

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



САЛИХ САДЖАД АБДУЛАЗИМ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДВИГАТЕЛЯ ГАММА-СТИРЛИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СЛОЖНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Щеклеин Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Гасанов Байрамали Мехрали оглы**, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург заведующий лабораторией криогеники и энергетики;

Плотников Леонид Валерьевич, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры турбин и двигателей;

Соломин Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, профессор кафедры электрических станций, сетей и системы электроснабжения

Защита состоится «24» октября 2024 г. в 12-00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=6233>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности: Рост численности населения планеты, резкий рост удельного спроса на электрическую энергию в XXI веке привел к катастрофическим масштабам воздействия человечества на биосферу. Безопасно обеспечить требуемый уровень энергопроизводства в перспективе могут новые возобновляемые источники энергии (солнце, ветер, геотермальное тепло и др.). Однако в настоящее время и ближайшие десятилетия основным источником энергии остаются ископаемые углеводородные топлива, доля которых превышает 85%. В этой ситуации возникает срочная необходимость повышения энергетической эффективности использования углеводородных топлив в существующих паро и газотурбинных технологиях, что приводит к снижению удельного потребления топлив и снижению эмиссии продуктов сгорания (в т.ч. парниковых газов). В технически высокоразвитых странах с этой целью развиваются технологии парогазовых и ультрасверхкритических установок. В то же время в большинство регионов мира население использует электростанции на дорогостоящем моторном топливе.

Однако более 200 лет известна технология двигателя Стирлинга, способного производить механическую работу при циклическом нагреве и охлаждении газа в замкнутом объеме при внешнем нагреве его любым топливом или солнцем. Научные работы и конструкторские разработки двигателя Стирлинга и его различных модификаций выполнялись в России (Ноздрюхин ГА, Комов А.Т. и др.), математические модели разрабатывались (Гапоненко А.М., Каграмановой А. А. и др.), использование солнечной энергии для нагрева (Стребков Д.С., Панченко В. А. и др.). Большой цикл исследований и разработок использование солнечной энергии для нагрева рабочего тела в двигателе Стирлинга выполнен зарубежными учеными (Гупта М., Абба М., Боретти А. и др.). Дано обоснование перспективности разработки двигателя Стирлинга гамма-типа.

Согласно сценарию Международного энергетического агентства нулевых выбросов к 2050 году, интенсивность выбросов от энергетики должна снизиться к концу текущего десятилетия на 60%.

Дальнейшая разработка двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием эффектов повышения объемного расширения газов при добавлении к ним низкокипящих жидких фракций (вследствие увеличения объема паров при вскипании жидкости) является актуальной задачей, позволяющей повысить давление и мощность двигателя; повысить термодинамическую эффективность, снизить расход топлива и эмиссию продуктов сгорания (в т.ч. парниковых газов).

Цель исследования: Выполнить экспериментальное и численное исследование термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием сложного рабочего тела, представляющего собой газовую среду с включением низкокипящих жидкостей различной объемной концентрации.

Для достижения этой цели были определены следующие **задачи**:

1. Разработать, создать и исследовать конструкцию двигателя Стирлинга гамма-типа.
2. Разработать и создать конструкцию двигателя Стирлинга гамма-типа с возможностью варьирования объемной концентрации и типа низкокипящих добавок.
3. Разработать, создать экспериментальный стенд для измерения объемного расширения рабочего тела (воздуха) с варьированием объемной концентрации и типа низкокипящих добавок при заданных температурах нагрева.
4. Провести теоретический и численный анализ параметров (КПД, мощность - характеристики) двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием программы MATLAB.
5. Выполнить теоретический анализ и исследование двигателя Стирлинга гамма-типа с возможностью варьирования объемной концентрации и типа низкокипящих добавок на базе программного обеспечения ASPEN-HYSYS.

Объект исследования: двигатель Стирлинга гамма-типа с использованием сложных рабочего тел.

Предмет исследования: выявление влияния добавок низкокипящих жидкостей к рабочему телу двигателя Стирлинга гамма-типа на улучшение теплообмена, теплового накопления и повышения термодинамической и энергетической эффективности.

Методология и методы исследования. Исследование двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием сложных рабочих тел включало в себя измерения объемного расширения рабочего тела (воздуха) с варьированием объемной концентрации и типа низкокипящих добавок (ацетон, спирт и бензин) при заданных температурах нагрева. Экспериментальное исследование термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием сложного рабочего тела, представляющего собой газовую среду с включением низкокипящих жидкостей различной объемной концентрации проводились на маломасштабной экспериментальном двигателе с измерением температур в части нагрева и охлаждения, механической и электрической мощности двигателя с использованием стандартных методов- калиброванных термомпар, динамометра, оптического измерителя частоты вращения, вольтметра и амперметра.

Численное моделирование, которое включало как анализ первого, так и второго порядка выполнялось с использованием сертифицированных программ MATLAB и кода ASPEN-HYSYS.

Положения, выносимые на защиту:

1. Изучение возможности использование комплексного рабочего тела, состоящего из рабочего газа с добавками низкокипящих жидкостей в цилиндре двигателя Стирлинга для улучшения его термодинамической и энергетической эффективности.
2. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на двигателе Стирлинга гамма-типа для оценки влияния использования добавок ацетона, этанола, бензина, воды с концентрациями от 1до 20%об.
3. Результаты математического моделирования термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом, с использованием программного обеспечения MATLAB.
4. Результаты численного моделирования термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом, с помощью программного кода ASPEN-HYSYS.

Научная новизна исследования:

1. Впервые изучена возможность использование комплексного рабочего тела, состоящего из рабочего газа с добавками низкокипящих жидкостей- позволяющая использование в одной технологии элементов циклов Стирлинга(газ) и Ренкина(пар).
2. Доказано, что добавление низкокипящих жидкостей позволяет получить значительное увеличение объема рабочего тела при нагреве и более высокое давление в рабочем цилиндре двигателя Стирлинга, что позволяет получить повышение индикаторной мощности двигателя.
3. Создана математическая модель термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом в программном обеспечении MATLAB. Модель включает в себя изучение использования комплексного рабочего тела вместо одного рабочего тела.

4. Впервые выполнено численное моделирование термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом, с помощью программного кода ASPEN-HYSYS.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая важность данного исследования заключается в выполнении теоретического и экспериментального анализа двигателя Стирлинга гамма-типа с добавками низкокипящих жидкостей в состав рабочего тела, показавший принципиальную возможность и эффективность применения данной технологии для улучшения термодинамической и энергетической эффективности двигателя.

Практическая значимость работы заключается- в создании научных предпосылок для разработки новой технологии преобразования тепловой энергии источника (топлива, солнца и др.) в механическую и электрическую формы, с более высокой эффективностью, чем в существующих энергетических установках на основе двигателей Стирлинга.

Личный вклад автора:

1. Проведение анализа опубликованных работ по изучению термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с целью выявления конкретных параметров, способствующих улучшению его эффективности.
2. Выполнение экспериментальных исследований двигателя Стирлинга для оценки влияния добавок ацетона, этанола, бензина, воды с концентрациями от 1 до 20% об. в состав рабочего тела.
3. Проведено теоретическое исследование математического моделирования использованием программного обеспечения MATLAB.
4. Проведено численное моделирование с использованием программного кода ASPEN-HYSYS, используемого для оценки характеристик различных химических соединений и смесей- анализ идеального рабочего цикла двигателя Стирлинга с целью сравнения с моделированием в MATLAB.,

Апробация работы: результаты исследования были представлены и обсуждены на ряде научных конференций и в научных статьях:

1. Четвертая международная конференция по последним достижениям в материалах и производстве (ICRAMM 2022), проводившаяся на кафедре механической инженерии Velalar College of Engineering and Technology, Erode, Tamil Nadu, Индия с 8 по 9 декабря 2022 года.
2. Четвертая международная конференция по перспективным электротехническим, электронным и вычислительным технологиям (ICE4CT 2022), проводившаяся на факультете электротехники и технологий Университета Малайзии Перлис, совместно с Nandha Engineering College, Индия и Центром отличия по возобновляемой энергетике (CERE) с 28 по 29 декабря 2022 года. На этой конференции нам была присуждена премия за лучшую научную статью, представленную на мероприятии.
3. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергосбережение и энергетическое обеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергия", прошедшая в Уральском федеральном университете (УрФУ) в г. Екатеринбурге, Россия, с 12 по 16 декабря 2022 года.
4. Пятая международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE 2023), Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт (НИУ МЭИ) Москва, Российская Федерация, с 16 по 18 марта 2023 года.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 8 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации и Аттестационным советом УрФУ, включая 7 статей, индексируемых в международной базе данных Scopus.

Объем и структура работы: Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, 231 источник в библиографии, список сокращений и дополнительные приложения. Кроме того, диссертация состоит из 200 страниц, 96 рисунков и 15 таблиц.

Основное содержание работы

Обзор и описание исследования. В данном разделе обсуждается значимость темы диссертации и цели исследования, приводится обзор выполненных работ по данной теме.

В первой главе дается описание двигателя Стирлинга, анализа различных модификаций и типов двигателей Стирлинга, с акцентом на технические детали каждого типа и их потенциальные применения. Подробно обсуждается принцип работы двигателя Стирлинга и термодинамические процессы преобразования тепловой энергии в механическую энергию в этом типе двигателя. Рассмотрены основные части и компоненты двигателя Стирлинга, включая поршни, цилиндры, теплообменники и управляющие механизмы; обсуждается влияние различных факторов, таких как температура, давление и тип рабочей жидкости на эффективность двигателя. Выделены факторы, которые необходимо учитывать для улучшения производительности двигателя и повышения его эффективности и устойчивости.

