исследования на двухтрубной тестовой модели позволили определить эффективность предложенного метода для улучшения теплоотвода в охладителе. Для уточнения количественной оценки эффективности и возможности применения предлагаемого метода на практике проводились исследования на трехмерной модели охладителя СПДС (Рисунок 5).

В расчетах при режиме №2 рассматривались два варианта теплообмена между каналами:

- Адиабатическая стенка, в которой не учитывается теплообмен между каналами.
- Неадиабатическая медная стенка толщиной 3 мм для оценки эффекта теплопередачи через стенку между каналами.

Полученные результаты показали увеличение теплоотвода при режиме № 2 с адиабатической стенкой между каналами на $\approx 80\%$, а увеличение теплоотвода при режиме № 2 с неадиабатической стенкой на $\approx 40\%$. Данное снижение ожидаемо и обусловлено теплообменом между каналами. Часть тепла, которая должна была передаваться воде, передается гелию, вытекающему из зоны сжатия во втором канале.

Предложенный метод совершенствования системы охлаждения СПДС направлен на увеличение теплоотвода в систему охлаждения. Это позволяет снизить минимальную температуру рабочего тела и уменьшить размер охладителя при сохранении количества отводимого тепла, что, в свою очередь, снижает мертвый объем в СПДС.

Результаты, полученные при расчете индикаторного процесса СПДС с использованием математической модели второго порядка, реализованной в среде Matlab (Рисунок 13 и Рисунок 14), показали влияние изменения средней температуры в зоне сжатия на КПД и выходную мощность при постоянной максимальной температуре в СПДС $T_{\max}=500$ °С.

Необходимо отметить, что уменьшение средней температуры в зоне сжатия и изменение функционирования охладителя безусловно отразится на работе регенератора и температуре в объеме расширения с максимальной температурой. Для поддержания максимальной температуры $T_{\text{макс}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ необходимо увеличить подвод тепла в нагревателе.

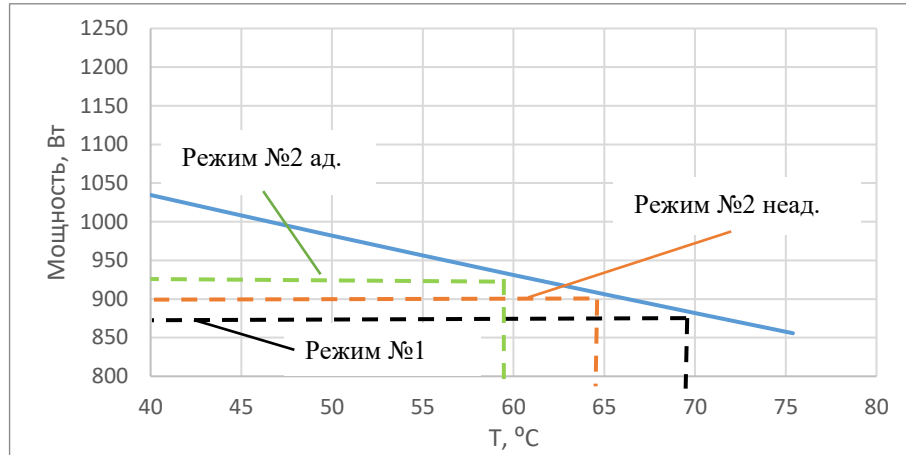


Рисунок 13 - Изменение выходной мощности в зависимости от средней температуры в зоне сжатия при $T_{\text{макс}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Источник: составлено автором

