

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

На правах рукописи

Шалавин Сергей Александрович

Улучшение теплопередачи в поршнях двигателя Стирлинга за счет излучающей составляющей внешнего теплового потока.
1-36 80 07 «Процессы и аппараты химических технологий»

(в соответствии с Общегосударственным классификатором РБ «Специальности и квалификации»)

Магистерская диссертация
на соискание степени магистра технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент

Шестопалов Евгений Михайлович

Новополоцк 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. История и перспективы развития двигателей Стирлинга	4
1.1. Возможности использования двигателей стирлинга	4
1.2. Недостатки двигателя стирлинга.....	9
1.3. Пути преодоления недостатков двигателя	11
1.4. О математических моделях	11
1.5. Критика существующих математических моделей.....	12
1.6. Постановка задачи.....	13
Глава 2. Математическая модель	14
2.1. Выбор модификации двигателя для исследования	14
2.2. Постановка задачи на модель	15
2.3. Возможности решения задачи численным методом	17
2.4. Описание мат модели.....	17
2.5. Численное исследование данной модели	23
2.6. Результаты моделирования о возможности конструирования двигателя	24
Глава 3. Создание лабораторной исследовательской установки	27
3.1. Выбор модификации двигателя для исследования	27
3.1. Исходные требования	27
3.2. Описание конструкции лабораторной установки.....	27
3.3. Описание методов эксперимента	28
Глава 4. Результаты и обсуждения	30
4.1. Нахождение оптимального угла	30
4.2. Нахождение оптимального размера регенератора	30
4.3. Нахождение оптимальной длины мертвого объёма	31
4.4. Оценка влияния радиационной энергии для интенсификации коэффициента теплопередачи.	32
Глава 5 Возможности применения в направлениях	35
5.1. Применение в традиционной энергетике	35
5.2. Применение в альтернативной энергетике	37
Заключение.....	38
Список использованной литературы.....	39

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время из-за возникших экономических и экологических требований - предприятия стремятся увеличивать эффективность использования энергоресурсов путём постепенной утилизации высоко средне и низко потенциальных тепловых выбросов, посредством котлов-утилизаторов, экономайзеров, дополнительных технологических теплообменников, турбин низкого давления и т.д. Таким образом, снижая долю потерянного тепла, потенциальной энергии, а следовательно и расхода топлива, что позволяет производить более конкурентоспособную продукцию[1].

Эффективная утилизация тепловой энергии с её последующим преобразованием, в какой либо другой вид полезной энергии для последующего использования – является на сегодняшний день основным способом повышения эффективности любого технологического аппарата. Во многих научных центрах ведутся самые разнообразные работы по нахождению наиболее оптимального способа получения электрической энергии из потенциала тепловой энергии, причем по мере сокращения запасов углеводородного сырья, мероприятия по утилизации низкопотенциального тепла становятся всё более и более актуальными[2].

На сегодняшний день абсолютными лидерами, доказавшими свою высокую эффективность, по выработке механической энергии из высокопотенциального тепла являются паровые турбины, однако при утилизации средне и низкопотенциальных тепловых потоков эффективность паровых турбин падает или же их работа вовсе не возможна из-за температуры ВЭР ниже температуры кипения рабочего тела - воды[3]. В то время как в двигателе Стирлинга рабочее тело не осуществляет фазовый переход и может работать просто при наличии разности температур.

С появлением и развитием программ массовых сетей обеспечения солнечной энергией Solar City[4], развитие электромобилей Tesla motors[5], постепенным удешевлением и усовершенствованием элементов питания становится очевидно, что 21-век - век постепенного формирования новых империй, основанных на 100% возобновляемой энергии. На данный момент, основная ставка на компанией Solar City сделана на солнечные панели. Однако, данные изделия имеют чисто технические ограничения в виду избирательного поглощения квантов именно с определенной энергией, в то время как солнечное излучение представляет собой более сложный и переменный от времени характер[6]. В то же время не смотря на высокую заявленную эффективность используемых двигателей Стирлинга компанией Maricora Solar не привела к массовому коммерческому применению данного метода утилизации энергии. Отсутствие каких либо данных о дальнейшем продвижении подобных проектов вызвало у меня личный интерес к теме. В процессе выполнения дипломного проекта после окончания вуза, мною была создана компьютерная модель двигателя Стирлинга, описывающая его работу численным методом. В результате численных исследований [7,8,9] были определены основные лимитирующие факторы применения данного двигателя - малая удельная мощность.

ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА

1.0. Ранний период истории развития двигателей Стирлинга.

Двигатель Стирлинга был впервые запатентован шотландским священником Робертом Стирлингом 27 сентября 1816 года (английский патент № 4081). Основной целью изобретения двигателя Стирлинга являлась замена широко распространенных паровых машин на более эффективные и безопасные двигатели Стирлинга использующие воздух вместо пара[10].

Возрождение интереса к двигателям Стирлинга обычно ассоциируется с деятельностью фирмы «Филипс»[11]. Работы по конструированию двигателей небольшой мощности Стирлинга начались там в середине 30-х гг. XX в. Целью работ было создание небольшого с низким уровнем шума электрического генератора с тепловым приводом для питания радиоаппаратуры в тех районах мира, в которых отсутствовали регулярные источники электроснабжения. Работы по двигателям Стирлинга продолжались также и в 40-е гг. Впервые информация о них появилась в первый послевоенный год. Блестящие научные и инженерные исследования вылились в разработку двигателей, технические характеристики которых превосходили технические характеристики двигателей на нагретом воздухе, выпускаемых ранее. Однако к началу 50-х гг. изобретение транзисторов и усовершенствования в области аккумуляторных батарей исключили потребность в таких двигателях для первоначально планировавшегося их использования. Признавая значимость этих работ, инженеры фирмы «Филипс» переключили свои усилия на разработку более мощных двигателей; изобретение «ромбического привода» и уплотнений в виде свертывающейся диафрагмы привело к разработке семейства одно- и многоцилиндровых двигателей мощностью до сотен киловатт[12].

В 1958 г. американская фирма «Дженерал Моторс» из г. Детройта заключила лицензионное соглашение с фирмой «Филипс», продолжавшееся до 1970 г. В работе Персиваля (1974 г.) приведены весьма интересные подробности о разработках фирмы «Дженерал Моторс» в этот период. Разработки были связаны с использованием двигателей Стирлинга для космических и подводных энергетических установок, автомобилей и судов, а также для систем стационарного энергоснабжения[13].

Для руководства этими двумя программами по автомобильным двигателям в исследовательском центре им. Льюиса (НАСА) в г. Кливленде (шт. Огайо) было создано «Проектное отделение двигателей Стирлинга». Кроме того, для расширения компетентности в этой области в НАСА (1975 г.) было начато осуществление независимой программы исследований и разработок[14].

Результатом заинтересованности общественности в вопросах борьбы с шумом и загрязнением воздуха вместе с таким важным вопросом, как сохранение природных источников энергии, явился повышенный интерес к двигателям Стирлинга в настоящее время.

Двигатели Стирлинга хорошо работают и в режиме холодильных машин. Возможности для этого были определены еще в 1834 г. Джоном Гершелем, а в

1876 г. Александр Кирк описал холодильную машину, которая к тому времени уже проработала 10 лет. Однако еще до конца 40-х гг. этого столетия не прилагалось по-настоящему серьезных усилий для промышленной разработки холодильных машин, работающих по обратному циклу Стирлинга. Такая разработка была предпринята фирмой «Филипс» под руководством И. Кёлера. Первая холодильная машина (ожижитель воздуха) была создана в 1953 г. С тех пор интенсивные работы в этой области привели к созданию целого ряда криогенных газовых машин с широким диапазоном по холодопроизводительности с соответствующим оборудованием для проведения исследований в области криогенной техники и ее практического использования. Холодильные машины, работающие по обратному циклу Стирлинга, наиболее эффективны в диапазоне низких температур, чем при более высоких температурах, характерных для бытовых или промышленных установок, и в диапазоне которых в настоящее время доминируют фреоновые парокомпрессионные холодильные машины [15].

PolotskSU

1.1. Возможности использования двигателей Стирлинга.

В настоящее время будущее двигателей Стирлинга представляется более перспективным даже для автомобильной индустрии. Развитие современного уровня техники и компьютерного управления трансмиссией типа CVT (continuously variable transition) позволяет динамически изменять передаточное соотношение при различных ситуациях на дороге, держа при этом режим работы двигателя в оптимальных для его эффективности значениях [16]. В обзорах по различным двигательным установкам для автомобилей двигатель Стирлинга рассматривают как двигатель, обладающий наибольшими возможностями для дальнейшей разработки. Низкий уровень шума, малая токсичность отработавших газов, возможность работы на различных топливах, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, хорошие характеристики в режимах частичной нагрузки и благоприятные характеристики крутящего момента — все эти параметры дают возможность «бросить вызов» ДВС. По мере истощения природных источников стремление к всеобщей экономии в энергетике станет неизбежным. Естественно, что при таких обстоятельствах двигатель Стирлинга в сочетании с подзаряжаемой тепло-аккумулирующей системой может оказаться доминирующим в двигательных установках для автомобилей.

Можно гарантировать использование двигателей Стирлинга для стационарных энергетических систем в широком диапазоне мощностей. Очевидно, что эти двигатели найдут более широкое применение в тепловых насосах и холодильных системах. По-видимому, криогенные и низкотемпературные холодильные системы малой и средней холодопроизводительности, работающие по обратному циклу Стирлинга, также являются перспективными.

Двигатели Стирлинга имеют весомые преимущества сравнительно с двигателями внутреннего сгорания, такие как:

- незначительная затрата смазочных материалов;
- очень низкие выбросы основных вредных веществ, на порядок ниже чем ДВС, благодаря постоянному сгоранию топлива в благоприятных условиях;

незначительная шумность двигателя Стирлинга, что объясняется отсутствием механизма газораспределения, а также плавным непрерывным процессом сгорания, в отличие от взрывоподобного сгорания в цилиндрах ДВС;

- небольшой объем технического обслуживания;
- а также независимость к конкретному веществу двигателя Стирлинга;
- инертность коррозионная стойкость применяемых материалов.

К недостаткам можно отнести громоздкость, так как делать компактные, надёжные и мощные теплообменники очень трудно.

На сегодня, изготовление двигателя Стирлинга нуждается в больших средствах, чем обычные ДВС, тем не менее, его эксплуатация - значительно экономичнее (но себестоимость производства можно объяснить неприспособленностью промышленности к изготовлению двигателей Стирлинга).

Исключительное свойство двигателей Стирлинга, что разрешает применять для их работы нетрадиционные топлива, например, биогаз, уголь и даже отходы деревообрабатывающей промышленности, а также использование лю-

бых других видов энергии делает их особенно привлекательными в связи с использованием энергии из возобновляемых источников.

Возможное также применение обратного цикла Стирлинга. Если приводить двигатель Стирлинга в движение каким-нибудь внешним устройством, тогда “горячий” цилиндр будет охлаждаться, а “холодный” - будет разогреваться. Если при этом подогреть “горячий” цилиндр, например, окружающим воздухом, то “холодный” цилиндр будет разогреваться к высшей температуре. При этом внешняя энергия тратится не непосредственно на разогрев, а на “перекачивание” тепла из холодного места в теплее, что значительно эффективнее. Т.е. двигатель Стирлинга функционирует в режиме теплового насоса, и образует теплоту для целевого использования. Другими словами, при установке такого двигателя на автомобиль при сбросе скорости торможением двигателя – без каких либо усилий со стороны водителя – энергия движения будет запасаться в тепло на горячем цилиндре, которое в последующем может быть вновь высвобождено в виде механической энергии.