Показано, что рабочее тело играет важную роль в работе двигателя Стирлинга; выбор рабочего тела напрямую влияет на термодинамическую эффективность двигателя Стирлинга. Различные рабочие тела обладают различными термодинамическими свойствами, такими как удельная теплоемкость, теплопроводность и вязкость, которые влияют на производительность двигателя. Выбор подходящего рабочего тела оптимизирует процессы роста давления и теплообмена внутри двигателя, тем самым влияя на его эффективность.

Комбинация газов и жидкостей с низкой температурой кипения может обеспечить улучшение свойства теплообмена по сравнению с однокомпонентными рабочими жидкостями. Газы обладают высокой теплопроводностью, а жидкости могут переходить из одной фазы в другую (испарение и конденсация) при относительно низких температурах, облегчая эффективный теплообмен между горячим и холодным концами двигателя. Это приводит к улучшению термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга.

Идеальный газовый закон применяется к рабочему телу.

$$pV = MRT \quad (1)$$

На всей системе считается, что общее давление мгновенно постоянно. Это давление рассчитывается путем объединения парциальных давлений двух компонентов (газа и пара) в расширительных и сжимающих пространствах.

$$p = p_{ge} + p_{ve} = p_{gc} + p_{vc} \quad (2)$$

В целом, данный раздел предоставляет подробный обзор двигателя Стирлинга, начиная с описания этапов развития его конструкции, и заканчивая анализом его энергетической эффективности.

Во второй главе предоставляется подробный анализ подходов и стратегий для повышения производительности двигателя Стирлинга. Глава начинается с введения в важность оптимизации производительности двигателя и различные факторы, которые могут на нее влиять. Проводится тщательный обзор литературы, охватывающий научные статьи, академические работы и отчеты промышленности, сосредоточенные на технологии двигателя Стирлинга. Обзор выявляет общие тенденции, инновационные методы и новые технологии, применяемые для повышения эффективности и выхода двигателя. Определены ключевые

области исследований – прогресс в области материаловедения, механизмов теплообмена и оптимизации конструкции системы. Глава завершается подробным обобщением результатов обзора литературы, выделяя значительные вклады, пробелы в текущих исследованиях и потенциальные направления для будущих исследований. Особое внимание уделяется последним достижениям и передовым исследовательским инициативам, направленным на расширение границ производительности двигателя Стирлинга.

Третья глава представляет исследование техник термодинамического моделирования и анализа, применяемых к двигателям Стирлинга. Рассматриваются различные термодинамические модели, включая модели от нулевого до четвертого порядка, с акцентом на их применимость к системам двигателей Стирлинга. Каждая модель анализируется с точки зрения ее преимуществ, недостатков и практических последствий для проектирования и оптимизации двигателя. Особое внимание уделяется моделям первого и второго порядка, включая анализ Шмидта и идеальный/неидеальный адиабатический анализ, которые широко используются для оценки термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга.

Исследуется роль компьютерного моделирования и инструментов симуляции в прогнозировании поведения двигателя и оптимизации общей производительности системы. Через представление практических примеров демонстрируется применение термодинамических моделей в реальных инженерных технологиях цикла Стирлинга.

Анализируются изменения в динамике работы в областях расширения и сжатия, которые влияют на термодинамическую и энергетическую эффективности. Общая работа, выполненная двигателем за цикл, определяется совокупной работой, выполненной в пространствах сжатия и расширения.

$$W_c = \oint p dV_c = \int_0^{2\pi} p \frac{dV_c}{d\theta} d\theta \quad (3)$$

$$W_e = \oint p dV_e = \int_0^{2\pi} p \frac{dV_e}{d\theta} d\theta \quad (4)$$

$$W_{net} = W_e + W_c \quad (5)$$

Указанная мощность расширения и сжатия рассчитывается на основе скорости двигателя за одну секунду и крутящего момента.

$$P = W_{net} * N \quad (6)$$

$$P = 2\pi \frac{N t}{60} \quad (7)$$

И тепловая эффективность цикла равна:

$$\eta = \frac{W_{net}}{W_e} \quad (8)$$

Приводится сводка различных порядков моделей, используемых в анализе двигателей Стирлинга, включая упрощенные концептуальные модели и более подробные и сложные представления.

Четвёртая глава посвящена описанию экспериментальных методик и этапов исследования гамма-двигателя Стирлинга.

Первое испытание включало введение жидкостей с различными объемными соотношениями в герметичный цилиндр, содержащий воздух, который затем подвергся нагреву электрическим термостатом. Целью было изучение влияния температуры на объем системы. Общий вид используемого оборудования в экспериментальном исследовании приведен на рисунке 1. Для изучения взаимосвязи между температурой кипения и изменениями объема и давления были проведены эксперименты с использованием нескольких различных комбинаций (воздух, воздух-ацетон и воздух-спирт) с различными объемными концентрациями (1%, 5%, 10%, 20%).

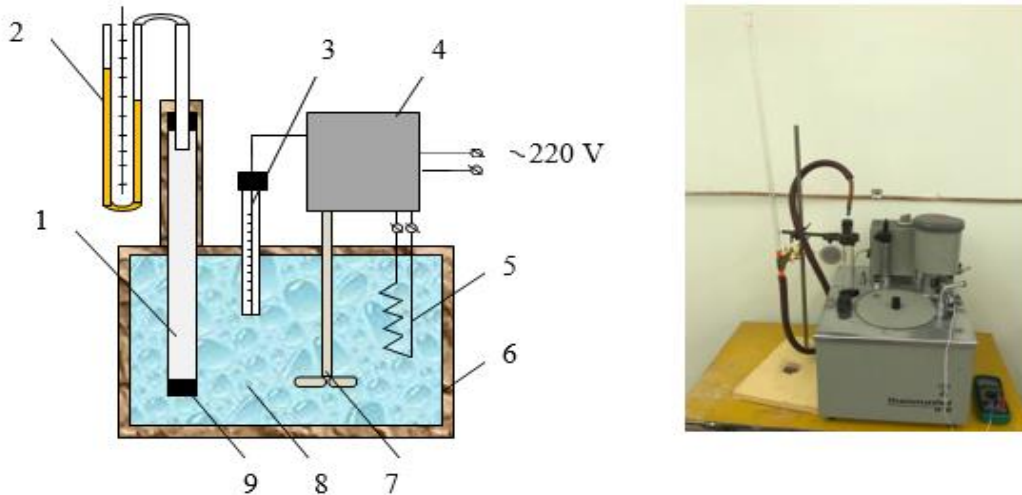


Рис. 1: Схема и фотография экспериментальной установки

1. Рабочий объем газа, 2- U образный манометр, 3- контактный термометр 4- блок управления, 5- электронагреватель, 6- тепловая изоляция, 7- перемешивающее устройство, 8- термостатированная жидкость, 9- заглушка.

Рисунок 2 показывает разницу температур между горячим пространством и холодным пространством во время эксперимента, Рисунок 3 показывает изменение объема рабочего тела (воздуха) с добавлением жидкостей.

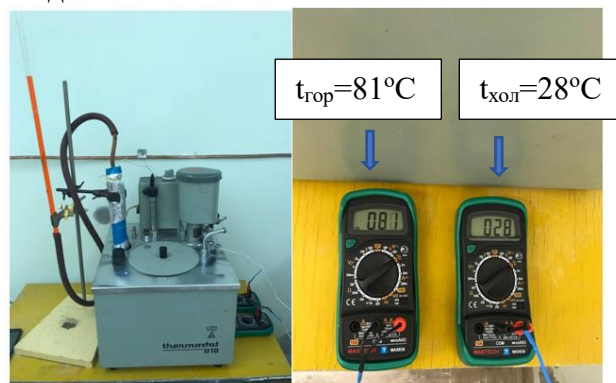
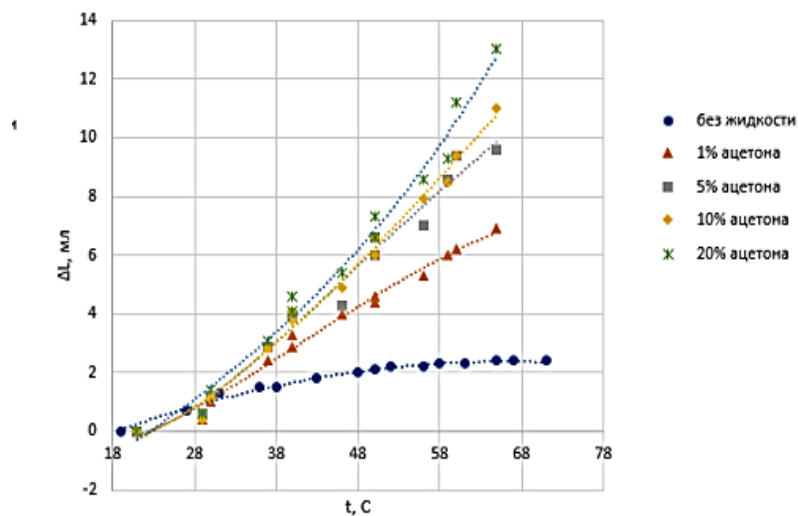


Рис. 2: Разница температур между горячим и холодным пространствами



а

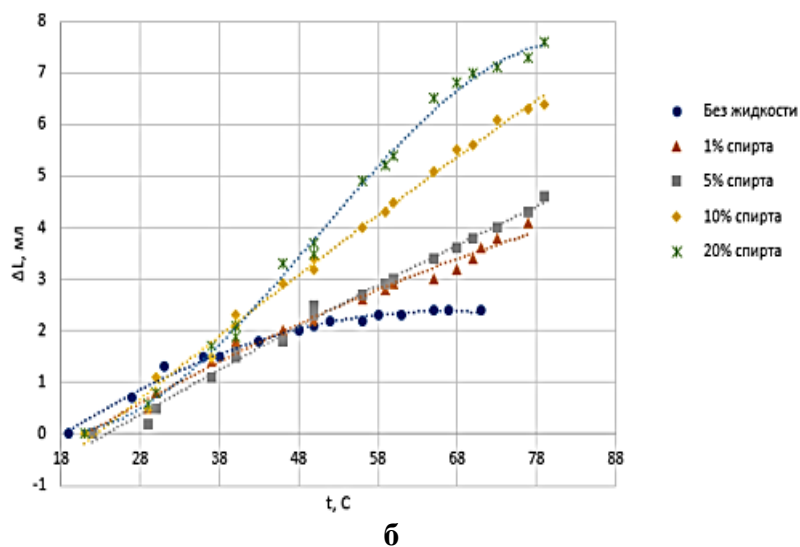


Рис. 3: Изменение объема воздуха с добавлением ацетона (а) спирта (б).