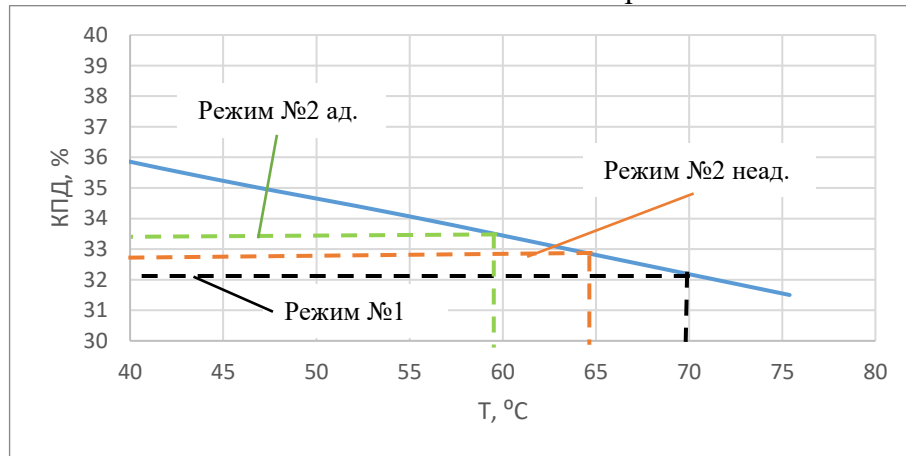


Рисунок 14 - Изменение КПД в зависимости от средней температуры гелия в зоне сжатия при $T_{\text{макс}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Источник: составлено автором

Температура гелия на выходе из охладителя в сторону зоны сжатия показала уменьшение на $\approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$ при режиме №2 с адиабатической стенкой и на $\approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$ при режиме №2 с неадиабатической стенкой по сравнению с режимом №1. Это позволит увеличить выходную мощность и КПД:

- Режим №2 с адиабатической стенкой:
 - Выходная мощность увеличивается на $\approx 60 \text{ Вт}$.
 - КПД увеличивается на $\approx 1,2\%$.
- Режим №2 с неадиабатической стенкой:
 - Выходная мощность увеличивается на $\approx 30 \text{ Вт}$.
 - КПД увеличивается на $\approx 0,6\%$.

Одним из определяющих параметров при оценке теплоотвода в теплообменниках является коэффициент теплопередачи между рабочим телом и охлаждающей жидкостью через стенку охладителя k . Увеличение коэффициента теплопередачи k позволяет увеличить теплоотвод и, следовательно, уменьшить размеры охладителя, например, его длину. Охладитель будет отводить такое же количество тепла при меньших размерах.

Для рассматриваемых двух режимов течения, отношение $k_{№2}$ к $k_{№1}$ может рассматриваться, как коэффициент улучшения теплоотвода:

$$E = \frac{k_{№2}}{k_{№1}} \quad (4)$$

Коэффициент улучшения теплоотвода при режиме №2 с адиабатической стенкой и с неадиабатической стенкой составил $E = 1,8$ и $E = 1,4$, соответственно.

Для оценки влияния уменьшения габаритов охладителя при постоянной тепловой нагрузке и поддержании постоянной разницы температур в СПДС на коэффициент мертвого объема и индикаторную мощность используется относительный коэффициент мертвого объема (\bar{X}) и относительная индикаторная мощность (\bar{N}) (Рисунок 15 и Рисунок 16).

Относительный коэффициент мертвого объема:

$$\bar{X} = \frac{X_n}{X_{ном}} = \frac{V_{мерт.n}}{V_{мерт.ном}} \quad (5)$$

Где

$X_{ном}$ – Коэффициент мертвого объема с учетом текущих размеров охладителя СПДС;

X_n – Коэффициент мертвого объема после изменения размеров охладителя СПДС.

Относительная индикаторная мощность:

$$\bar{N} = \frac{N_n}{N_{ном}} \quad (6)$$

Где

$N_{ном}$ – Индикаторная мощность с учетом текущих размеров охладителя СПДС;

N_n – Индикаторная мощность после изменения размеров охладителя СПДС.

Значения \bar{X} и \bar{N} введены для представления степени влияния улучшения эффективности теплоотвода на возможность последующего уменьшения мертвого объема и увеличения индикаторной мощности при реорганизации течения рабочего тела в охладителе.