Криокулер Стирлинга также работает по принципу теплового насоса, но применяется как холодильная установка для получения очень низких температур[17]. В широких масштабах их начали изготавливать уже 15-20 лет тому – преимущественно для использования в военной технике: на танках и самолетах необходимо было устанавливать высокочувствительные датчики и приемники, охлаждаемые до температуры -200°C . Для такого охлаждения и было разработано криокулеры, работа которых основывается на обратном цикле Стирлинга[18].

Кроме упомянутых довольно экзотических областей применения двигателей Стирлинга, уже сейчас есть приемлемым их внедрения в когенерационных установках. Когенерационные установки предназначены для полного использования энергии, которая высвобождается во время сгорания топлива. Часть этой энергии превращается в электроэнергию, остальная – в теплоту, которая используется для удовлетворения бытовых нужд. Т.е. двигатель производит электроэнергию, а теплота из его системы охлаждения, смазки и выпускной системы утилизируется и обеспечивает горячее водоснабжение, отопление помещений и т.п. Благодаря общему производству электрической и тепловой энергии в когенерационных установках обеспечивается значительная экономия топлива – до 30%[19].

В США и странах Европы, прежде всего Германии, уже начато серийное производство небольших теплоэлектрических установок с двигателем Стирлинга, например, для нужд одной семьи. Электрическая мощность установки составляет 2...9 кВт, тепловая – 8...24 кВт. Общий КПД установки достигает 92...94%, благодаря тому, что теплоту, которая не использована в двигателе, утилизировано в системе бытового теплоснабжения. Топливом для такого двигателя Стирлинга является природный газ. В конце 2001 года был изготовлен двигатель, топливом для которого служат отходы деревообрабатывающей промышленности. Теперь ведется разработка двигателя, топливом для которого станет биогаз[20].

Запасы традиционного нефтяного топлива стремительно сокращаются.

Газ, бензин, дизельное топливо дорожает. Поэтому применение альтернативных источников энергии – не просто перспективно, а единственно возможный способ выживания человечества. В развитых странах активно внедряют альтернативную энергетику. В частности, Швеция до 2020 года планирует полностью отказаться от традиционного топлива.

Национальная лаборатория Сандия и компания Stirling Energy Systems сообщили о новом рекорде КПД в процессе преобразования солнечной энергии в электрическую и передачи последней в электросеть общего пользования. Предшествующий рекорд был установлен еще в 1984 году и составлял 29,4%, теперь же удалось достичь КПД в 31,25% [21]

Все приведенные примеры применения двигателя Стирлинга реальные и практически реализованы. Тем не менее, до сих пор двигатели с внешним подводом теплоты не приобрели распространение, возможно, через стереотипность мышления, или инертность промышленного производства. Но современный мир изменяется, изменяются и приоритеты развития техники. Поэтому, целиком возможно, что вскоре двигатель Стирлинга придет почти в каждый дом, как тепловой двигатель, элемент системы отопления или составляющая домашнего компьютера.

1.2. Недостатки двигателя Стирлинга.

Опыт создания современных высокоэффективных машин Стирлинга показывает, что без точного математического моделирования рабочих процессов и оптимального конструирования основных узлов, доводка проектируемых машин превращается в многолетние изнурительные экспериментальные исследования. Второй проблемой является сложность конструктивного исполнения отдельных узлов, проблемы в области уплотнений, регулирования мощности и т.д. Особенности конструктивного исполнения обуславливаются применяемыми рабочими телами. Так, например, гелий, обладает сверхтекучестью, что определяет повышенные требования к уплотняющим элементам рабочий поршней, штока вытеснителя и т.д. Третья проблема - это высокий уровень технологии производства. Данная проблема связана с необходимостью применения в машинах Стирлинга жаростойких сплавов и цветных металлов, их сварки и пайки. Отдельный вопрос изготовление регенератора и насадки для него, для обеспечения с одной стороны высокой теплоемкости, а другой стороны, низкого гидравлического сопротивления. Все это требует высокой квалификации рабочего персонала и современного технологического оборудования[22].

Для высокотемпературных Стирлингов характерна проблема смазки, и быстрая в связи с этим изнашиваемость и коррозия. Так же важно учесть, что материал горячего цилиндра подвергается долговременному воздействию нагрузок, высокого давления и температуры. Причем диапазон изменения температур от момента покоя до рабочих параметров составляет сотни градусов, что для сохранения герметизации и всех тепловых зазоров создает определенные требования как к материалу исполнения двигателя, так и к его пуску.

В связи с тем, что источник тепла расположен снаружи, двигатель обладает инерционностью при изменении теплового потока, подводимого к цилинд-

ру. Требуется время на то, чтобы стенка цилиндра нагрелась сильнее или охладилась при уменьшении подачи тепла. Это означает, что двигатель должен некоторое время разогреваться до того, как он сможет начать производить работу, а мощность двигателя не может быстро меняться. Эти недостатки сильно затрудняют применение ДС там, где сейчас используются ДВС. Как следствие при необходимости быстро изменять мощность прибегают к конструктивным изменениям угла расхождения цилиндра, динамической регулировке давления рабочего давления и т.д.

Двигатель требует передачи и накопления тепла на горячих цилиндрах и отдачи его от холодных. В виду больших габаритов и площадей теплопередачи возникают тепловые потери в окружающую среду и следовательно для эффективной эксплуатации двигателя к выбору теплоизоляции нужно подходить со всей ответственностью. При увеличении мощностей двигателя эти потери и требования к изоляции возрастают.

Основной недостаток двигателя Стирлинга - материалоемкость. Как и любой двигатель внешнего горения, в котором тепло не подводится к рабочему телу непосредственно, стирлинг нуждается в теплообменниках, и это приводит к существенному увеличению массо-габаритных показателей силовой установки за счет увеличенных радиаторов. Для получения характеристик, конкурентных по сравнению с ДВС, приходится применять высокие давления (свыше 100 атм) и специальные виды рабочего тела - водород, гелий. Стенки теплообменников имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего КПД оказывается ниже, чем можно было ожидать. Горячий теплообменник работает в очень напряженных условиях теплопередачи и при очень высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогих материалов. Создание теплообменника, который удовлетворял бы противоречивым требованиям, весьма трудно. Чем выше площадь теплообмена, тем меньше потери тепла. При этом растёт размер теплообменника и объём рабочего тела, не участвующий в работе

Поскольку рабочее тело постоянно находится в полости двигателя, неиспользованное тепло в атмосферу полностью отводится через теплообменник, в то время как в двигателях, работающих по незамкнутому циклу, кроме того, производится выпуск горячих газов из цилиндров. Поэтому по сравнению с ДВС ДС требуется более развитая система охлаждения. В системах, предназначенных для транспортных средств, где экономия занимаемого двигателем объема является определяющим фактором, необходимость использования радиатора с увеличенным рабочим объёмом считается недостатком. В то же время, это может стать преимуществом в тепловых насосах, где холодильник больших размеров может увеличить КПД системы.

Таким образом, основные проблемы двигателя:

- высокая материалоемкость;
- требование высококачественных материалов;
- большие габариты;
- потери тепла на изоляциях;
- высокие требования к материалам при длительном воздействии высоких температур и давлений;

-инерционность режима работы;

1.3. Пути преодоления недостатков двигателя.

Для создания мощностей сопоставимых с развитыми на сегодня двигателями внутреннего сгорания как правило идут двумя путями:

-значительно повышают площади теплообмена, увеличивая тем самым массу, себестоимость и тепловые потери на изоляциях в виду увеличение размеров горячих и холодных частей двигателя;

-увеличивают давление рабочего тела до предельно допустимых для существующих материалов, что так же ведет к дороговизне и сложности эксплуатации, понижает надежность;

Для преодоления ограничений исследователи пытаются подобрать материалы и режимы работы двигателя чтобы максимально интенсифицировать теплопередачу от стенок к рабочему телу. Из за острой нужды в увеличении удельной мощности данного двигателя, конструкторы используют гелий не смотря на его сверхтекучесть и водород, не смотря на его взрывоопасность.

1.4. О математических моделях.

Практически любой сложный технический процесс, в котором протекают процессы различной природы – имеют в себе множество взаимозависимых явлений, значения и взаимные влияния которые можно описать системой уравнений. Это позволяет разработчикам, еще до начала физического эксперимента, исследовать основные зависимости и режимы двигателя, выбирая предполагаемые исходные значения параметров двигателя и последовательно находить оптимальные значения искомых величин. В виду отсутствия в двигателе фазовых переходов и химических реакций - рабочее тело двигателя подчиняется простым физическим законам, и все процессы могут быть описаны теоретически. Существует множество моделей работы двигателя и методов приблизительной оценки его работы.

Так, например в работе [23] разработана иерархическая цепочка математических моделей газа, которая использована при построении компьютерной модели теплового двигателя внешнего сгорания. На основе компьютерного моделирования установлены основные закономерности функционирования теплового двигателя, выполнен анализ влияния изменения параметров на его характеристики и разработан вариант конструкции роторного двигателя.

В работе [24] описана методика определения и оптимизации основных параметров и характеристик двигателей Стирлинга, работающими с газогенераторами установками. Одной из задач проведенных исследований является разработка метода расчета двигателей Стирлинга, обеспечивающего нахождение их оптимальных параметров исходя из требования достижения высокой энергетической эффективности установки с таким двигателем. Это дает возможность вычислять параметры узлов и механизмов двигателей и, соответственно, получить максимальное значение КПД для энергетической установки в целом. Полученные результаты исследований являются основой для проектирования как двигателей, так и установок в целом. В проведенных исследованиях применена

методика замкнутой оптимизации, позволяющая наилучшим образом выбирать основные соотношения параметров двигателей на стадиях предварительной проработки и конструирования. Метод применим как к двигателям, так и к машинам с обратными термодинамическими циклами – охладителям, тепловым насосам. Конечная задача – нахождение таких параметров двигателя, которые позволяют добиться в конечном итоге экстремального значения. В качестве оптимизируемого может выступать, например, удельная мощность (массовая или литровая), эффективный КПД, холодильный коэффициент, коэффициент преобразования для тепловых насосов, удельный расход топлива, теплоты и т.д. В расчетах процессов действительных циклов двигатель Стирлинга, его узлы и агрегаты рассматриваются как сложная термодинамическая система, включающая ряд более простых. Для каждой из этих подсистем составлены уравнения, отражающие характерные особенности протекающих в ней тепловых и газодинамических процессов. Разработанные программы дают возможность определять влияние отдельных параметров установок на их эффективность, проводить расчеты режимов работы двигателей с изменением их мощности, что позволит исследовать методы ее регулирования.

В работе [25] были использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические базировались на эксергетическом методе термодинамического анализа и методе многофакторного эксперимента. Экспериментальные исследования были выполнены на опытных образцах ДС, обработка результатов проводилась на персональном компьютере с использованием методов математической статистики. Получены уравнения регрессии, описывающие зависимость индикаторных параметров цикла утилизационного ДС, а также показателей политроп, составляющих цикл, от средней скорости перемещения вытеснителя, статического давления РТ во внутреннем контуре (давления заполнения внутреннего контура рабочим телом) и температуры стенки горячей полости.