Второй эксперимент был проведен с целью повышения эффективности и производительности гамма-двигателя Стирлинга путем оптимизации его рабочих процессов за счет добавления жидких добавок к основному рабочему газу, воздуху, в камере двигателя. Этот эксперимент включал добавление ацетона, спирта и дистиллированной воды в объемных соотношениях (1%, 5%, 10% и 20%) для оценки их влияния на термодинамическую и энергетическую эффективности двигателя и выходные параметры (при наличии генераторной нагрузки).

Для исследований использован гамма-двигатель Стирлинга производства компании Bengs Modellbau (Германия). Рабочий цилиндр выполнен из стали, цилиндр смещения выполнен из алюминия диаметром 60 мм из-за более высокой теплопроводности алюминия по сравнению со сталью. Кроме того, установленные на цилиндре смещения охлаждающие ребра предназначены для обеспечения максимального возможного времени работы машины. Маховик и шкив - это элементы преобразования колебательного движения во вращательное.

По сравнению с более маленькими моделями двигателей Стирлинга, этот большой двигатель Стирлинга способен работать на низких и высоких скоростях движения поршня. Скорость движения ω может регулироваться с помощью специального регулировочного винта. Маховик диаметром 140 мм и шкив, изготовленный из стали, вращаются на приводном валу. Винт регулировки используется для блокировки воздушного прохода между цилиндром смещения и рабочим цилиндром во время работы. Это гарантирует, что двигатель Стирлинга будет вращаться со скоростью медленнее или быстрее, независимо от того, остается ли пламя неизменным, что позволяет управлять скоростью вращения двигателя.

Фотография экспериментального двигателя Стирлинга и его принципиальная технологическая схема показаны на рисунках 4 и 5. Технические параметры двигателя Стирлинга приведены в таблице 1.

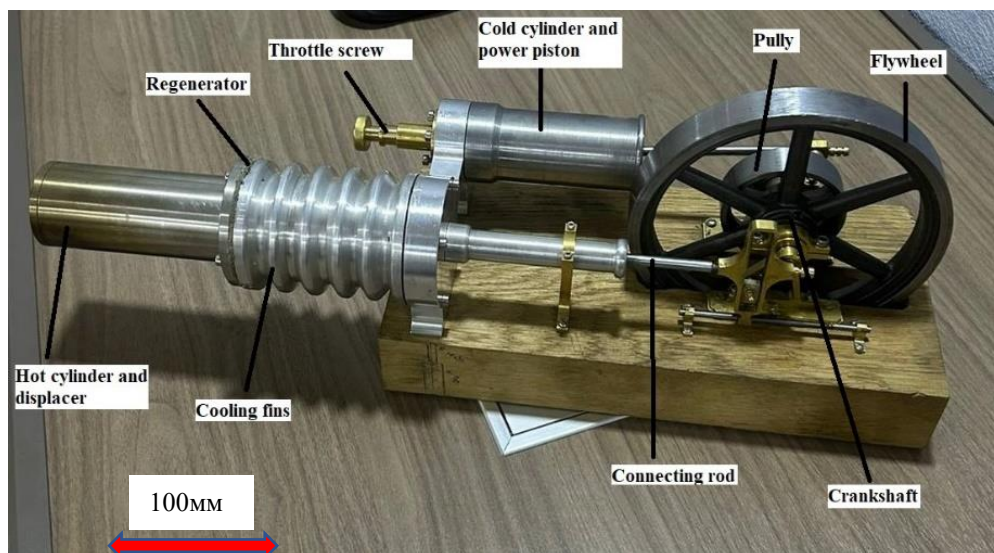


Рис. 4: Гамма-двигатель Стирлинга

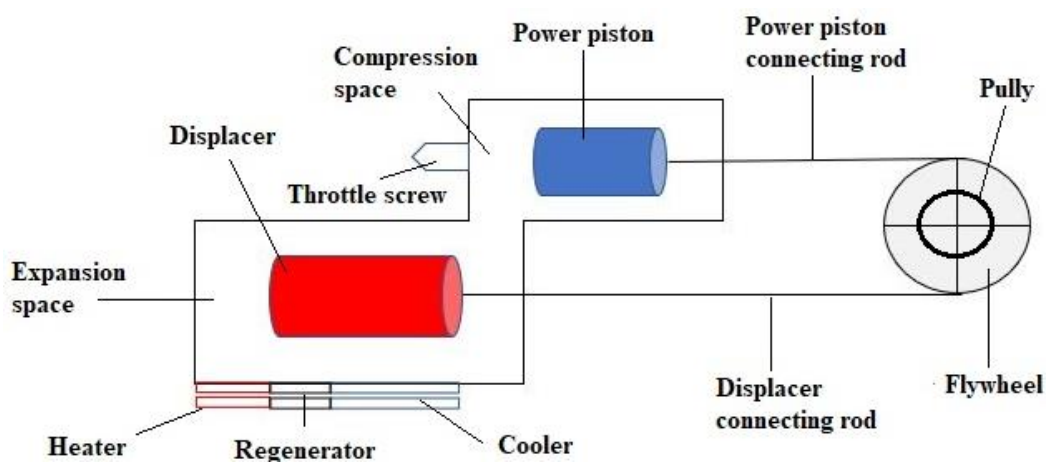


Рис. 5: Принципиальная технологическая схема гамма-двигателя Стирлинга

Таблица 1: Технические параметры двигателя Стирлинга

Параметр	Значение
Тип двигателя	Гамма
Диаметр рабочего поршня	30 мм
Диаметр поршня перемещения	35 мм
Ход	22 мм
Диаметр маховика	140 мм
Диаметр шкива	56 мм
Диаметр цилиндра перемещения	60 мм
Диаметр рабочего цилиндра	40 мм
Давление заряда	1-3 бар
Температура холодного источника	288 К
Температура горячего источника	700 К
Частота вращения	600 об/мин
Рабочая среда	Воздух
Система охлаждения	Воздушное охлаждение

Пятая глава представляет анализ и обсуждение результатов, полученных как из математического моделирования, так и из экспериментальных исследований гамма-двигателя

Стirlinga. Экспериментальное исследование позволило точно измерить ключевые параметры производительности, включая мощность. Путем систематического изменения состава рабочей жидкости мы стремились изучить поведение двигателя и выявить его операционные пределы. Геометрические и операционные параметры двигателя Стирлинга являются важными факторами, влияющими на его производительность, эффективность и характеристики эксплуатации. Оптимизация этих параметров критически важна для достижения необходимого баланса между мощностью, эффективностью и надежностью в применении двигателя Стирлинга. Эффект температуры нагрева и охлаждения на мощность и тепловую эффективность показан на рисунках (6, 7, 8), учитывая добавление ацетона, спирта и дистиллированной воды с соотношением 1%,5%,10% и 20% в воздух. Полученные результаты демонстрируют, что производительность двигателя Стирлинга улучшается в результате добавления ацетона и спирта в воздух, присутствующий в двигателе. В случае, когда воздух был единственной рабочей жидкостью, выходная мощность составляла 8 Вт. Однако добавление ацетона в объемных долях 1%, 5%, 10% и 20% привело к увеличению мощности до 8.5 Вт, 9 Вт, 9.5 Вт и 10 Вт соответственно. При добавлении спирта мощность увеличилась до 8.25 Вт, 8.5 Вт, 9 Вт и 9.5 Вт, а с добавлением воды мощность увеличилась до 8,2 Вт, 8,35 Вт, 8,5 Вт и 8,75 Вт.