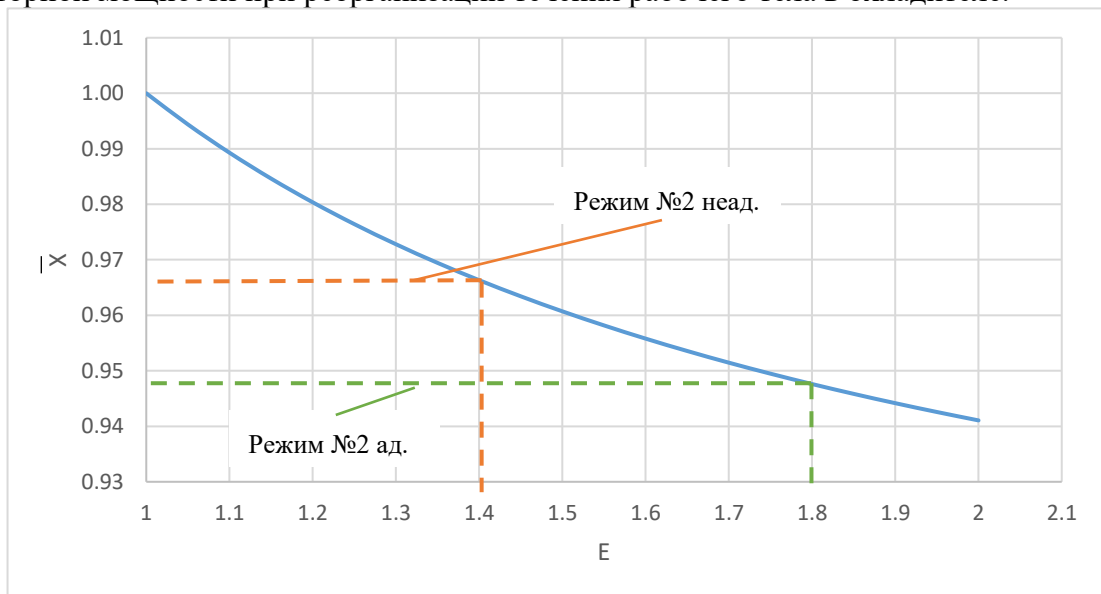


Рисунок 15 - Зависимость относительного коэффициента мертвого объема (\bar{X}) СПДС от коэффициента улучшения E

Источник: составлено автором

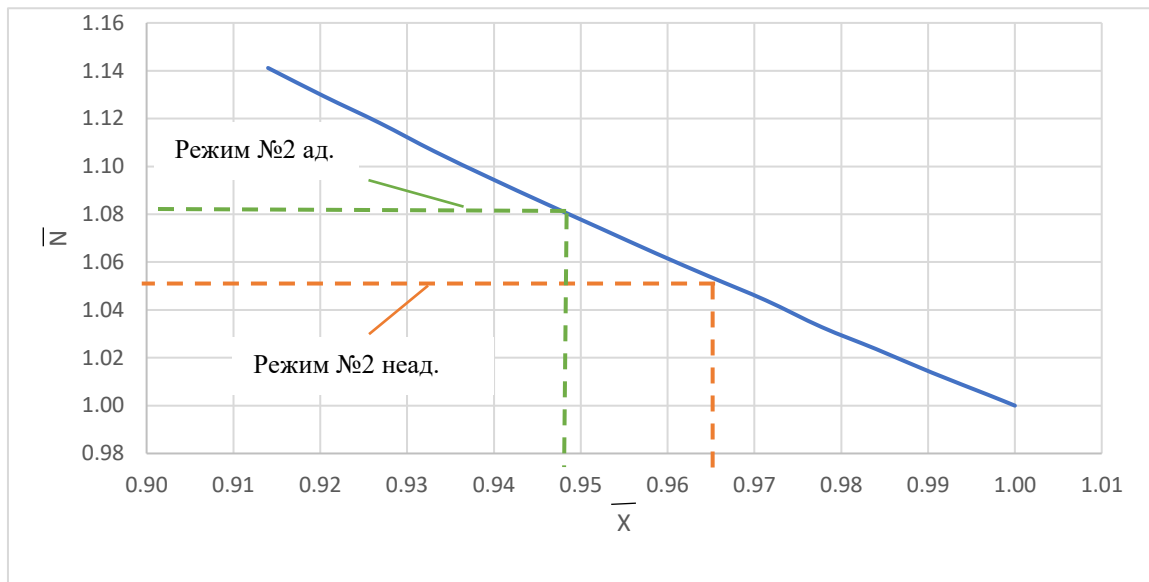


Рисунок 16 - Зависимость относительной индикаторной мощности (\bar{N}) СПДС от относительного коэффициента мертвого объема (\bar{X}).