В статье [26] рассмотрены известные из литературы варианты термодинамического описания процессов во внутреннем контуре двигателя Стирлинга. Предложена и обоснована новая термодинамическая модель, состоящая из восьми политропных процессов и позволяющая более точно отображать мощностные и экономические показатели рабочего цикла.

1.5. Критика существующих математических моделей.

Зачастую результатами работ являлись общие рекомендации по конструированию и эксплуатации двигателя, их соотношения, зависимости и параметры или количественная оценка показателей их мощностей. Часть приведенных выше работ являются описанием способов приближения и упрощения процессов, происходящих в реальном двигателе. Авторы известных нам работ по моделированию двигателя стирлинга как правило прибегали к критериальным уравнениям тепло-массообмена, сообщая о сложности вывода дифференциальных зависимостей, или же уравнения носили упрощенно-прикладной характер для конкретных параметров использования. При таком подходе, изменение какого-либо параметра конструкции двигателя, как например (диаметр, начальное

давление РТ, радиус крепления шатуна на маховике) – потребовало бы пересчёт всех выводов для каждого конкретного случая путей оптимизации.

1.6. Постановка задачи.

Ознакомившись с принципами работы двигателя Стирлинга и создав математическую модель его работы в рамках дипломного проекта, было решено продолжить дальнейшую работу в этом направлении с целями:

- создание надежной программной модели, позволяющей быстро и эффективно проводить множество программных экспериментов над моделью с целью определения зависимостей и оптимальных параметров для конкретной модели двигателя;

- создание натурной экспериментальной лабораторной установки для установления основных зависимостей параметров действующих в реальном двигателе;

- оценка адекватности полученной программной модели путем сопоставления теоретических данных с экспериментальными, поиск слабых мест программной модели;

- оценка влияния радиационной составляющей на процесс теплопередачи тепла от источника к рабочему телу с целью увеличения удельной мощности двигателя.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

2.1. Выбор модификации двигателя для исследования.

В процессе истории развития Стирлинг машин появилось множество конструкций и модификаций двигателей Стирлинга. Во всех машинах Стирлинга имеются две полости, находящиеся при разных температурных уровнях и соединяющиеся посредством регенератора. Эти узлы можно компоновать в множество различных систем.

Известны три главных модификации поршневых двигателей Стирлинга[27]:

- альфа;
- бета;
- гамма.

В данной работе в качестве объекта для исследования был выбран двигатель альфа модификации, так как он в отличие от других:

- обладает самой простой конструкцией;
- имеет два механически отдельных цилиндра без термического контакта, что упрощает задачу отвода и подвода тепла к двигателю для утилизации ВЭР;
- имеет простой кривошипно-шатунный механизм, способный нести большую нагрузку.

Недостатками альфа-типа являются сложности в обеспечении герметичности поршней. Однако, данная проблема возникает при использовании в двигателе очень высоких давлений. Так же данную проблему можно решить, используя автоматическую подкачку рабочего тела[28].

Альфа-тип Стирлинга главным образом состоит из подогреваемого цилиндра 1, охлаждаемого цилиндра 2, регенератора 3 и кривошип шатунного механизма 4. Шатуны поршней закреплены на общем коленчатом вале, который соединен с маховиком. Осевой разнос цилиндров - 90 градусов (Рисунок 2.1).

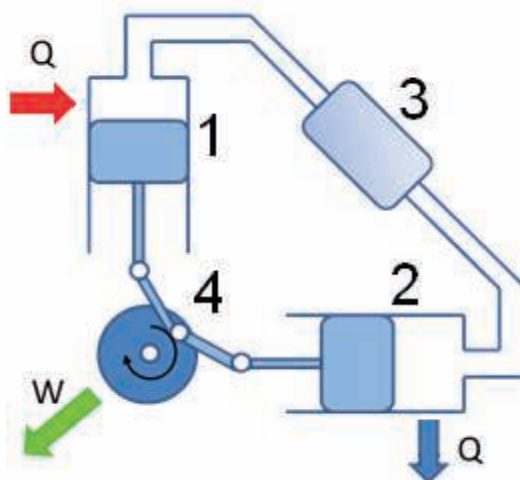


Рисунок 2.1. Принципиальная схема двигателя Стирлинга альфа модификации. Можно выделить следующие циклы его работы [12]:

- Нагрев;
- Расширение;
- Охлаждение;
- Сжатие.

На стадии нагрева весь газ выталкивается из охлаждающего цилиндра, забирает часть тепла из регенератора, после чего поступает в горячий цилиндр для дальнейшего нагрева.

На стадии расширения, нагретый расширяется и толкает оба поршня вниз (холодный и горячий). Общий объём системы возрастает. На этой стадии совершается основная часть полезной работы.

На стадии охлаждения, газ из горячего цилиндра начинает поступать в полость холодного цилиндра, попутно отдавая часть своего тепла регенератору. Поступивший охлажденный регенератором газ охлаждается далее в холодном цилиндре.

На стадии сжатия, газ, прошедший стадию охлаждения, понижает своё давление и под действием энергии накопленной на маховике оба поршня идут вверх и система уменьшает общий объём, подготавливаясь к новому циклу.

Поскольку работа, затрачиваемая системой на сжатие рабочего тела, меньше работы, которую система совершает при расширении рабочего тела, двигатель вырабатывает полезную механическую энергию.

2.2. Постановка задачи на модель.

Задачей данной работы является создание мат модели двигателя Стирлинга, позволяющей все переменные величины одновременно считать как исходными данными, так и искомыми величинами. Это позволяет существенно расширить области исследования на основе разработанной математической модели

и одновременно ускорить получение положительного результата.

Для упрощения получения математической модели были приняты обычные в таких случаях следующие допущения:

температуры горячих и холодных стенок известны и постоянны

();

рабочее тело равномерно распределяется в предоставленных ему полостях цилиндров и регенератора и равномерно давит на стенки давлением P ;

Температуры рабочего тела в отдельно взятом цилиндре и регенераторе различны и зависят от времени;

Температура поверхности регенератора зависит от времени.

Как было сказано выше – благодаря методу итерации мы можем создать модель на основе простых феноменологических уравнений, которая за счёт небольшого шага каждого из вычислений сможет описывать различные процессы, происходящие в двигателе без применения сложных интегрально-дифференциальных зависимостей.

Практически любой сложный технический процесс, в котором протекают процессы различной природы – имеют в себе множество взаимозависимых явлений, значения и взаимные влияния которые можно описать системой уравнений. Это позволяет разработчикам, еще до начала физического эксперимента, исследовать основные зависимости и режимы двигателя, выбирая предполагаемые исходные значения параметров двигателя и последовательно находить оптимальные значения искомых величин. Таким образом, существенно ускоряется процесс создания новых конструкций и технологий. В данной статье рассматривается создание системы уравнений для двигателя Стирлинга альфа модификации, который представляет собой два соединенных регенератором цилиндра оси, которых лежат в одной плоскости и составляют угол в 90° , таким образом, что рабочее тело всегда находится в замкнутом пространстве. Поршни цилиндров шатунами соединены в одной точке на одном маховике, играющем роль кривошипа, составляя, таким образом, обычный кривошипно-шатунный механизм (КШМ).

За принцип расчёта эмуляции был взят метод итераций (последовательного приближения). Метод итераций используется в случае, если проектирование ведется в условиях информационного дефицита, который проявляется в следующем:

невозможность заранее точно указать условия работы проектируемого объекта, не зная его конкретного вида и устройства (исходные данные зависят от вида конечного решения);

выявление в процессе проектирования противоречивых исходных данных, то есть невозможность достижения технического решения при первоначально предложенных данных, оказавшихся взаимоисключающими;

появление в процессе проектирования необходимости учета дополнительных условий и ограничений, которые ранее считались несущественными;

Такая неопределенность устраняется посредством выполнения итерационных процедур:

первоначально задача решается при предположительных значениях исходных данных и ограниченном числе учитываемых факторов (первый цикл итераций, так называемое «первое приближение»);

далее возвращаемся в начало задачи и повторяем её решение, но уже с уточненными значениями исходных данных и перечнем факторов, найденными на предыдущем этапе (второй цикл итераций, «второе приближение») и т.д.

Итерационный подход широко применяется в конструировании. Например, при разработке эскиза узла детали и их расположение сначала показывают предположительно, а затем анализируют получившееся изображение и вносят в него необходимые изменения (согласовываются формы и расположение поверхностей деталей, проверяется нормальное функционирование, увязывается с требованиями стандартов).

2.3. Возможности решения задачи численного метода.

Часто в разнообразных областях науки возникает необходимость получать решения математических задач в числовой форме. При этом для многих задач известно только о существовании решения, но не существует конечной формулы, представляющей ее решение. Даже при наличии такой формулы ее использование для получения отдельных значений решения может оказаться неэффективным. Наконец, всегда существует необходимость решать и такие математические задачи, для которых строгие доказательства существования решения на данный момент отсутствуют.

Современной формой метода математического моделирования, базирующейся на мощной вычислительной базе в виде ЭВМ и программного обеспечения, реализующего алгоритмы численного решения, является вычислительный эксперимент, рассматриваемый как новый теоретический метод исследования различных явлений и процессов. Этот теоретический метод включает существенные черты методологии экспериментального исследования, но эксперименты выполняются не над реальным объектом, а над его математической моделью, и экспериментальной установкой является ЭВМ.[29]

Современные персональные компьютеры, позволяют проводить расчеты различной сложности в малые промежутки времени. Благодаря этому существует возможность написать программное обеспечение, которое реализовывало бы нужный нам алгоритм расчета и в значительной степени облегчало исследование и избавляет от необходимости сложных выводов дифференциальных зависимостей.

2.4. Описание мат модели.

Данная математическая модель подразумевает установление начальной скорости ω вращения маховика, которое необходимо для получения временных итерационных промежутков Δt , где t -период одного оборота маховика двигателя, а i -количество итерационных шагов, например $i=360$, т.е. - один шаг на каждый градус оборота.

Будем считать, что на протяжении всего оборота двигателя маховик движется равномерно с какой-либо начальной скоростью ω , тогда период оборота

равен:

$$\text{---} \quad (1)$$

Необходимо составить элементарные геометрические зависимости двигателя (рисунок 2.2).

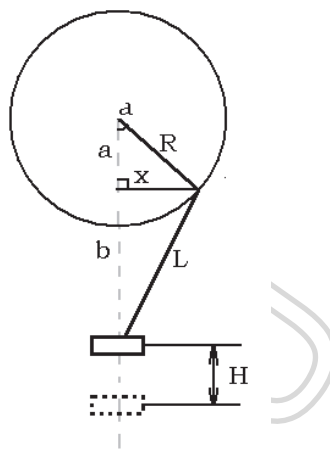


Рисунок 2.2. Вывод движения поршня от угла КШМ

Как можно видеть из рисунка 1, сторона $a =$ --- , а т.к. $x = R \sin$ --- , то сторона b вычисляется по уравнению:

$$b = \text{---}$$

Имея в виду, что --- , то подставляя a и b – получим уравнение (2)

$$\text{---} \quad (2)$$

Уравнение 2 описывает положение поршня-1 в зависимости от угла поворота КШМ.