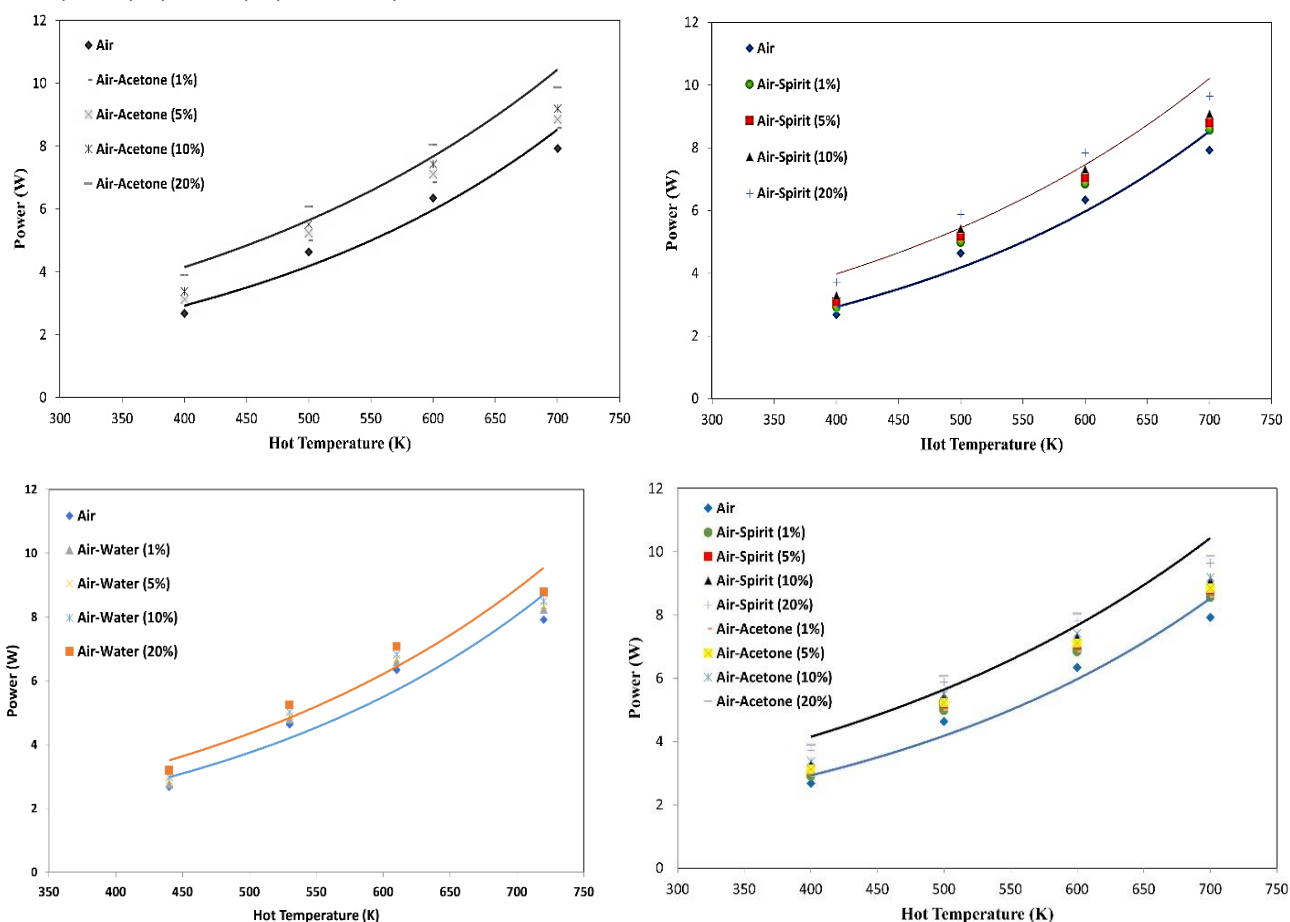


Рис. 6: Влияние температуры нагревателя на мощность

Повышение температуры нагревателя приводит к увеличению тепловой эффективности в двигателях Стирлинга. Это обусловлено тем, что большая разница в температуре позволяет более эффективно передавать тепловую энергию и преобразовывать её в механическую энергию.

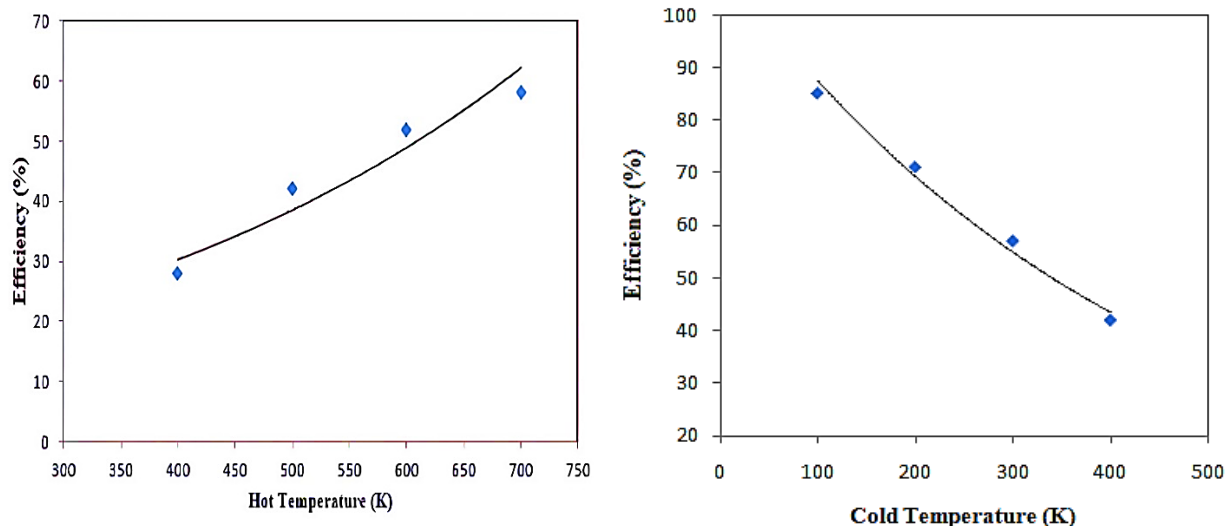


Рис. 7: (а) Влияние температуры нагревающего источника на эффективность. (б) Влияние температуры охлаждающего источника на эффективность.

В холодном резервуаре наблюдается противоположное влияние температур на мощность и эффективность. Результаты показали снижение как мощности, так и эффективности при увеличении температуры в холодном резервуаре. Повышение температуры в холодном резервуаре снижает разность температур между горячим и холодным источниками, что, в свою очередь, уменьшает способность двигателя Стирлинга эффективно преобразовывать тепловую энергию в механическую работу. Это приводит к снижению выходной мощности, мощности и эффективности. Разность температур между горячим и холодным источниками является ключевым фактором эффективности и мощности двигателя. Большая разность температур обычно приводит к более высокой эффективности и выходной мощности. Поэтому уменьшение температуры холодного резервуара при постоянной температуре горячего источника может увеличить разность температур и, следовательно, улучшить производительность.

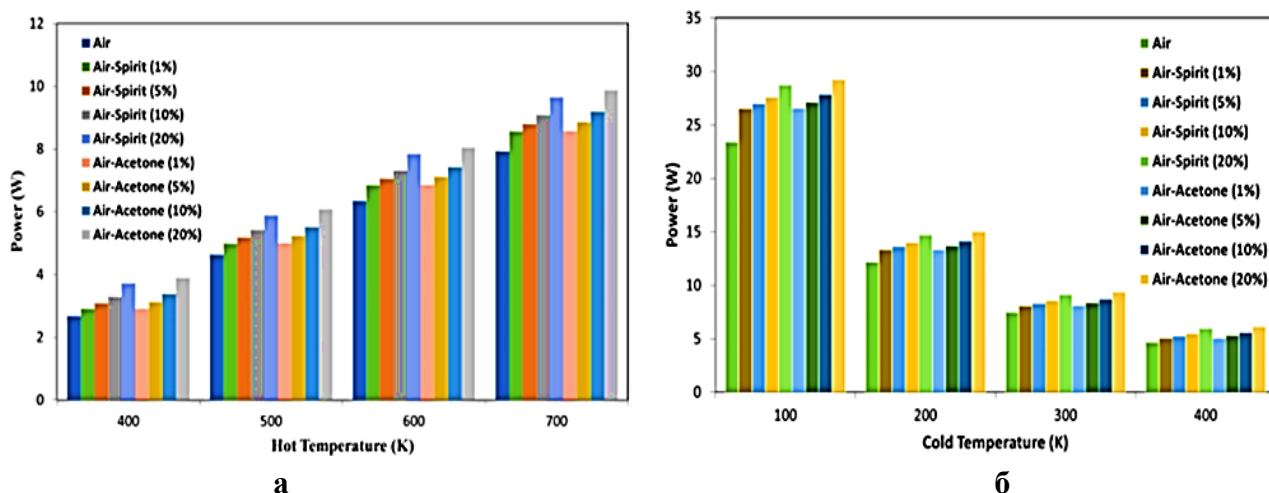


Рис. 8: (а) Влияние температуры горячего (а) и холодного источника на мощность (б)

Давление рабочего тела в двигателе Стирлинга может значительно влиять на работу двигателя, его эффективность и характеристики работы. Выходная мощность двигателя Стирлинга напрямую зависит от давления рабочего тела. Более высокие давления рабочего тела обычно приводят к большим дифференциалам давлений между горячей и холодной сторонами двигателя, что приводит к увеличению выходной механической работы. Это

происходит потому, что расширение и сжатие рабочей жидкости больше при более высоких давлениях, что приводит к большим силам, действующим на поршни или перемещатели, как показано на рисунке 9.

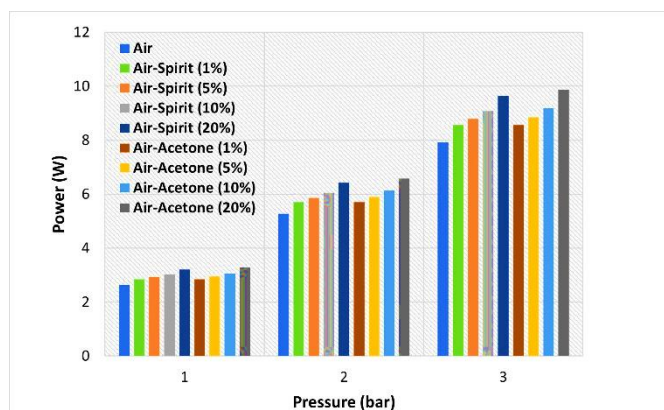


Рис. 9: Влияние давления заряда на мощность

Скорость двигателя, или угловая скорость – это скорость, с которой поршни или перемещатели двигателя Стирлинга двигаются вперед и назад. Эта скорость имеет значительное влияние на выходную мощность двигателя. Выходная мощность двигателя Стирлинга пропорциональна механической работе, выполненной поршнями или перемещателями. При увеличении скорости двигателя поршни или перемещатели движутся быстрее, что приводит к увеличению механической работы на единицу времени. Это приводит к увеличению выходной мощности и крутящего момента двигателя, как показано на рисунке 10.