Источник: составлено автором

Полученную зависимость \bar{X} от коэффициента улучшения E при постоянной тепловой нагрузке и температурном режиме для СПДС можно выразить следующим образом:

$$\bar{X} = E^{-0.086} \quad (7)$$

А зависимость \bar{N} от \bar{X} для СПДС можно выразить следующим образом:

$$\bar{N} = \bar{X}^{-1.468} \quad (8)$$

При коэффициентах улучшения теплоотвода $E=1,8$ и $E=1,4$ относительный коэффициент мертвого объема (\bar{X}) уменьшился на 5,2% и 3,4% (Рисунок 15), соответственно, что привело к увеличению относительной индикаторной мощности на 8,5%, и 5,4% (Рисунок 16).

По результатам проведенных исследований была спроектирована конструкция охладителя СПДС с реорганизованным течением рабочего тела и зарегистрирован патент на изобретение концепции данной конструкции (Патент на изобретение № 2754571).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан метод совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС для улучшения эффективности теплоотвода и повышения технико-экономических показателей СПДС. Охладитель разделяется на две группы каналов: первая группа для течения рабочего тела из регенератора в зону сжатия, приближенным к рубашке охлаждения; вторая группа (того же размера, что и каналы первой группы) для течения рабочего тела из зоны сжатия обратно в зону расширения, удаленным от рубашки охлаждения.
2. Разработана расчетно-экспериментальная методика исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на эффективность теплоотвода и ТЭП СПДС.
3. Выполнено математическое моделирование индикаторного процесса СПДС в среде Matlab с использованием методов расчета второго порядка для определения рабочих параметров охладителя СПДС мощностью 1 кВт с учетом его конструктивных особенностей. Разработана методика определения геометрических параметров исследуемых теплообменников, имеющих в качестве основного элемента конструкции сложенные медные ребра. Внесены соответствующие изменения в используемую математическую модель второго порядка, реализованную в среде Matlab для проведения начальной расчетной оценки ТЭП СПДС.

4. Разработан испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований течений по действующей схеме движения рабочего тела и с предлагаемым реорганизованным течением в охладителе СПДС:
- Режим №1: попеременное течение в прямом и обратном направлениях в одном канале (действующая конструкция охладителя);
 - Режим №2: течение только в одном направлении (предлагаемая конструкция охладителя).

Результаты экспериментальных исследований на испытательном стенде показали увеличение отвода теплоты за счет реорганизации течения рабочего тела в охладителе до 17%.

5. Разработана двухтрубная расчетная модель процессов теплообмена при течении рабочего тела в охладителе с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent, на которой проведена валидация с использованием разработанного испытательного стенда. По результатам проведенного на данной модели исследования влияния режимов течения рабочего тела (гелия) под давлением (3 МПа) и охлаждающей жидкости (воды) на эффективность теплоотвода были сделаны следующие выводы:

- При любых режимах течения рабочего тела и охлаждающей жидкости предлагаемая реорганизация течения рабочего тела в охладителе (режим течения №2) позволяет улучшить теплоотвод.
 - Наибольший теплоотвод наблюдается при турбулентных течениях рабочего тела и охлаждающей жидкости ($Re_{внут}=5000$, $Re_{нар}=10000$). По сравнению с вариантом ламинарного течения рабочего тела и турбулентным охлаждающей жидкости ($Re_{внут}=1000$, $Re_{нар}=10000$) наблюдаются наилучшие значения по улучшению теплоотвода (22%). ($Re_{внут}=5000$, $Re_{нар}=10000$).
 - При ламинарном течении охлаждающей жидкости величина теплоотвода уменьшается. При этом эффективность от реорганизации течения рабочего тела (режим течения №2) будет наибольшей.
6. Для уточнения количественной оценки эффективности и возможности применения на практике была разработана расчетная трехмерная модель охладителя СПДС в среде ANSYS Fluent. Выполнен комплекс расчетных исследований охладителя СПДС при номинальном режиме работы (50 Гц). В расчетах при предлагаемой реорганизации течения рабочего тела (режим №2) рассматривались два варианта теплообмена между каналами:
- адиабатический при отсутствии теплообмена между каналами.
 - неадиабатический через стенку толщиной 3 мм для оценки эффекта теплопередачи между каналами.