Далее необходимо задать геометрическую связь между первым и вторым цилиндром. Для этого введем обозначение для угол смещения крепления шатуна 1 и 2 на общем маховике – --- , угол --- для двигателя стандартно составляет 0° , однако с целью исследования мы ввели и эту переменную. Так же введем в исследовательских целях угол --- между цилиндрами двигателя, стандартно составляющий 90° .

Таким образом, уравнение связи угла второго поршня будет иметь вид (3).

$$\text{---} \quad (3)$$

Зная --- уравнение, описывающее положение поршня-2 в зависимости от угла поворота КШМ (4).

$$\text{-----} \quad (4)$$

Задаваясь диаметрами цилиндра 1 и 2, получаем площади цилиндра-1 и цилиндра-2 (5), (6) соотв.

$$\text{---} \quad (5)$$

$$\text{---} \quad (6)$$

Соответственно мгновенные объёмы цилиндра-1 и цилиндра 2 для положений (7), (8).

$$(7)$$

$$(8)$$

Задаваясь объёмом регенератора, получаем общий объём рабочего тела (9).

$$(9)$$

Мгновенная площадь поверхности боковых стенок цилиндра (10), (11)

$$(10)$$

$$(11)$$

Продифференцировав уравнение (2), получим зависимость скорости поршня-1 в виде уравнения (12).

$$\text{=====} \quad (12)$$

Аналогично используя уравнение (4), получим уравнение (13) – скорость поршня-2.

$$\text{=====} \quad (13)$$

Продифференцировав уравнение (12) получим закон ускорений (14).

$$\text{-----} \text{-----} \text{===== (14)}$$

Аналогично для уравнения (13) получаем уравнение (14).

$$\text{-----} \text{=====};(15)$$

Зная законы изменение объёмов, можно, согласно нашим допущениям, вывести материальный баланс рабочего тела:

$$\text{---} \text{---} \text{-----} \text{-----} \text{===== (16)}$$

Выражая из закона Менделеева-Клайперона [30] массу газа m , получаем (16) для газа заключённого в первом цилиндре и (17) для газа заключённого в объёме второго цилиндра.

$$\text{---} \text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{===== (17)}$$

Зная общую массу рабочего тела и массы рабочего тела в обоих цилиндрах, получаем массу рабочего тела заключённого в объёме регенератора (18).

$$\text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{===== (18)}$$

Для описания теплового баланса модели – нам необходимо определить кол-во и направление рабочего тела, несущего с собой тепловую энергию между первым цилиндром и регенератором (19) и между вторым цилиндром и регенератором (20).

$$\text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{===== (19)}$$

$$\text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{===== (20)}$$

Для этого мы рассчитываем значение массы рабочего тело заключённое в цилиндре и сравниваем её с значением массы , которое было на один расчётный цикл назад, т.е. с предыдущим значением массы. Причём, если , масса рабочего тела покидает цилиндр 1, следовательно, из теплового баланса цилиндра 1 уходит поток с энергией . Если , к массе рабочего тела цилиндра 1 добавляется поток из регенератора с энергией

Сформировав это, можно записать уравнение температур рабочего тела заключённого в цилиндре 1 (21) и в цилиндре 2 (22) и температуру рабочего тела, находящегося в регенераторе (23).

$$\text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{-----} \text{===== (21)}$$

$$(22)$$

$$(23)$$

Температура поверхности самого регенератора будет определяться согласно тепловому закону Ньютона-Рихмана [31] в уравнении (24).

$$(24)$$

Руководствуясь принятыми допущениями и зная температуры и массы рабочего тела, можно перейти к определению текущего общего давления рабочего тела.

Общее давление определяется из закона Дальтона [32].

$$P = \sum_{i=1}^n p_i = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

Исходя из закона Дальтона, получим (25).

$$(25)$$

Зная закон изменения давления рабочего тела, можно переходить к силовой задаче:

Силы, действующие на поршни:

$$(26)$$

$$(27)$$

Исходя из закона механики [33] о передаточном соотношении сил и скоростей, введём коэффициент проецирования действующих сил на КШМ 1 и КШМ 2 (28), (29) соотв.

$$(28)$$

$$(29)$$

Так как энергия, заключённая в маховике равна:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

А инерция сплошного маховика с массой равна (30).

$$\text{---}; \quad (30)$$

То энергия, приобретённая механической системой за один такт счёта будет равна (31).

$$\text{---}; \quad (31)$$

Где, --- кинетическая энергия накопленная в маховике.
 --- кинетическая энергия поступающая от КШМ-1
 --- кинетическая энергия поступающая от КШМ-2
 --- энергия уходящая на полезную нагрузку двигателя.

После завершения первого цикла счёта, система приобретает или теряет энергию накопленную в маховике, а следовательно, двигатель теряет или набирает скорость, которая уточняется каждый виртуальный оборот двигателя по формуле (32).

$$\text{---}; \quad (32)$$

После того, как все силы действующие в виртуальной модели будут уравновешены, двигатель либо войдёт в состояние динамического равновесия и скорость будет постоянна, либо скорость упадёт до нуля, сообщая нам таким образом, что данная модель двигателя не дееспособна, или, что приложенная полезная мощность велика для выбранных параметров двигателя.

2.5. Численное исследование данной модели.

Работа с математической моделью происходит оконный через программный интерфейс изображенный на рисунке 2.3.

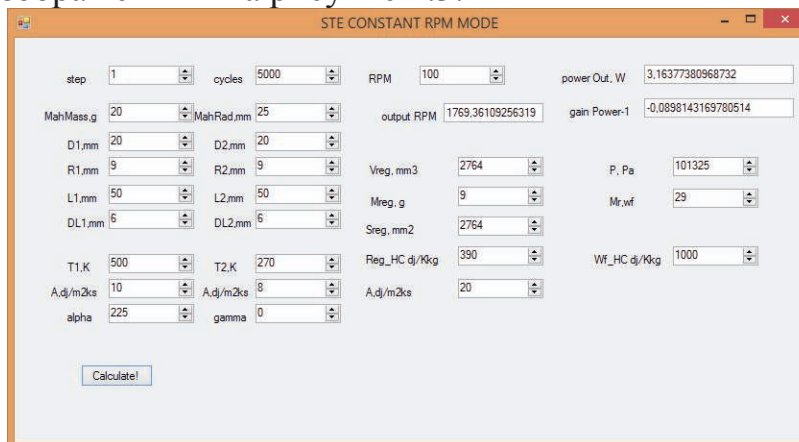


Рисунок 2.3. Интерфейс программы.

Программа выполнена в среде Visual Studio C# [34] и имеет следующие входные-выходные параметры слева на право соответственно: шаг итерации в градусах, количество циклов просчета, начальная скорость двигателя в оборотах в минуту, выходная мощность, масса маховика, радиус маховика (исполнение сплошном диском), выходная скорость двигателя в оборотах в минуту, увеличенная мощность по сравнению с предыдущим экспериментом, диаметр горячего цилиндра, диаметр холодного цилиндра, радиус крепления шатуна горячего поршня, радиус крепления шатуна холодного поршня, объём регенератора, начальное давление рабочего тела, длина шатуна горячего поршня, длина шатуна холодного поршня, масса регенератора, масса, молярная масса рабочего тела, длина мертвого объема в горячем цилиндре, длина мертвого объема в холодном цилиндре, площадь регенератора, температура горячего цилиндра, температура холодного цилиндра, теплоемкость материала регенератора, теплоемкость рабочего тела, коэффициенты теплопередач в горячем цилиндре, холодном цилиндре, регенераторе, угол расхождения креплений шатунов горячего и холодного цилиндра на маховике, угол между расположениями цилиндров.

Работа с программной моделью заключается в последовательном изменении исследуемых параметров оператором и оценка полученного результата в сравнении с предыдущим. Данный способ позволяет быстро находить основные зависимости в модели, быстро находить оптимум.

По сравнению с предыдущими программами было решено избавиться от прорисовки графиков в реальном времени в виду большого затраченного времени для проведения экспериментов, когда оператор программы был вынужден ждать пока работа модели придет в равновесие и лишь потом снимать новые показания. На практике было оценено что шаг итерации в 1 градус имеет достаточную точность для оценочных расчетов, количество в 5000 виртуальных оборотов двигателя достаточно для установления равновесия в системе.

2.6. Результаты моделирования о возможности конструирования двигателя.

Были получены ряды зависимостей для модели двигателя со следующими параметрами:

- температура горячего цилиндра 500К, холодного 270К;
- диаметр цилиндров 20мм;
- ход поршня 18мм;
- длина шатуна 50мм;
- масса маховика 20грамм;
- радиус маховика 25мм;
- рабочее тело - воздух(молярная масса 29г/моль, теплоемкость 1000 Дж/(кгК));
- начальное рабочее давление 101325 Па
- материал регенератора медь, труба 5x1мм(теплоемкость 390 Дж/(кгК));
- коэффициенты теплопередач в цилиндрах 8 Дж/м²Кс(стекло-воздух);
- коэффициенты теплопередач в цилиндрах 13 Дж/м²Кс(медь-воздух).

Для данной теоретической модели на рисунке 2.4. представлена зависимость мощности в ваттах и скорости двигателя в оборотах в минуту в зависимости от угла смещения креплений шатунов поршней двигателя а маховике.

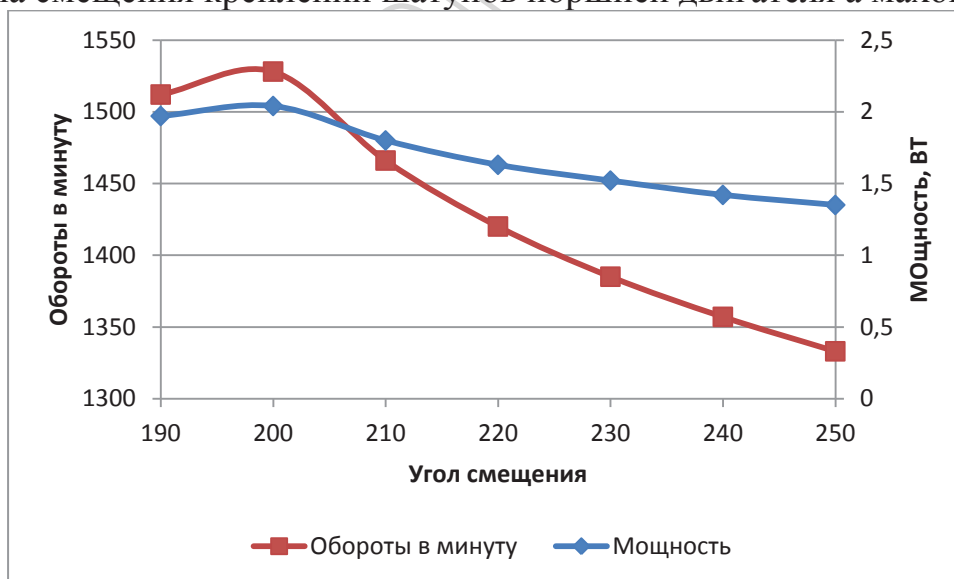


Рисунок 2.4. Зависимость мощности и оборотов от угла смещения.

Как видно из представленной зависимости, для данной теоретической модели оптимальным углом смещения двигателя является угол отличный от теоретического в 270 градусов для данной модификации двигателя.