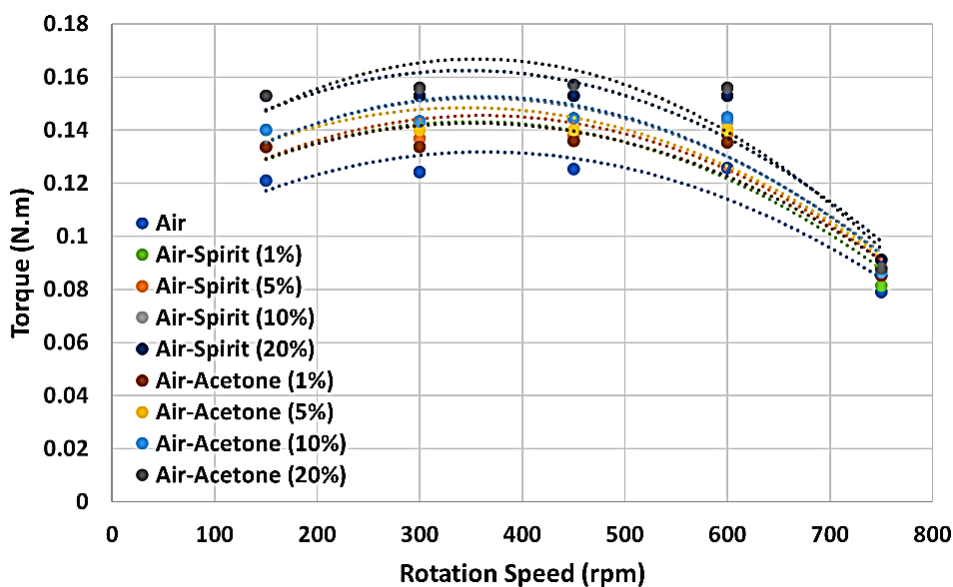


Рис. 10: Влияние скорости вращения на мощность и крутящий момент

Результаты экспериментальных испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2: Результаты экспериментального исследования:

Рабочая жидкость	Объемная доля, %	Мощность, (Вт)	Прирост мощности, %
Воздух	100%	8	-
Смесь воздуха с ацетоном	1%	8.5	6,3
	5%	9	12,5
	10%	9.5	19
	20%	10	25
Смесь воздуха с этанолом	1%	8.25	2,5
	5%	8.5	6,3
	10%	9	13
	20%	9.5	19
Смесь воздуха с водой	1%	8.2	2,5
	5%	8.35	4,4
	10%	8.5	6,3
	20%	8.75	9,4

Добавление ацетона в объемных долях 1%, 5%, 10% и 20% привело к увеличению мощности на 6,3%, 12,5%, 19%, и 25%, соответственно. Добавление спирта привело к увеличению мощности на 2,5%, 6,5%, 13%, и 19%. Добавление воды привело к увеличению мощности на 2,5%, 4,4%, 6,3%, и 9,4%, соответственно. Экспериментальные данные показали возрастание выходной мощности, особенно значительное при использовании низкокипящих жидкостей.

Численное моделирование

Численное исследование включает два различных аналитических компонента. Первая часть включает математическое моделирование, проведенное в MATLAB для трех основных моделей двигателей Стирлинга. Вторая часть включает моделирование идеального цикла Стирлинга, выполненное в ASPEN-HYSYS. Оба этих аспекта оценивают влияние использования составной рабочей среды на выходную мощность и эффективность двигателя Стирлинга. Различные летучие жидкости подвергались серии исследований с различными концентрациями для изучения эффективности двигателя.

Анализ начинается с начальных условий, которые остаются постоянными каждый раз, и продолжается таким образом до достижения циклического установившегося состояния. Процесс начинается с угла поворота коленчатого вала, равного нулю, и продолжается до достижения значения на угле поворота коленчатого вала, равного 360° . Таким образом, весь цикл находится в диапазоне угла поворота коленчатого вала от 0 до 2π . Кодирование и решение всех уравнений выполнено в пакете MATLAB.

Моделирование начинается с того, что в качестве рабочей среды в двигателе Стирлинга рассматривается только воздух. Связь между давлением и общим объемом (диаграмма P-V) можно наблюдать на рисунке 11. Работа двигателя получается путем интегрирования площади под кривой давления-объема за один полный цикл ($0 - 2\pi$). Работа двигателя составляет 0,87 Дж, из которых -0,6 Дж приходится на область сжатия и 1,47 Дж на область расширения, выходная мощность составляет 8,7 Вт, эффективность цикла - 58,8%, а общая масса воздуха - 0,2 г. Диаграмма P-V дает представление о четырех отдельных фазах цикла Стирлинга: сжатие, нагрев, расширение и охлаждение. Каждый этап процесса соответствует определенным изменениям давления и объема, поскольку поршень двигается вперед и назад внутри камеры двигателя.

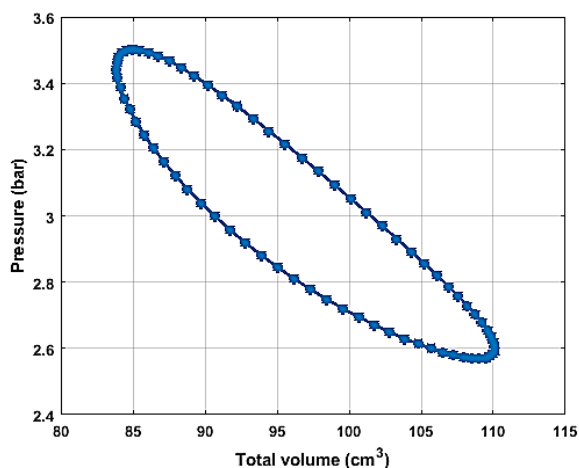


Рис. 11: Диаграмма P-V цикла

Среднее давление колеблется при вращении кривошипа в течение цикла. Начальное давление составляет 3 бара, максимальное давление - 3,5 бара, а минимальное давление - 2,5 бара, как показано на рисунке 12. Изменение давления является результатом различий в температуре между горячей и холодной сторонами. Двигатель Стирлинга характеризуется значительными колебаниями синусоидального объема во время фаз сжатия и расширения, которые непосредственно влияют на все важные параметры. В течение цикла изменения объема влияют на скорости массового потока, теплообмена, давления, работы и другие связанные факторы.

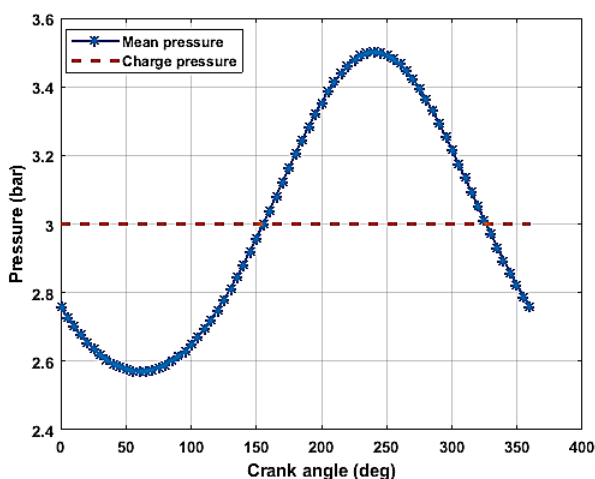


Рис. 12: Колебания давления в зависимости от угла поворота коленчатого вала

В качестве рабочей среды для двигателя использовалось сочетание воздуха и ацетона. Для изучения их воздействия на производительность двигателя были рассмотрены различные объемные соотношения ацетона (1%, 5%, 10%, 20%), как показано на диаграммах P-V на рисунках 13,14,15,16. Использование смеси воздуха и ацетона в качестве рабочего вещества в двигателе Стирлинга может привести к различным последствиям в зависимости от различных факторов, таких как состав смеси, конфигурация двигателя и рабочие параметры.

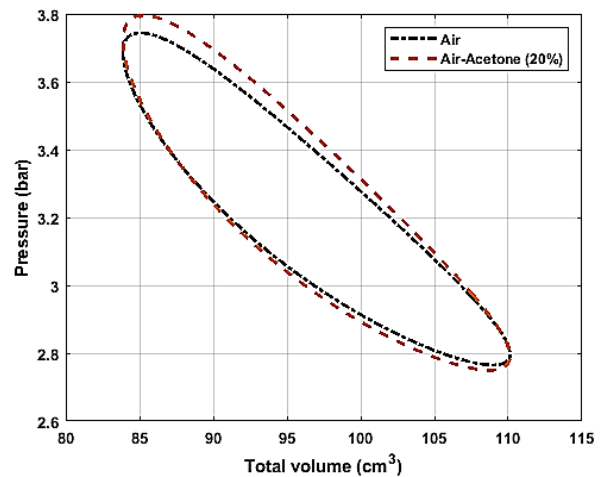
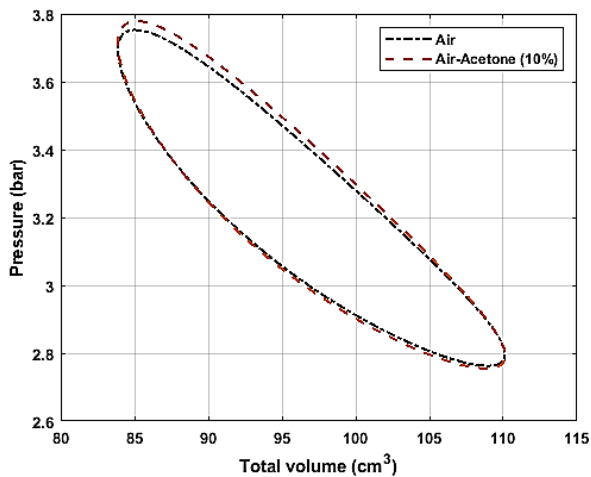


Рис. 13: Диаграмма P-V для смеси воздуха и ацетона (10%) и (20%)

Рисунок 14 иллюстрирует влияние изменяющейся концентрации ацетона на работу и мощность, тепло сжатия и расширения, что показывает, что увеличение процента ацетона приводит к постепенному увеличению как работы, так и мощности.