Полученные результаты показали увеличение теплоотвода в охладителе при реорганизации течения рабочего тела (режим №2) по сравнению с используемым в настоящее время (режим №1) на $\approx 80\%$ с адиабатической стенкой между каналами и на $\approx 40\%$ с неадиабатической стенкой, соответственно, снижение средней температуры на выходе из охладителя составило $\approx 10^\circ\text{C}$ с адиабатической стенкой и $\approx 5^\circ\text{C}$ с неадиабатической стенкой. Это позволит увеличить выходную мощность и КПД:

- Режим №2 с адиабатической стенкой:
 - Выходная мощность увеличивается на ≈ 60 Вт.
 - КПД увеличивается на $\approx 1,2\%$.
 - Режим №2 с неадиабатической стенкой:
 - Выходная мощность увеличивается на ≈ 30 Вт.
 - КПД увеличивается на $\approx 0,6\%$.
7. В данном исследовании показано, что при предлагаемой реорганизации течения рабочего тела возможно сохранение количества отводимой теплоты при меньших размерах охладителя, что позволяет снизить мертвый объем СПДС и, соответственно, увеличить его мощность. Получены зависимости коэффициента относительного мертвого объема \bar{X} от

коэффициента улучшения теплоотвода E и относительной индикаторной мощности \bar{N} от коэффициента относительного мертвого объема \bar{X} . Коэффициент улучшения теплоотвода при предлагаемом режиме течения рабочего тела (№2) с адиабатической стенкой составил $E=1,8$, а с неадиабатической $E=1,4$, что, соответственно, позволило уменьшить относительный коэффициент мертвого объема \bar{X} на 5,2% и 3,4%, и в результате относительная индикаторная мощность \bar{N} увеличится на 8,5%, и 5,4%.

8. По результатам проведенных исследований была спроектирована конструкция охладителя СПДС с реорганизованным течением рабочего тела и зарегистрирован патент на изобретение концепции данной конструкции.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Основным направлением дальнейших исследований СПДС является: совершенствование моделирования индикаторного процесса с учетом колебательного движения рабочего тела между объемами сжатия и расширения, и теплообмена с нагревателем, охладителем и в регенераторе, а также рассмотрения конструкций теплообменников в трехмерной постановке в ANSYS Fluent для повышения точности оценки влияния различных изменений конструкции на ТЭП СПДС. Кроме того, будущие работы будут сосредоточены на активизации партнерства с промышленным сектором, особенно с компаниями, которые производят и исследуют СПДС, чтобы рассмотреть вопрос о внедрении охладителя с учетом фактических технологических и производственных ограничений. Планируется разработать более сложную экспериментальную установку при поддержке промышленного партнера, которую соответствует не только рабочим параметрам охладителя СПДС, но и геометрическим характеристикам существующих охладителей, реализованных в СПДС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Экспериментальное исследование охладителя с новой концепцией движения потока для свободнопоршневых двигателей Стирлинга СПДС/ Смирнов С.В., Меркулов В.И., **Халифе Х.**, Шкарин К.В. // Международная научно-практическая конференция имени Н. Д. Кузнецова "Перспективы развития двигателестроения" 2023, Том 2 стр. 315-316;
2. Расчет системы охлаждения энергетической установки на базе двигателя Стирлинга для работы на Луне/ Смирнов С.В., Антипов Ю.А., **Халифе Х.** //Ракетно-космические двигательные установки: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Москва, октябрь 2020 г. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. — стр. 59-61;
3. A method for evaluating the heat rejection efficiency in a Lunar power plant consisting of a free-piston Stirling engine (FPSE)/ Sergey Smirnov, Mikhail Sinkevich, Yuri Antipov, **Hassan Khalife** // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 313. P. 07001;
4. An Enhanced Calculation Method of the Heat Rejection System of a Free-Piston Stirling Engine (FPSE) Operating on the Moon/ Smirnov S, Sinkevich M, Antipov Y, Tsarkov I, Kupreev S, **Khalife H.** // Symmetry 2022, Vol. 14, Page 1168. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 14, № 6. P. 1168;
5. Design features of a power plant based on a stirling engine working on the moon / Y. A. Antipov, S. V. Smirnov, P. P. Oshchepkov, **H. S. Khalife** // Advances in the Astronautical Sciences : 2nd, Moscow, 25–27 июня 2019 года. – Moscow, 2021. – P. 833-847.;
6. A combined heat and power (CHP) plant consisting of a microturbine and a Stirling engine / Y. A. Antipov, S. V. Smirnov, P. P. Oshchepkov, **H. S. Khalife** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 20–21 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall.. Vol. 1047. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12175. – DOI 10.1088/1757-899X/1047/1/012175.;
7. Перспективы использования свободно-поршневых двигателей Стирлинга / С. В. Смирнов, Ю. А. Антипов, **Х. Халифе** // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 390-402.;