Сравним как изменяться показания оборотов двигателя при увеличении площади и объема регенератора в два раза(зависимость представлена на рисунке 2.5).

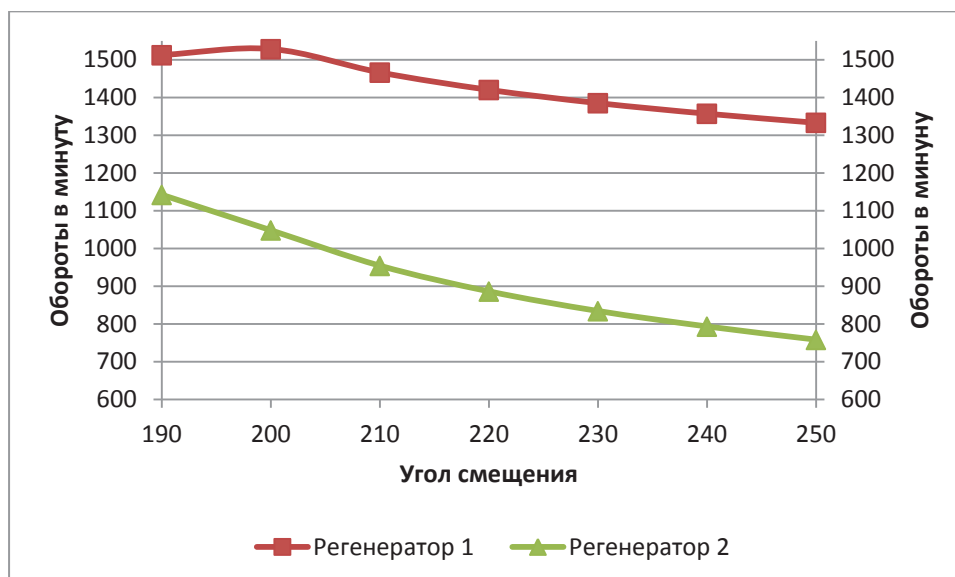


Рисунок 2.5. Зависимость оборотов в минуту от угла смещения при двух различных регенераторах.

Как видно, чрезмерное увеличение объема и площади регенератора приводит к падению мощности и оборотов двигателя.

При увеличении длины мертвого объема получили следующую зависимость представленную на рисунке 2.6.

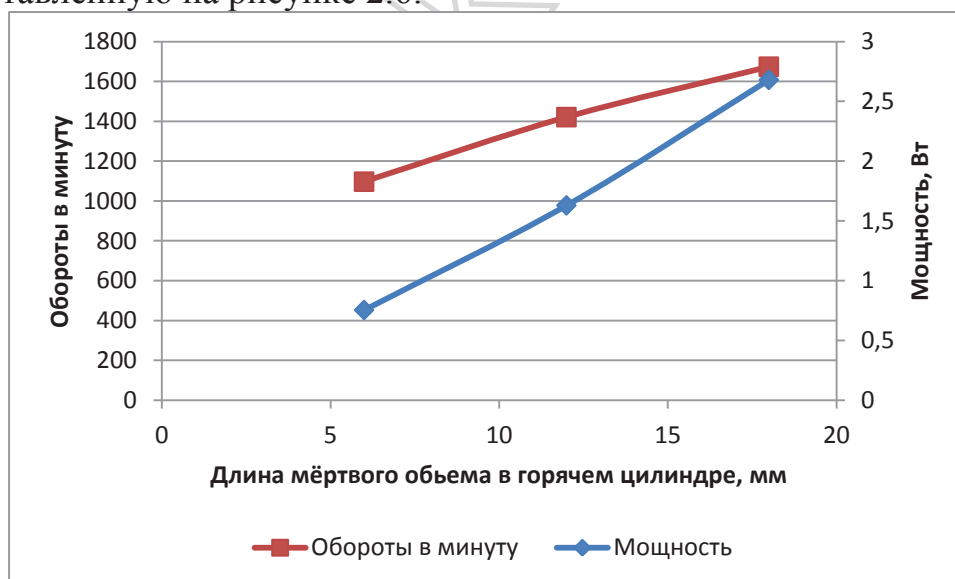


Рисунок 2.6. Зависимость мощности и оборотов от величины мертвого объема в горячем цилиндре.

Как видно из полученной зависимости при увеличении длины мертвого объема в горячем цилиндре, получаем некоторое увеличение мощности двигателя. Это происходит в виду большего объема рабочего тела и большей рабочей площади участвующего в теплообмене.

При увеличении мертвого объема в холодном цилиндре имеем зависимость представленную на рисунке 2.7.

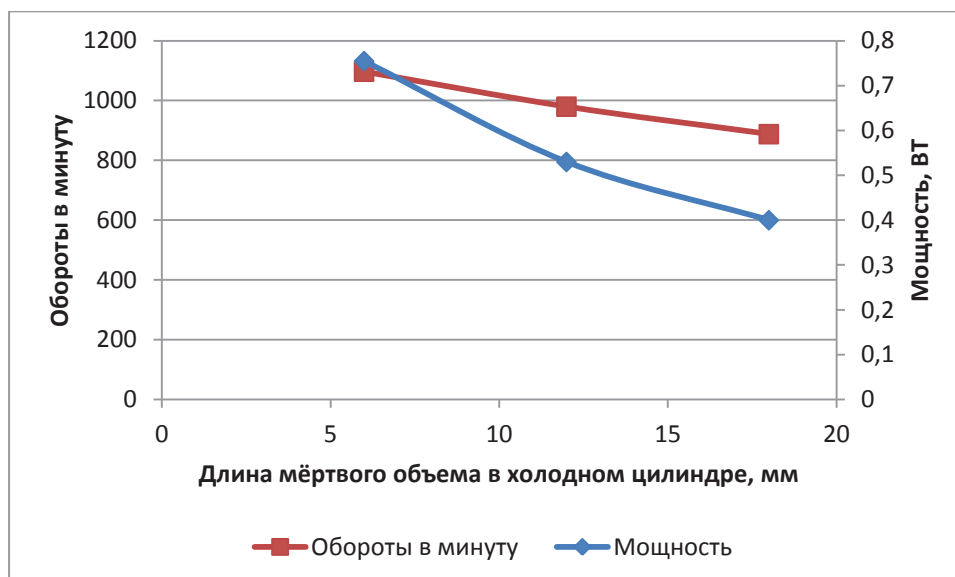


Рисунок 2.7. Зависимость мощности и оборотов от величины мертвого объема в холодном цилиндре.

Увеличение мертвого объема в холодном цилиндре, напротив приводит к потере мощности и скорости двигателя. Стоит полагать, что количество рассеиваемой энергии холодным цилиндром значительно меньше, чем способен на себя забирать регенератор.

При использовании в модели в качестве рабочего тела углекислый газ получили падение мощности в виду большей молярной массы (44 г/моль против 29 г/моль для воздуха) и несколько меньшей теплоемкости углекислого газа. Результаты в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Результаты испытаний модели с различным рабочим телом.

Газ	Обороты в минуту	Мощность
Воздух	1315	1,29
CO2	1017	0,602

В целом данная программа позволяет быстро оценить зависимости входных величин и оценить в каких пределах можно увеличит мощность двигателя при увеличении коэффициентов теплопередач, уменьшении молярной массы рабочего тела, уменьшения теплоемкости рабочего тела, увеличения рабочего давления, увеличения площади цилиндров и т.д.

3.1. Выбор модификации двигателя для исследования.

Для создания лабораторной установки был выбран тот же тип двигателя под который разрабатывалась программная модель. Альфа тип двигателя Стирлинга довольно простой в своей конструкции. Горячий и холодные цилиндры и регенератор в данной модификации двигателя выполнены отдельно, что позволяет менять их параметры и конструкцию независимо друг от друга. А так же исследовать происходящие в них процессы по отдельности.

3.1. Исходные требования.

Исходными требованиями к конструкции двигателя являются:

- возможность регулирования хода поршней;
- возможность регулирования мертвых объемов в цилиндре;
- возможность регулирования угла смещения крепления шатунов;
- возможность регулирования длины шатунов;
- возможность замены регенератора;
- прозрачная стена горячего цилиндра для последующих экспериментов с тепловым излучением;

3.2. Описание конструкции лабораторной установки.

Конструкция двигателя представлена на рисунке 3.1.

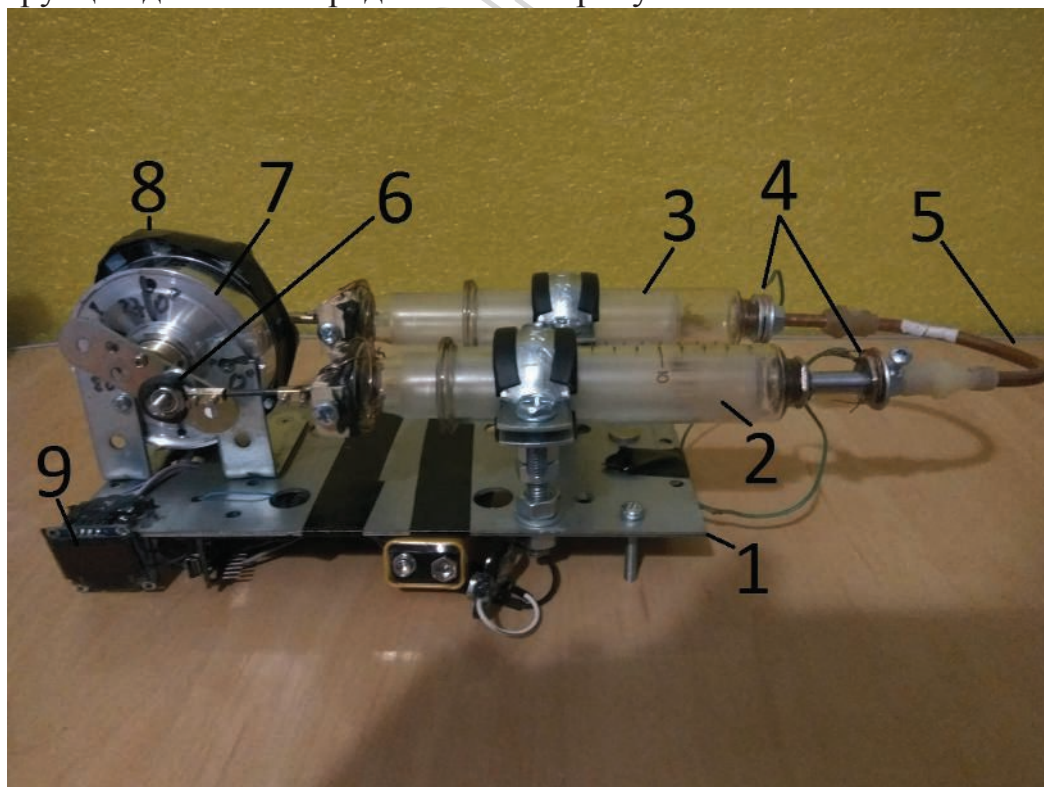


Рисунок 3.1. Лабораторная установка.