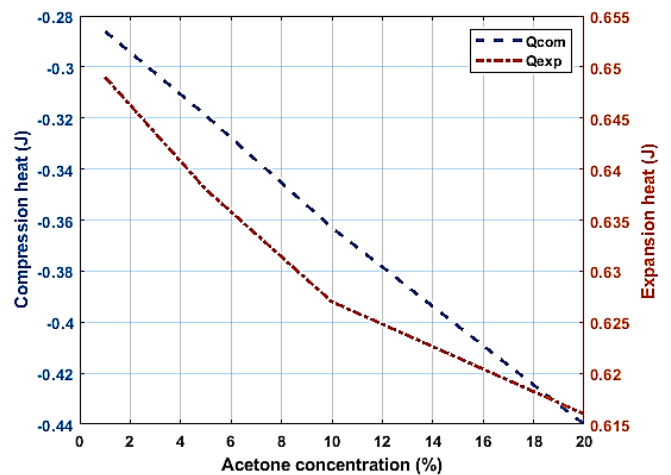
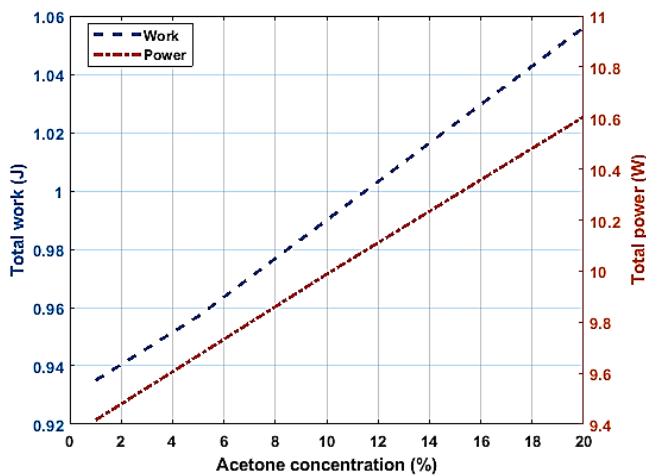


Рис. 14: Влияние добавления ацетона на работу, мощность, компрессию и тепло расширения
 Диаграммы P-V смеси воздуха и спирта показаны на рисунках 15, на рисунке 16 показано влияние добавления спирта на работу, мощность, сжатие и тепло расширения.

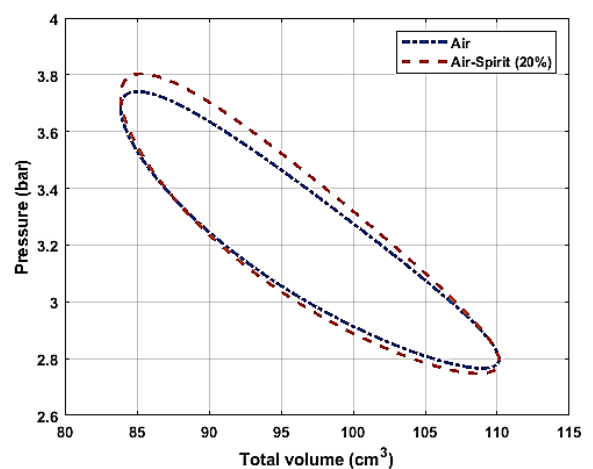
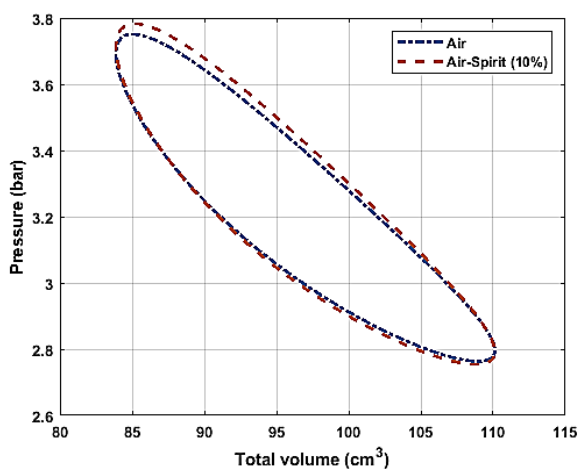


Рис. 15: Диаграммы P-V смеси воздуха и спирта (10%) и (20%)

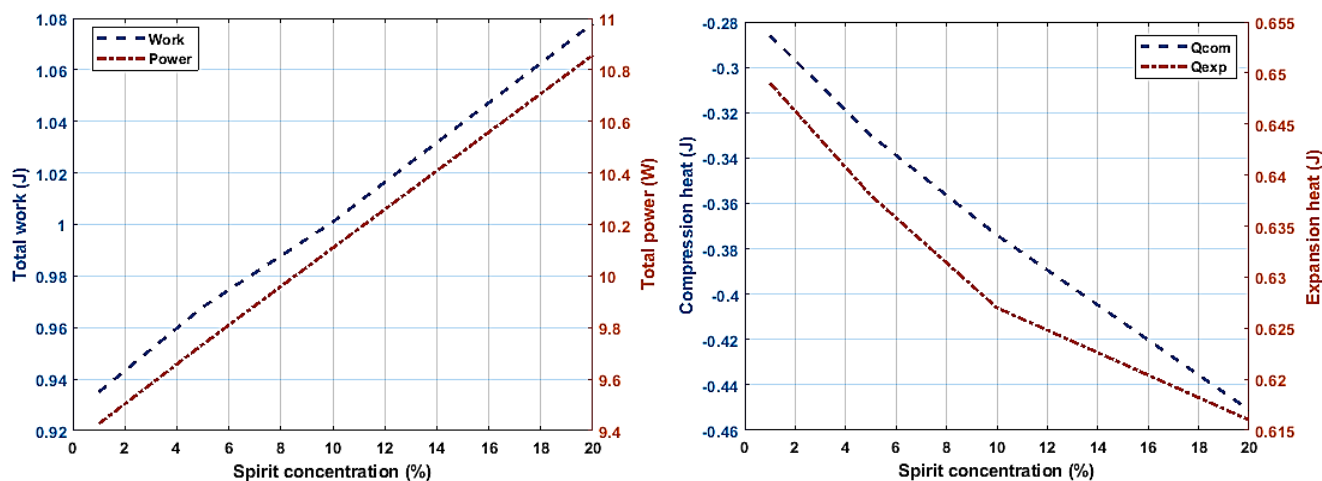


Рис. 16: Влияние добавления спирта на работу и мощность

Количественные результаты экспериментального исследования приведены в таблице 3.

Таблица 3: Результаты исследования смесей рабочих жидкостей

	Воздух	Ацетон				Спирт			
		1%	5%	10%	20%	1%	5%	10%	20%
Кэкс (Дж)	1.474	0.649	0.638	0.627	0.616	0.649	0.638	0.627	0.616
Кком (Дж)	-0.605	-0.286	-0.319	-0.363	-0.440	-0.286	-0.33	-0.374	-0.462
Работа (Дж)	0.869	0.935	0.957	0.99	1.056	0.935	0.968	1.001	1.078
Мощность (Вт)	8.712	9.416	9.669	9.988	10.6	9.427	9.735	10.11	10.86

Диаграмма распределения температуры в идеальном адиабатическом анализе в зонах сжатия и расширения не остается постоянной в течение цикла; скорее, она сдвигается и меняется в ответ при адиабатическом сжатии и расширении, происходящем в рабочих пространствах, как показано на рисунке 17-а. Температура охладителя равна температуре холодного источника ($T_c = 288 \text{ K}$), а температура нагревателя равна температуре горячего источника ($T_e = 700 \text{ K}$), температура регенератора ($T_r = 463 \text{ K}$).

Распределение температуры в двигателе относительно угла поворота коленчатого вала в неидеальном адиабатическом анализе, как показано на рисунке 17-б, показывает, что температура зон сжатия и расширения меняется с углом поворота коленчатого вала на протяжении всего цикла, в то время как температура регенератора остается постоянной. Температура стенки нагревателя ($T_{wh} = 700 \text{ K}$) выше температуры рабочей среды двигателя ($T_{gh} = 677 \text{ K}$), а температура стенки охладителя ($T_{wk} = 288 \text{ K}$) ниже температуры рабочей среды двигателя ($T_{gk} = 312 \text{ K}$).

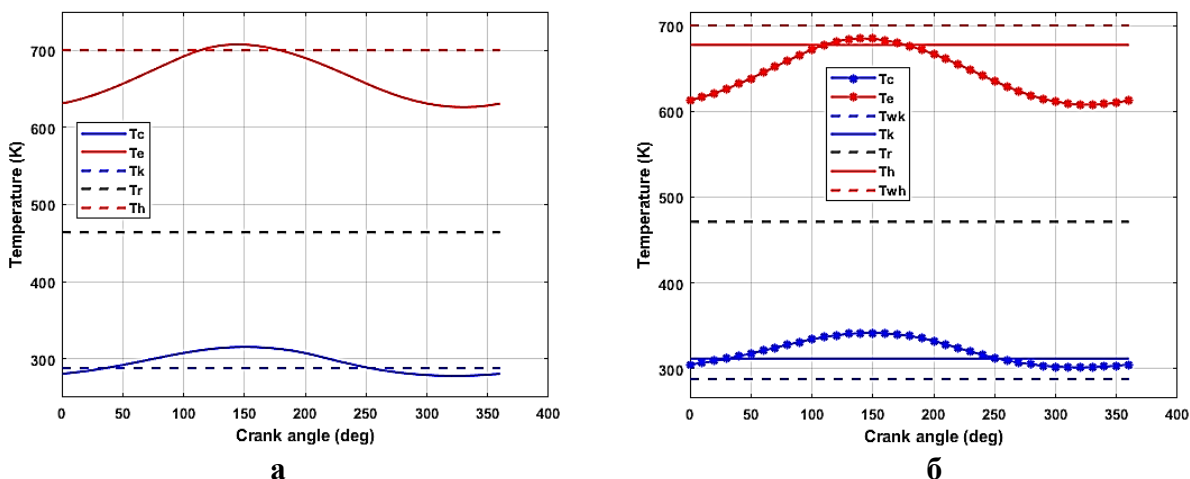


Рис. 17: Диаграмма температуры в (а) идеальном и (б) неидеальном адиабатическом анализе
 Фазовый угол - это относительное время между движением поршней или перемещателей и температурным градиентом во всем двигателе. Эта временная характеристика влияет на производительность двигателя. На рисунках 18 а,б показано, как изменяется количество работы и мощности в зависимости от фазового угла.