8. A calculation method of a heat rejection system in a lunar power plant consisting of a free-piston Stirling engine (FPSE) / S. V. Smirnov, M. V. Sinkevich, Y. A. Antipov, **H. S. Khalife** // Acta Astronautica. – 2021. – Vol. 180. – P. 46-57. – DOI 10.1016/j.actaastro.2020.12.008.;
9. Improving the performance of the air-cooling unit in the cooling system of a radar / Y. A. Borisov, V. V. Volkov-Muzilev, D. A. Kalashnikov, **H. S. Khalife** // Journal of Physics: Conference Series : 6, Sevastopol, 22–29 августа 2021 года. – Sevastopol, 2021. – P. 012004. – DOI 10.1088/1742-6596/2057/1/012004.;
10. A presentation method of the thermophysical properties of matter in the form of spreadsheets / E. R. Ramazanov, A. A. Kosoy, **H. Khalife** // Journal of Physics: Conference Series : 5, Yalta, Crimea, 13–20 сентября 2020 года. – Yalta, Crimea, 2020. – P. 012094. – DOI 10.1088/1742-6596/1675/1/012094.;
11. Охладитель свободнопоршневого двигателя Стирлинга с линейным генератором [Текст]: пат. Рос. Федерация: 2754571 МПК F02G 1/043, F02G 1/055, H02K 33/16;/ Антипов Ю.А., Смирнов С.В., Шкарин К.В., **Халифе Х.** - № 2020134425; заявл. 20.10.2020; опубл. 03.09.2021С1. 2021;
12. Комбинированный регенеративный теплообменник двигателя Стирлинга [Текст]: пат. Рос. Федерация: 2755014 МПК F25B 9/14;/ / Антипов Ю.А., Смирнов С.В., Соколов Д.А., **Халифе Х.**, Мальдонадо П.Р.В. - № 2020123956; заявл. 20.07.2020; опубл. 09.09.2021.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВОБОДНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Халифе Хассан (РОССИЯ)

Диссертационное исследование посвящено исследованию метода совершенствования системы охлаждения свободнопоршневого двигателя Стирлинга (СПДС). Целью работы являлась разработка метода совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС с целью улучшения его технико-экономических показателей (ТЭП). Увеличение теплоотвода в охладителе СПДС позволяет увеличить разницу температур в СПДС и уменьшить мертвый объем двигателя, что улучшит ТЭП СПДС. В работе проведены расчетно-экспериментальные исследования с целью оценки влияния улучшения теплоотвода в охладителе за счет реализации предложенного метода на ТЭП СПДС.

ENHANCMENT OF THE COOLING SYSTEM OF A FREE-PISTON STIRLING ENGINE

Khalife Hassan (RUSSIA)

The dissertation is devoted to the study of a method for enhancing the cooling system of a free-piston Stirling engine (FPSE). The aim of this work was to develop a method for enhancing the FPSE cooling system by reorganizing the flow of the working fluid in the FPSE cooler in order to improve its technical and economic indicators (TEI). Increasing the heat rejection from the FPSE cooler makes it possible to increase the temperature difference in the FPSE and reduce the dead volume inside the engine, which will improve the TEI of the FPSE. In this work, computational and experimental studies were carried out to assess the effect of improving heat rejection from the cooler through the implementation of the proposed method on the TEI of the FPSE.