Установка смонтирована на металлической плите 1, на стойках из шпилек М8 и двух сантехнических хомутах установлены горячий 2 и холодный цилиндры 3. В местах крепления регенератора к штуцерам цилиндров установлены термодары 4. Регенератор 5 разрезан и закреплен на уплотняющих резинках, что позволяет быстро снимать и менять конструкцию регенератора. Шатуны

закреплены с подшипниками 6 скруткой и пайкой. Сами шатуны можно быстро заменять регулируя тем самым их длину при необходимости. Это возможно благодаря применению быстросъемного соединения выполненного из электротехнических конвекторов. Корпус от электродвигателя видеомagnитофона 7 закреплен неподвижно на основании плиты 1 металлическими уголками. Внутри корпуса электродвигателя имеется два подшипника, в которые закреплен вал маховика 8. На маховике 8 по периметру установлены грузы для увеличения его инерции. Так же на маховике закреплен один постоянный магнит для датчика Холла, позволяющий снимать частоту оборотов маховика электрической частью выводя на дисплей 9 обороты и разность температур на входе горячего и холодного цилиндра.

3.3. Описание методов проведения эксперимента.

Двигатель работает на разности температур между холодным и горячим цилиндром. При поднесении источника тепла необходимо подождать пока рабочее тело прогреет пространство регенератора. Для этого необходимо периодически прокручивать маховик резкими движениями, перекачивая тем самым рабочее тело от горячего цилиндра к холодному через регенератор. По мере прогрева двигатель должен оказывать все меньшее сопротивление при прокручивании маховика, пока, наконец, сам не придет в движение. После чего двигатель должен проработать несколько минут и выйти на устоявшийся режим, о чем будет свидетельствовать окончание роста перепада температур двигателя выводимых на дисплей. После чего можно проводить эксперименты над двигателем.

С помощью винта 10 зажимающего вал, можно задавать углы смещения креплений шатунов горячего и холодного поршня(рисунок 3.2). Для того чтобы установленные углы расхождения можно было считывать я взял за правило перед установкой углов поршень холодного цилиндра относить в крайнее верхнее положение а на неподвижный корпус нанес градусные метки угла.

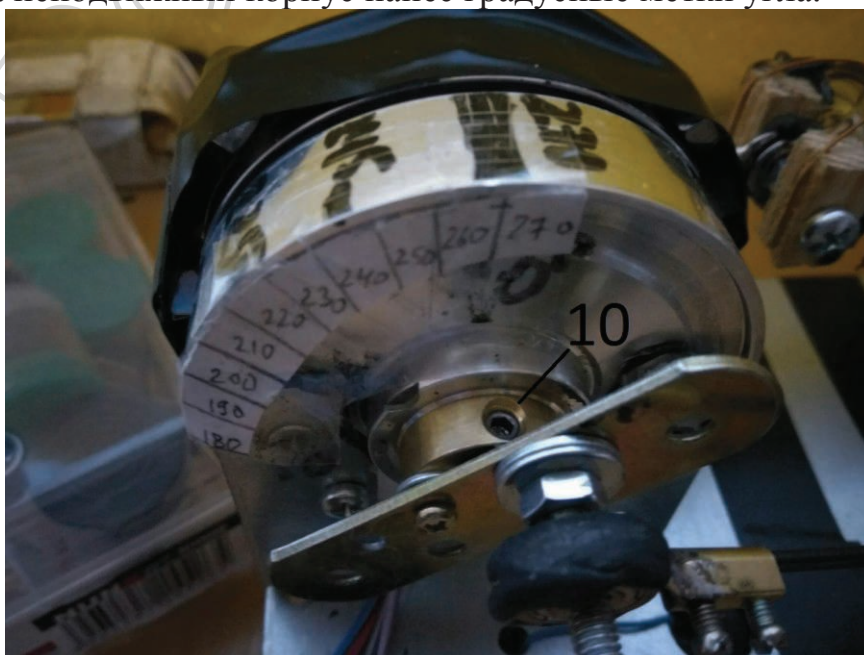


Рисунок 3.2. Установка угла расхождения.

При помощи хомутов изображенных на рисунке 3.3 можно быстро менять конечные положение цилиндров, тем самым быстро меняя размеры мертвых объемов в цилиндрах.



Рисунок 3.3. Установка мертвых объемов фиксацией цилиндров.

В качестве источника тепла может служить спиртовка или галогеновая лампа накаливания которая для большей эффективности нагрева цилиндра и удобства работы с ней заизолированная фольгой(рисунок 3.4.).



Рисунок 3.4. Работа двигателя от галогеновой лампы накаливания в качестве источника тепла.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ.

С целью проведения оценки адекватности полученной ранее программной модели проведем ряд характерных экспериментов с лабораторной моделью и сравним их с программной.

4.1. Нахождение оптимального угла смещения.

Теоретически угол смещения в двигателе Стирлинга для данной модификации должен составлять 270 градусов, однако в виду малой мощности двигателя и малой массы маховика, холодный цилиндр не способен под воздействием инерции маховика столь сильно охладить и сжать газ в холодном цилиндре в данной конструкции. Тем не менее, оптимальные результаты полученные данной лабораторной и программной моделью довольно близки и представлены на рисунке 4.1.

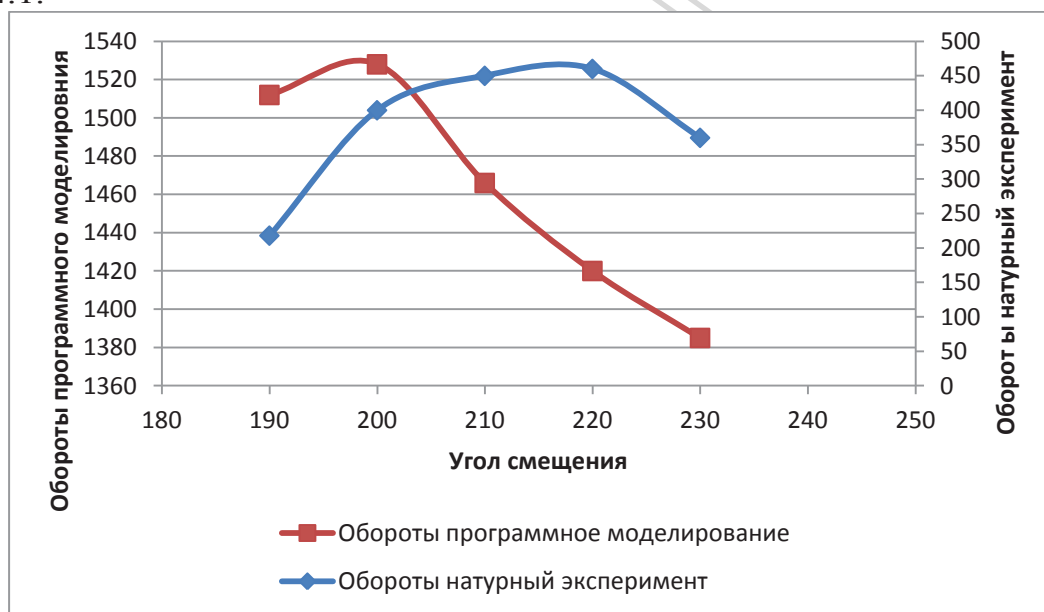


Рисунок 4.1. Зависимость мощности и оборотов от угла смещения теоретической и натурной модели.

Стоит отметить, что в виду отсутствия дисбалансов и сил трения в программной модели - количество оборотов и выходная мощность выше, однако сходные тенденции наблюдаются.

4.2. Нахождение оптимального размера регенератора.

Сравним поведение реальной модели и полученной ранее программной модели при увеличении объема и площади регенератора в 2 раза. Зависимость представлена на рисунке 4.2.

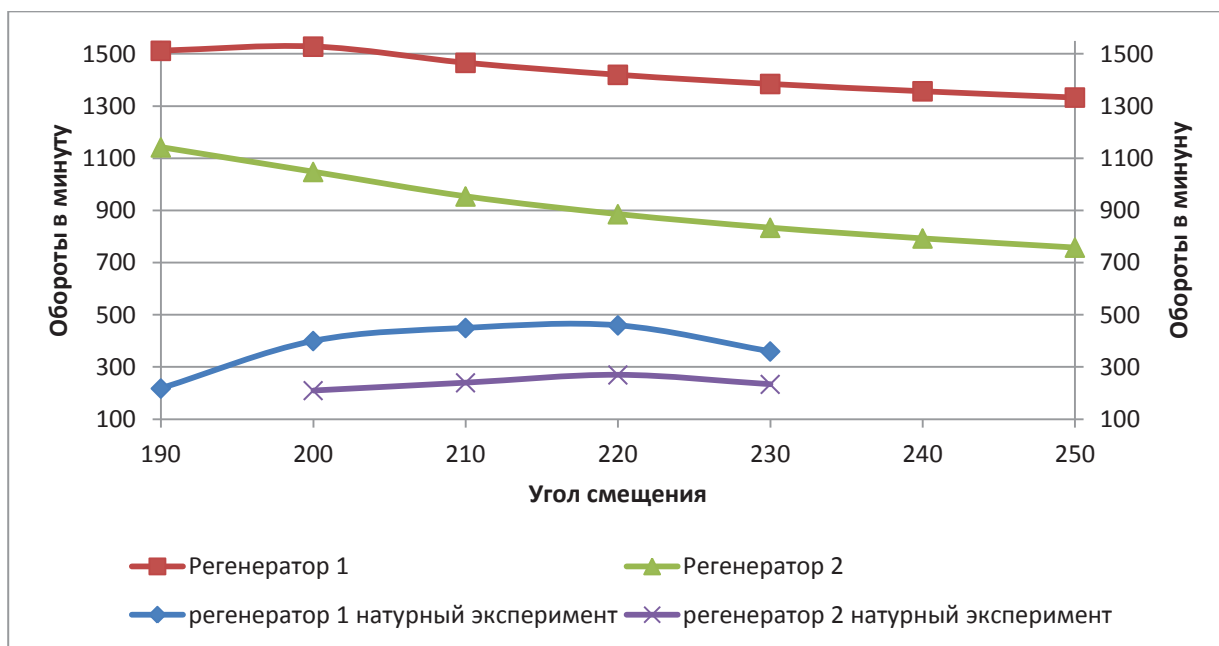


Рисунок 4.2. Зависимость оборотов от угла смещения теоретической и натурной модели при двух различных регенераторах.

Общая тенденция полученная программной моделью в целом подтверждена натурным экспериментом, таким образом при наличии данных о двигателе и его режимах можно оценивать подбираемые размеры регенератора.

4.3. Нахождение оптимальной длины мертвого объема.

Было получено кардинальное расхождение с теоретической моделью при увеличении мертвого объема горячего цилиндра. Зависимость представлена на рисунке 4.3 .