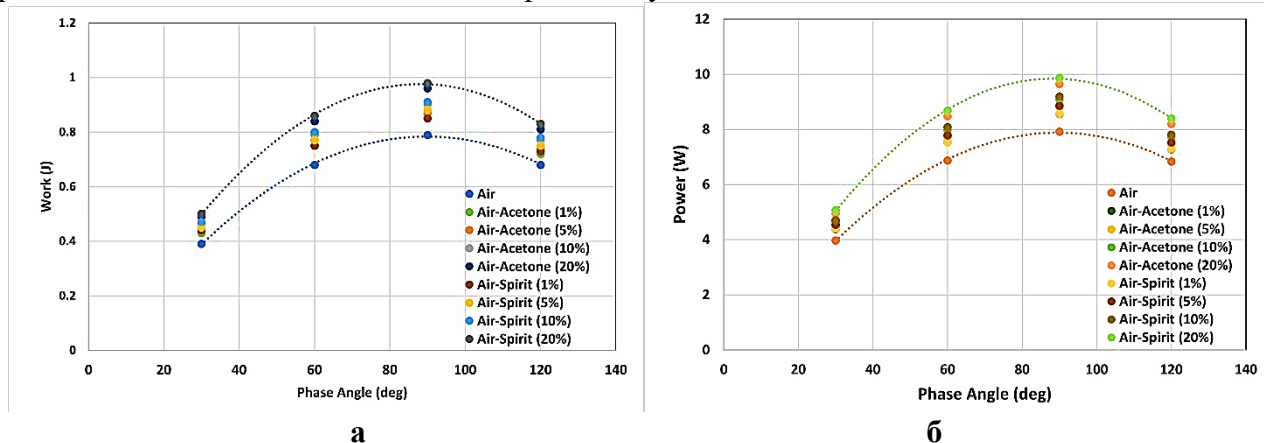


Рис. 18: Влияние фазового угла на (а) работу и (б) мощность

Как показано на графиках, оптимальный фазовый угол составляет 90° . При фазовом угле 90 градусов движение поршней или перемещающихся вытеснителей идеально синхронизировано с температурной разницей между горячей и холодной сторонами двигателя. Эта синхронизация позволяет достичь оптимального сжатия и расширения рабочей среды, максимизируя разницу давлений между горячей и холодной сторонами. В результате эта конфигурация максимизирует механический выход работы двигателя.

Представлено моделирование и симуляцию идеального цикла Стирлинга с использованием кода Aspen HYSYS и влияние смешанного рабочего тела в двигателе Стирлинга. Aspen HYSYS - мощное программное обеспечение для процессного моделирования, разработанное Aspen Technology. Оно широко используется в различных отраслях, особенно в химической промышленности, нефтепереработке и других процессных отраслях. Aspen HYSYS позволяет инженерам моделировать, симулировать и оптимизировать процессы, включая химические реакции, разделение, теплообмен и другие операции с установками. Структурная схема цикла Стирлинга показана на рисунке 19 и включает в себя пространства сжатия и расширения, охладитель и нагреватель.

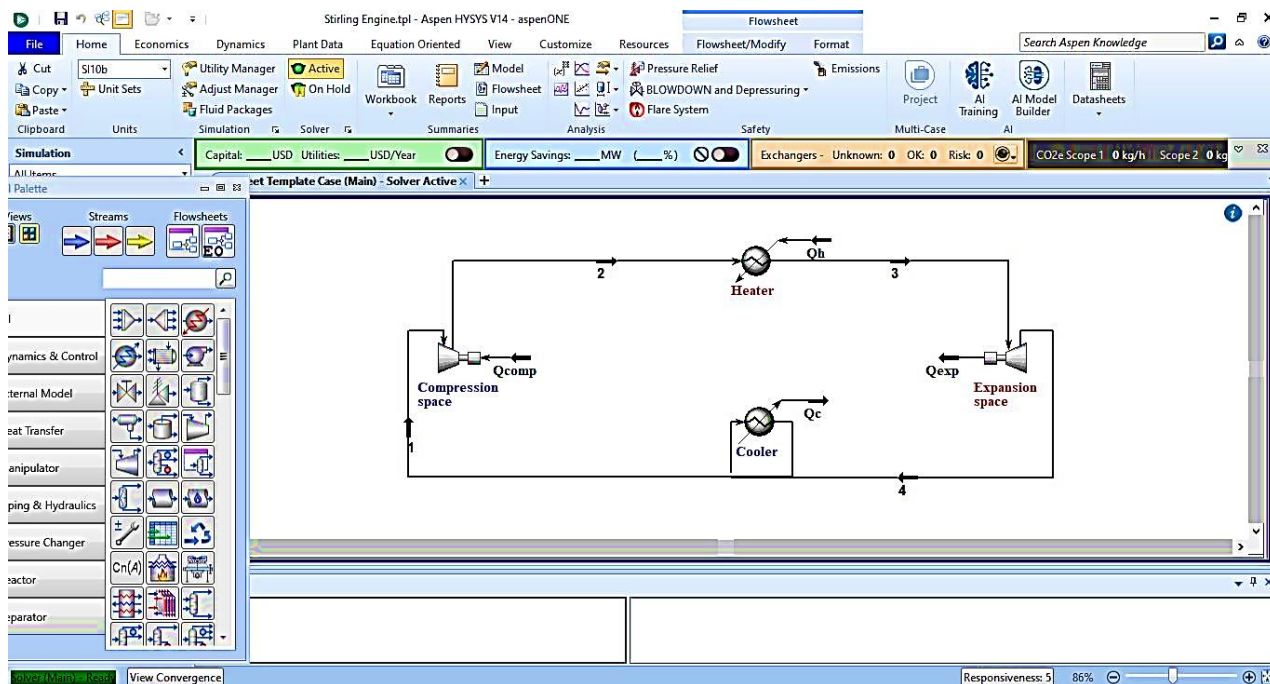


Рис. 19: Основная схема цикла Стирлинга в ASPEN-HYSYS

Параметры симуляции представлены в Таблице 4. В этой симуляции были протестированы рабочие жидкости (ацетон, бензол, этанол, метанол, и вода) с добавлением мольной доли (1%, 5%, 10%, 20%) к воздуху.

Таблица 4: Данные симуляции

Параметр	Значение
Диапазон давления	1-3 бар
Диапазон температуры	288-700 К
Мольная доля	(1%, 5%, 10%, 20%)
Рабочие жидкости	воздух, ацетон, бензин, этанол, метанол, вода

Результаты, симуляции, представлены в таблице 5.

Таблица 5: Результаты численного моделирования

Рабочая жидкость	Мольная доля	Чистая мощность (Вт)	Общий тепловой поток (кДж/ч)
Воздух	100%	8.47	30.4
Смесь воздуха с ацетоном	1%	8.59	30.9
	5%	9.01	32.04
	10%	9.44	34
	20%	10.29	37
Смесь воздуха с бензином	1%	8.62	31
	5%	9.16	32.9
	10%	11.26	40.6
	20%	15.79	56.9
Смесь воздуха с этанолом	1%	8.57	30.9
	5%	10.25	36.8
	10%	12.6	45.3
	20%	16.88	60.8

Смесь воздуха с метанолом	1%	8.52	30.7
	5%	8.71	31.3
	10%	11.89	42.8
	20%	16.09	57.9
Смесь воздуха с водой	1%	8.48	30.6
	5%	10.76	38.7
	10%	12.72	45.8
	20%	16.63	59.8

Проверка механической и электрической мощности

В двигателе Стирлинга механическая энергия генерируется за счет циклического сжатия и расширения рабочей жидкости, приводящей в движение поршень или вытеснитель. Эту механическую энергию можно использовать непосредственно для различных применений, таких как перекачка воды, приведение в движение механизмов или выработка электроэнергии.

С другой стороны, выработка электроэнергии в двигателях Стирлинга включает преобразование механической энергии в электрическую с помощью электрического генератора тока. Этот процесс включает передачу механической мощности двигателя валу генератора, где вращательное движение преобразуется в электрическую энергию посредством электромагнитной индукции.

Целью этого эксперимента является измерение выходной электрической мощности, вырабатываемой гамма-двигателем Стирлинга в сочетании с электрическим генератором, в этом случае единственным рабочим телом является воздух. Настройка предполагает подключение вольтметра к выходным клеммам генератора и размещение между ними нагрузочного резистора (прожектора). Процедура включает в себя запуск двигателя, запись показаний напряжения и тока для различных электрических нагрузок и анализ данных для расчета выходной электрической мощности, как показано на рисунке 20.

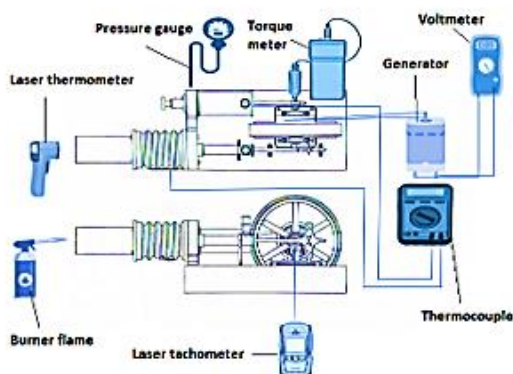


Рис. 20: Установка измерения выходной электрической мощности

На рисунке 21 и в таблице 6 показана выходная механическая и электрическая мощность гамма-двигателя Стирлинга в зависимости от скорости вращения. Он демонстрирует прямую пропорциональность между скоростью вращения и мощностью, показывая, как увеличение скорости вращения приводит к увеличению выходной мощности.

Результаты также показывают оптимальный рабочий диапазон двигателя и определяют точку пиковой выходной мощности (7,92 и 6,97 Вт при 540 об/мин), указывая скорость вращения, при которой двигатель генерирует максимальную мощность, имеющее решающее значение для определения оптимальных условий эксплуатации. Хотя более высокие скорости вращения могут первоначально привести к увеличению выработки электроэнергии,

существуют ограничения, которые следует учитывать, такие как тепловой КПД, механические ограничения, неидеальные условия эксплуатации и зависимость от нагрузки.

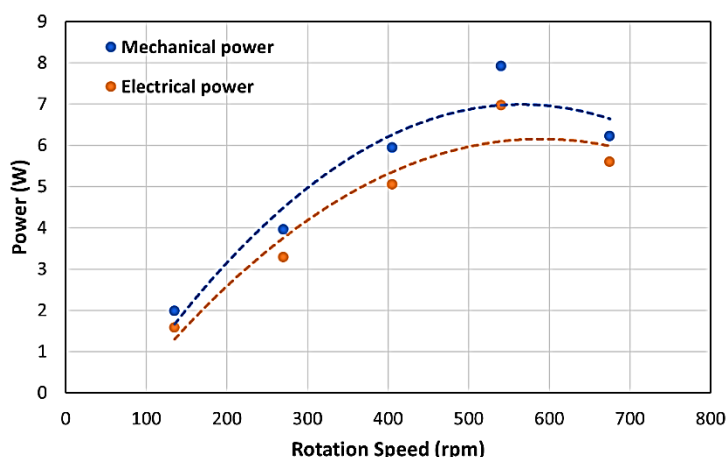


Рис. 21: Механическая и электрическая мощность гамма-двигателя Стирлинга

Таблица 6: Результаты измерения электрической мощности гамма-двигателя Стирлинга

Скорость вращения (об/мин)	Механическая мощность (Вт)	Электрическая мощность (Вт)
135	1.98	1.58
270	3.96	3.29
405	5.94	5.05
540	7.92	6.97
675	6.22	5.60

Заключение

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе анализа опубликованных работ по исследованию и анализу термодинамической и энергетической эффективности двигателей Стирлинга выявлены параметры, способствующие повышению его эффективности.
2. Впервые изучена возможность использования комплексного рабочего тела, состоящего из рабочего газа с добавками низкокипящих жидкостей- позволяющая использование в одной технологии элементов циклов Стирлинга (газ) и Ренкина (пар).
3. Выполнены экспериментальные исследования влияния на эффективность цикла Стирлинга добавок ацетона, этанола и воды с концентрациями от 1 до 20% об. в состав рабочего тела в рабочем цилиндре двигателя.
4. Добавление ацетона в объемных долях 1%, 5%, 10% и 20% привело к увеличению мощности на 6,3%, 12,5%, 19%, и 25%, соответственно. Добавление спирта привело к увеличению мощности на 2,5%, 6,5%, 13%, и 19%. Добавление воды привело к увеличению мощности на 2,5%, 4,4%, 6,3%, и 9,4%, соответственно. Экспериментальные данные показали возрастание выходной мощности, особенно значительное при использовании низкокипящих жидкостей.
5. Разработана математическая модель расчета термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом в программном пакете

MATLAB. Валидация модели показала удовлетворительное соответствие результатов данным эксперимента, что позволяет в дальнейшем вести поиск новых композиций рабочих тел без длительных натурных экспериментов.

6. Разработана методика моделирования термодинамической и энергетической эффективности со сложными рабочими телами с помощью программного кода ASPEN-HYSYS, показавшая удовлетворительное соответствие данным эксперимента и моделирования в MATLAB, что открывает перспективы удобного предварительного анализа рабочих тел двигателя Стирлинга, состоящих из многокомпонентных (более 2) составляющих.
7. Исследование было также проведено для проверки механической и электрической мощности гамма-двигателя Стирлинга в сочетании с электрическим генератором. В данном случае рабочим телом был воздух. Результаты показывают, что мощность напрямую связана со скоростью вращения; определены оптимальный диапазон работы двигателя и точку максимальной мощности (7,92 и 6,97 Вт при 540 об/мин).
8. Предложены направления для дальнейших исследований улучшения методов моделирования, оптимизации рабочих параметров и исследование возможностей низкокипящих жидкостей и других инновационных рабочих жидкостей для развития технологии двигателя Стирлинга.

Рекомендации по использованию материалов научного исследования:

Продвижение и использование двигателей Стирлинга в Ираке может быть выгодным благодаря их эффективности, надежности и способности работать с использованием различных источников тепла, включая солнечную энергию, которой Ирак располагает в изобилии. Вот несколько шагов, которые помогут рекомендовать и эффективно использовать двигатели Стирлинга:

1. Использование солнечной энергии: В Ираке круглый год наблюдается обилие солнечного света, что делает солнечную энергию жизнеспособным источником энергии. Двигатели Стирлинга могут быть интегрированы с солнечными концентраторами или параболическими тарелками для эффективного преобразования солнечного тепла в механическую энергию. Эта установка особенно полезна в отдаленных или автономных районах, где доступ к электрическим сетям отсутствует.
2. Тепловой насос и охлаждение: Двигатели Стирлинга могут использоваться в солнечных тепловых насосах для охлаждения жилых и коммерческих помещений. В регионах с высокими температурами, таких как Ирак, где потребность в охлаждении значительна, двигатели Стирлинга могут эффективно работать с тепловыми насосами для кондиционирования воздуха или охлаждения. Это снижает зависимость от ископаемого топлива и снижает выбросы парниковых газов.
3. Перекачка воды и ирригация: Сельское хозяйство является жизненно важным сектором Ирака, сильно зависящим от ирригации. Двигатели Стирлинга могут приводить в действие водяные насосы, используя солнечную тепловую энергию или источники биомассы, обеспечивая надежное водоснабжение для сельскохозяйственной деятельности. Этот подход поддерживает устойчивые методы ведения сельского хозяйства и смягчает последствия нехватки воды.

Учитывая климатические условия Ирака, внедрение двигателей Стирлинга может использовать богатые ресурсы солнечной энергии, одновременно обеспечивая достижение целей энергетической безопасности и устойчивости. Стратегическое развертывание в ключевых секторах, таких как сельское хозяйство, промышленность и электрификация сельских районов, может максимизировать социально-экономические выгоды от этой технологии, способствуя достижению общих целей развития Ирака.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:
статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ**

1. **Salih S.A.** Factors Affecting the Thermodynamic Performance of the Stirling Engines: a Review Study / **S. A. Salih**, B. A. Aljashaami, N. T. Alwan, S. E. Shcheklein, V. I. Velkin, O. M. Ali // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). 2022. Vol. 16, N. 10. ISSN 1970 – 8734. 0,6875 п.л./0,1146 п.л. (**Scopus**)
2. **S. A. Salih**, Numerical investigation of alpha Stirling engine performance based on ideal and actual adiabatic analysis / **S. A. Salih**, B. A. Aljashaami, N. T. Alwan, M. A. Qasim, A. H. Mola, M. H. Majeed, S. E. Shcheklein, V. I. Velkin, // Journal of Physics: Conference Series, 2023. Т. 2550. № 1. С. 012035, 1,0 п.л./ 0,125 п.л. (**Scopus**)
3. **S.A. Salih**, The Influence of Working Fluid on Stirling Engine Performance/ **S. A. Salih**, B. A. Aljashaami, M. A. Qasim A. H. Mola, S. E. Shcheklein, A.M. Dubinin // 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2023 0,3125 п.л./0,052 п.л. (**Scopus**)
4. Qasim M.A., Conversion of Heat Generated During Normal PV Panel Operation into Useful Energy via a Hybrid PV-TEG Connection / M.A. Qasim, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein, **S.A. Salih**, B. A. Aljashaami, A. A. Sammour // International journal of renewable energy research. 2022. Vol. 12. No. 4. P. 1779-1786. 0, 5 п.л./0,0833 п.л. (**Scopus**)
5. Qasim M.A., Design of a multi-level inverter for solar power systems with a variable number of levels technique / M. A. Qasim, V. I. Velkin, M. F. Mohammed, A. A. Sammour, Y. Du, **S.A. Salih**, B. A. Aljashaami, S. P. Gulmurodovich // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS).2023, Vol. 14, No. 2, pp. 1218~1229. 0,75 п.л./0,09375 п.л. (**Scopus**)
6. B. A. Aljashaami, Analysis of Technical Efficiency, Economic Feasibility, and Environmental Impacts of using Solar Heating Installations for Buildings / **S. A. Salih**, N. T. Alwan, M. A. Qasim, M. H. Majeed, A. H. Mola, V. I. Velkin, S. E. Shcheklein, L. Loboeki // International journal of renewable energy research. 2023, Vol.13, No. 2. 0,8125 п.л./0,09 п.л. (**Scopus**)
7. Majeed M. H., Alwan N. T., Salih S. A., Aljashaami B. A., Shcheklein S. E., Velkin V. I. An experimental study of the effect of solar tracking technology on the performance of a single phase open thermosyphon: a case study. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, (2024), 46(1), pp. 6049–6063. 0,9375 п.л./0,15 п.л. (**Scopus**)
8. Вяткин, П. А., Салих, С. А., Мола, А. Х., Дубинин, А. М., Щеклеин, С. Е., & Немихин, Ю. Е. (2023). Экспериментальное исследование влияния низкокипящих присадок на объем в газовом цилиндре двигателя Стирлинга // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ)*, (4), с. 125-130. 0,375 п.л./0,0617 п.л.

Другие статьи по теме диссертации

9. **Salih, S. A.** Experimental study of the effect of low-boiling additives on the volume in the gas cylinder of the heat engine / **Salih, S. A.**, Mola, A. H., Qasim, M.A., Shcheklein, S. E., Dubinin, A.M.//Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт –2022, УралЭНИН, ФГАОУ ВО «УрФУ» 2022; 0,375 п.л./0,075.
10. Qasim M.A., Study of an autonomous wind-solar power generation system using a seven-level inverter / M.A. Qasim, I. Hossain, **S.A. Salih**, A.H. Mola, V.I. Velkin, S. E. Shcheklein // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт. 2022; 0,375 п.л./0,075 п.л.