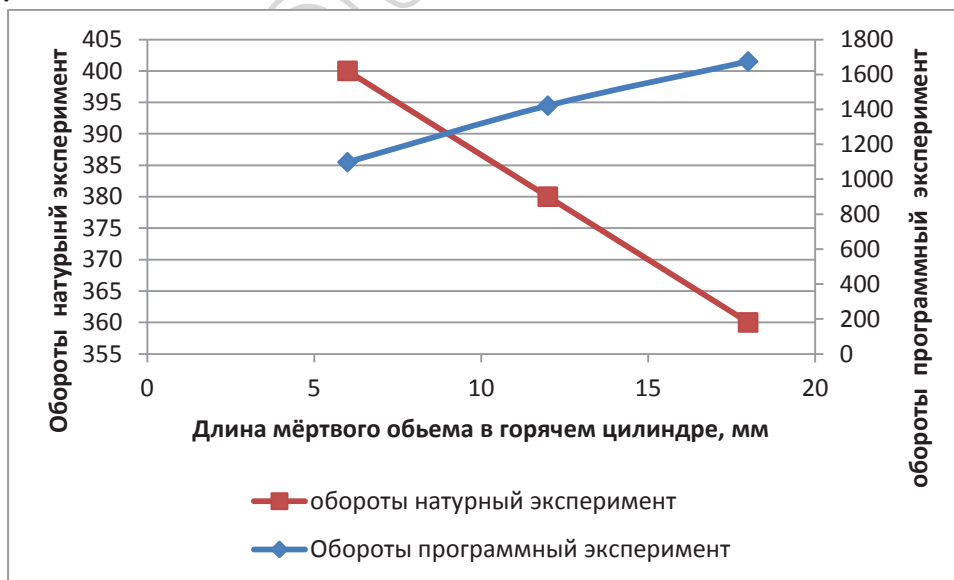


Рисунок 4.3. Зависимость оборотов от величины мертвого объема в горячем цилиндре теоретической и натурной модели.

Данный результат позывает принципиальное расхождение, которое следует учесть в дальнейшей доработке программной модели.

Для холодного цилиндра имеется так же диспропорциональное расхождение, представленное на рисунке 4.4.

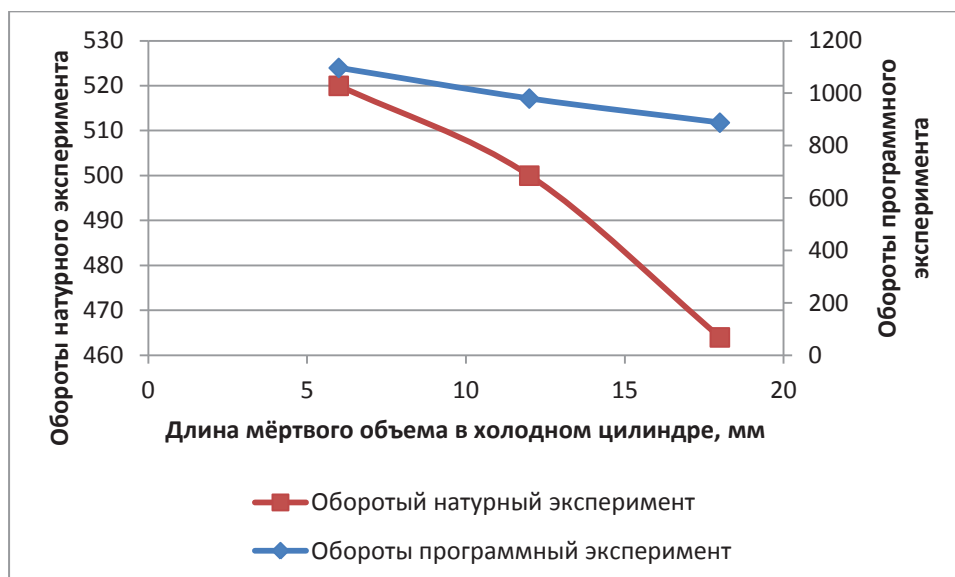


Рисунок 4.4. Зависимость оборотов от величины мертвого объема в холодном цилиндре теоретической и натурной модели.

В то время как программная мощность и обороты падают линейно - в реальной модели - данная зависимость носит более драматичный характер, что указывает на необходимость внесения новых зависимостей в программную модель. Данный эффект наблюдается потому что при увеличении мертвого объема в реальном двигателе интенсивность движения рабочего тела в цилиндре падает - падает и коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочему телу. В то время как в программной модели он задан постоянным и линейное увеличение объема приводит к линейному увеличению мощности в виду линейного увеличения площади теплопередающих поверхностей.

Конечно же, не смотря на то, что явление мертвого объема носит негативный характер на работу реального двигателя – выявление данного аспекта расхождения программы с экспериментом крайне важно. Так как данный эксперимент выявил существенный недостаток программной модели. А значит что при различных режимах работы, там, где реальная модель из-за пониженных оборотов будет терять в мощности - программная модель в виду фиксированного коэффициента теплоотдачи не заметит данного влияния. И явления повышенной турбулентности потока на высоких оборотах и неполная циркуляция рабочего тела может быть не учтена. Поэтому для увеличения адекватности модели в этом аспекте требуется внести более подробные законы влияния коэффициентов теплоотдачи в цилиндрах при различных режимах его работы.

4.4. Оценка влияния радиационной энергии для интенсификации коэффициента теплопередачи.

Меня интересовала возможная эффективность использования светового излучения для непосредственного подогрева рабочего тела через прозрачную стенку цилиндров. Непосредственное воздействие на рабочее тело, возможно, могло бы значительно увеличить общий коэффициент теплопередачи. Был поставлен эксперимент с рабочим парниковым рабочим телом углекислотой.

Двигатель был избыточно продут и заправлен углекислотой через тройник, капельницу и шарик как показано на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5. Заправка двигателя углекислотой.

После заправки система отсекалась, и проводился эксперимент. Использование углекислоты привело к предсказуемому падению мощности двигателя, однако целью эксперимента является оценка радиационной составляющей в процессе сообщения тепла рабочему телу в двигателе. Для этого при прочих равных было поставлено 2 эксперимента:

- с открытым цилиндром освещаемого галогеновой лампой накаливания и заизолированным по периметру светоотражающей фольгой.

- с закрытым цилиндром с непрозрачным черным кожухом из окрашенной фольги(рисунок 4.6), который так же был освещен галогеновой лампой накаливания и заизолирован по периметру светоотражающей фольгой.



Рисунок 4.6. Световая изоляция для проведения эксперимента. Данные представлены на рисунке 4.7.

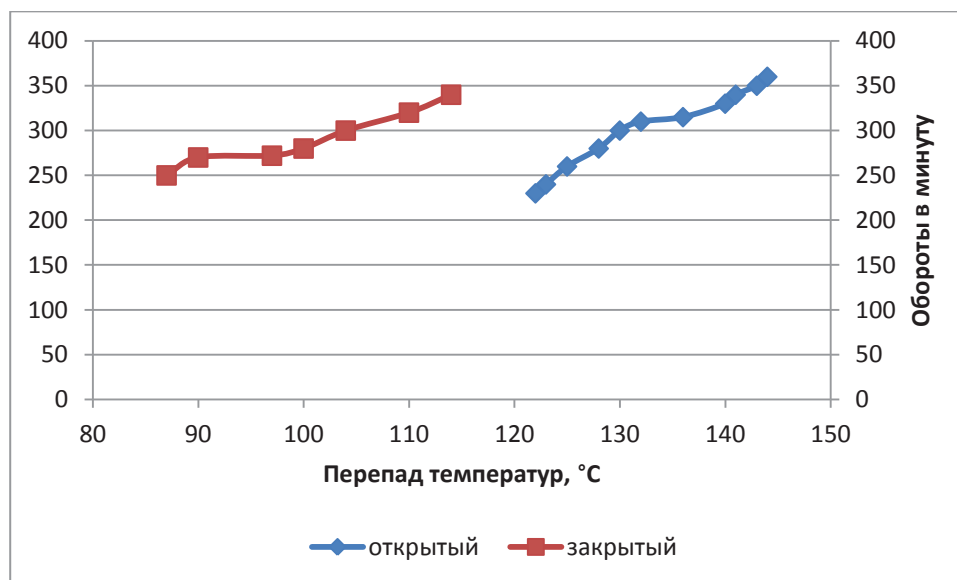


Рисунок 4.7. Зависимость оборотов температурного перепада между цилиндрами при облучении светом открытого и закрытого цилиндра.

Из результатов эксперимента имеем что черный непрозрачный кожух, установленный на цилиндре способен отдавать гораздо больше тепловой энергии газу, чем непосредственно световое излучение через прозрачную стенку. Однако тот факт что двигатель с закрытым цилиндром работал при более низких перепадах температур от 90 °C до 110°C, в то время как с открытым цилиндром тот же двигатель с тем же рабочим телом не работал до того как цилиндр не прогрелся до 120 °C свидетельствует о том, что радиационная передача энергии непосредственно рабочему телу имеет место быть. В противном случае, если бы все дело было в более эффективном преобразовании световой энергии непрозрачным черным кожухом в тепло, мы бы наблюдали более интенсивный разогрев цилиндра. И более отрицательный результат при казалось бы многократном отражении и прохождении светового излучения через стекло цилиндра и рабочее тело свидетельствует о несоответствии спектра поглощения углекислого газа к излучающему спектру греющей лампы. Из этого можно сделать выводы о возможности подбора газа или смеси газов для более эффективного поглощения тепловой или солнечной энергии.

5.1. Применения в традиционной энергетике.

На данный момент ДС успешно применяются в качестве преобразователей солнечной энергии [35] и когенерационных установках по получении энергии и тепла на местном топливе. Причём необходимо отметить, что т.к. рабочее тело двигателя находится в замкнутом объёме, то тепловые потери, в следствии уноса теплосодержащих потоков, рабочего тела отсутствуют, то при использовании тепла в качестве обогрева в бытовом теплоснабжении, которое двигатель не способен превратить в работу – КПД всей установки в целом составляет 92...94%.

В данной работе рассматривается возможность использования в качестве источника энергии для двигателя стирлинга вторичных энергетических ресурсов, низко, средне и высокопотенциальных тепловых выбросов химических и нефтехимических производств. Как правило, на сегодняшний день на первом месте для утилизации лишней тепловой энергии, заключённой в энергии пара стоят паровые турбины различного давления. КПД турбин, как и двигателя стирлинга ограничен КПД соответствующего идеальному циклу Карно.

$$\eta = \frac{T_{ист} - T_{окр}}{T_{ист}}$$

где:

$T_{ист}$ – температура источника ВЭР;

$T_{окр}$ – температура охлаждающей окружающей среды, например кипящей воды или окружающего воздуха, проточной воды.

На рисунке 5.1 представлен график КПД цикла Карно в зависимости от температуры источника ВЭР.

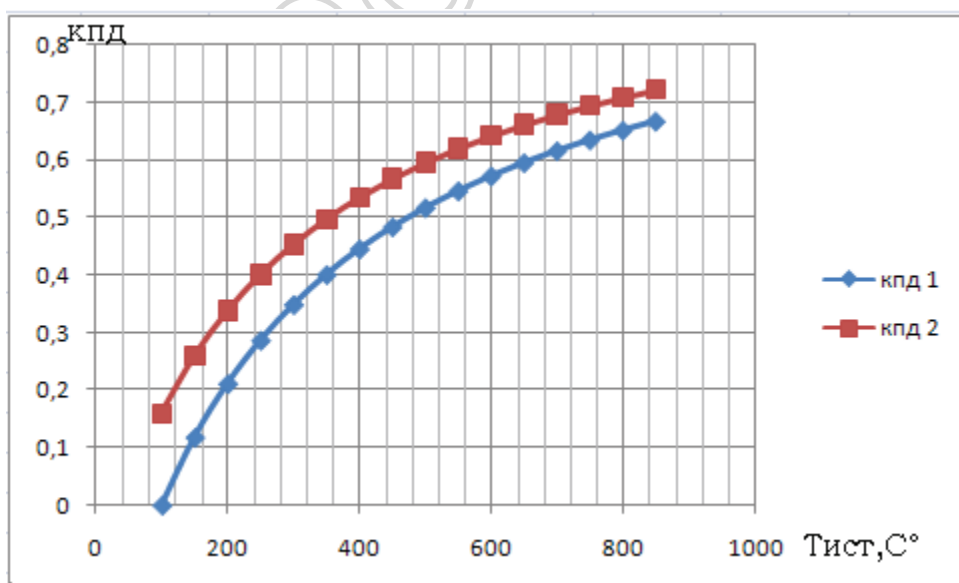


Рисунок 5.1. Сравнение КПД цикла Карно в зависимости от температуры источника ВЭР для

паровой турбины и двигателя Стирлинга.

Как видно из представленного графика, КПД цикла Карно растёт при увеличении разности температуры источника ВЭР и холодильника. Эти зависимости для паровой турбины (синяя линия «кпд 1») и для стирлинга (красная линия «кпд 2») абсолютно идентичны, однако температура окружающей среды для паротурбинной установки ограничена температурой холодильника – конденсирующегося водяного пара (при н.у. 100°C), в то время как для двигателя стирлинга температура холодильника ограничена температурой окружающей среды (например как при применении АВО выходная температура с учётом тепловых потерь на сопротивлении материалов под тепловой нагрузкой в 40°C в летнее время). При использовании проточной воды температура холодильника может быть гораздо ниже. Стоит так же отметить, что в наших широтах температура холодильника большую часть года, а особенно в зимнее время может быть и значительно ниже, что даст ещё больший прирост эффективности двигателю Стирлинга.

Таким образом, видно, что двигатель Стирлинга можно использовать при утилизации тепловых потоков химических и нефтехимических производствах, при этом имеются некоторые преимущества с существующими способами утилизации, а в частности:

- более высокая эффективность из-за более низких температур холодильника.
- малое время пуска двигателя по сравнению с временем пуска турбин.
- более простая и соответственно более экономичная технологическая схема, из-за отсутствия циркулирующей воды и пара.
- обратимость теплового цикла, т.е. уникальность данного двигателя в том, что он может работать как двигатель, так и тепловой насос.

Последнее упомянутое свойство обратимости цикла в теории может значительно упростить процесс управления большинства технологических процессов управляя тепловой энергией технологических потоков, забирая излишки тепла в виде механической энергии при обычной работе. А так как зачастую при пуско-наладочных работах, нарушениях режима некоторые потоки которые при обычных режимах работы несут большое количество тепловой энергии необходимо подогреть для возможности дальнейшей циркуляции. Будь то застывшая секция АВО или технологический теплообменник - при сообщении механической энергии извне любой двигатель Стирлинга превращается в тепловой насос.

5.2. Применение в альтернативной энергетике.

Успех применения двигателей Стирлинга в альтернативной энергетике не вызывает сомнений. Перспектива получения электрической энергии в любом месте без подвода воды при приложении простого градиента температур к системе очень заманчива. Особенно для пустынных местностей, где доступ к воде ограничен и обслуживание затруднено[36].

Закрытость цикла, отсутствие фильтров и сложных систем смазки, возможность изготовления деталей из абсолютно инертных химических материалов делают проекты двигателей Стирлинга пусть и капиталоемкие но и долгосрочно действующие проекты.

Возможно уже близок тот день, когда солнечная энергетика перестанет быть альтернативной. Уже сейчас крупные американские корпорации в борьбе за свое будущее создают свои коммерческие сети бесплатной по бесплатной установке солнечных панелей, сети бесплатных зарядок электрокаров Tesla уже доступны по всей Америке. Всё это сейчас части будущих восходящих монополий и энергетических империй которые уже сейчас создают клиентскую базу, инфраструктуру и борются с возможными конкурентами постоянно совершенствуя продукцию, повышая массовый эффект на производствах, снижая себестоимость, внося модульность и стандартизацию в свои продукты[38].

Двигатели Стирлинга постоянно совершенствуются, так уже в 2013 году, уже другой шведской компанией Ripasso Energy планка эффективности преобразования солнечной энергии повышена до 32% по сравнению с рекордом 2011 года 31.25 % [37].

Отсутствие стандартизации и массовости - основная причина высокой стоимости всех коммерческих проектов по двигателям Стирлинга.

Стоит отметить что на данный момент солнечные батареи существенно развили свою эффективность и на сегодняшний день достигнута эффективность в 46 % [39]. Однако солнечные батареи так же имеют свои недостатки как устаревание, ухудшение КПД при перегреве, специфичность спектров поглощения, необходимость равномерного излучения на всю поверхность модулей и т.д.

В свою очередь для конкуренции Стирлинга с солнечными батареями встает вопрос о критерии эффективности увеличения охватываемой одним модулем площади солнечных концентраторов.

Заключение

В ходе проведенной работы была разработана математическая модель работы двигателя Стирлинга альфа типа. Создана программа позволяющая проводить численные эксперименты с разработанной моделью. Создана реальная лабораторная установка двигателя Стирлинга. Проверена адекватность полученной программной модели для моделирования работы двигателя Стирлинга путем сравнения полученных результатов программной модели с натурным экспериментом. Найдены слабые места полученной ранее программной модели. Оценена возможность применения парниковых газов в качестве рабочего тела двигателя.

PolotskSU

Список использованной литературы

1. Утилизация вторичных энергетических ресурсов [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <http://lotosh.lgb.ru/fopp/txt/secondenerg.pdf>Дата доступа: 10.02.2017.
2. Выработка электроэнергии за счет утилизации тепла.[Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.gasenergo.ru/elektroenergetik/utiliz.htm>– Дата доступа: 10.02.2017.
3. Эффективное использование низкопотенциального тепла А. В. Дзиндзела, А. В. Сизякин Библиотека научных статей Энергосбережение №1'2012.
4. Официальный сайт компании Солар Сити. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.solarcity.com/newsroom> Дата доступа: 10.02.2017.
5. Официальный сайт компании Тесла моторс. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tesla.com/> Дата доступа: 10.02.2017.
6. Эффективность солнечных батарей. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency Дата доступа: 10.02.2017.
7. Шалавин С.А.Чернявский В.В. «Разработка математической модели двигателя стирлинга альфа модификации» Труды молодых специалистов ПГУ. 2012. – С. 194-197
8. Шалавин С.А.Чернявский В.В. «Применение библиотеки отображений информации в графическом виде процесса численного исследования работы двигателя стирлинга» Труды молодых специалистов ПГУ. 2012. – С. 197-202
9. Шалавин С.А.Чернявский В.В. «Программная реализация математической модели двигателя стирлинга.» Труды молодых специалистов ПГУ. 2012. – С. 203-205
10. История стирлингов. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.stirlingmotors.ru/History.htm>– Дата доступа: 10.02.2017.
11. Stirling international - History. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.stirlinginternational.org/docs/presentations/history.asp> Date of access: 10.02.2017.
12. Philips Stirling Engine. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.deutsches-museum.de/en/collections/machines/power-engines/combustion-engines/hot-air-machines/philips-stirling-engine> Date of access: 10.02.2017.
13. GM research engines]. – Mode of access: <http://www.civilengineeringhandbook.tk/stirling-engines/gm-research-engines.html> Date of access: 10.02.2017.
14. Advensed Stirling Converter]. – Mode of access: <https://tec.grc.nasa.gov/rps/stirling-research-lab/advanced-stirling-converto> Date of access: 10.02.2017.
- 15.История развития техники и технологии. Вениамин Федюкин, Геннадий Зайцев, Светлана Атрошенко Политехника издательство Санкт-Петербург 2012
16. Continuously variable transmission Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Continuously_variable_transmission Date of access:

10.02.2017.

17. The History of Stirling Refrigeration. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://stirlingultracold.com/print.php?pg=history> Date of access: 10.02.2017.

18. XXI век и холодильное дело. [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_10_2008_TrendsXXI.htm – Дата доступа: 10.02.2017.

19. Патент RU 2300654 С1, 27.07.2006. Жаров Александр Викторович, Павлов Александр Анатольевич. Когенерационная установка с двигателем внутреннего сгорания и двигателем стирлинга Заявка. 2010118930/06, 11.05.2010. Действует 11.05.2010. Опубликовано. 20.01.2012– 7 с.

20. Двигатель внешнего сгорания (двигатель Стирлинга) [Электронный ресурс].- Режим доступа. <http://renewable.com.ua/heat-machines/3-dvigatel-stirlinga.html> – Дата доступа: 10.02.2017.

21. Stirling Energy Systems set new world record for solar-to-grid conversion efficiency. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2008/solargrid.html> Date of access: 10.02.2017.

22. Двигатель Стирлинга. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://solareview.blogspot.com/2010/06/blog-post_19.html – Дата доступа: 10.02.2017.

23. Использование иерархии модели газа при компьютерном моделировании и проектировании теплового двигателя. Волгин М.А. ФГБОУ ВПО Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, г. Ковров, 20.09.2011г.

24. Газогенераторные установки двигателя стирлинга. С.А. Горожанкин. Двигатели внутреннего сгорания 2'2007.

25. Расчетно-экспериментальное исследование процессов в двигателе Стирлинга, предназначенном для утилизации бросовой теплоты. Рыбалко И.А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Барнаул - 2011

26. Термодинамическая модель процессов, протекающих в контуре двигателя Стирлинга В.С. Кулис, П.К. Сеначин, А.И. Рыбалко Ползуновский вестник №4/2 2010

27. Конструкции двигателей Стирлинга [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.stirlingmotors.ru/Konstrukzion.htm> – Дата доступа: 10.02.2017.

28. Stirling engine Alpha model [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.robertstirlingengine.com/alpha_uk.php- Date of access: 10.02.2017.

29. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. А.А. Самарский. Москва “Наука” 1988.

30. Уравнение состояния идеального газа. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Уравнение_состояния_идеального_газа. – Дата доступа: 10.02.2017.

31. Закон Ньютона—Рихмана. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Ньютона_—_Рихмана. – Дата доступа:

10.02.2017.

32. Законы Дальтона. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Законы_Дальтона. – Дата доступа: 10.02.2017.

33. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. / Под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд., перераб. и доп.. — М.: Машиностроение, 2001. — 416 с.

34. Microsoft Visual Studio [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.microsoft.com/visualstudio/rus> - Date of access: 10.02.2017.

35. Патент US PCT/US10/54913 1,10, 2010, 30,08, 2012. Garaway; Isaac; (Kfar Tavor, IL) ; Harel; Erez; (Misgav, IL) ; Sosa Naranjo; Cristina; (Seville, ES) ; Munoz Gilabert; Felix; (Seville, ES) STIRLING ENGINE SOLAR CONCENTRATOR SYSTEM. Заявка. 1.10.2010. Действует 2.05.2012. Опубликовано 1.10.2010.

36. Solar powered Stirling Engine. [Electronic resource]. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar-powered_Stirling_engine Date of access: 10.02.2017.

37. Solar Stirling Engine Efficiency Records Broken by Ripasso Energy. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.greenoptimistic.com/solar-stirling-engine-ripasso/#.WKq2D2-LTIU> Date of access: 10.02.2017.

38. Tesla power wall [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tesla.com/powerwall> Date of access: 10.02.2017.

39. Solar cell [Electronic resource]. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Efficiency. Date of access: 10.02.2017.