

VI Международный конкурс исследовательских работ школьников  
«Research start» 2023-2024

Научно-исследовательский проект  
«СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА»

Выполнил учащийся  
11 класса МБОУ СОШ № 103  
муниципального образования  
город Краснодар  
Савкин  
Иван Дмитриевич

Научный руководитель:  
учитель физики  
МБОУ СОШ № 103  
Пахомов Александр Сергеевич

Краснодар  
2024

## **Введение**

**Проблема:** в курсе физики десятого класса ученики проходят тему «Тепловые двигатели», которая плохо усваивается учащимися.

## **Актуальность**

Во втором полугодии десятого класса на уроках физики ученики проходят тему «Тепловые двигатели» данная тема плохо воспринимается учащимися. Это связано с довольно сложными для понимания процессами, происходящими в самом двигателе. Несмотря на это, тема довольно интересная. Ярким примером парового двигателя является разработка Роберта Стирлинга «двигатель Стирлинга». Существует множество разных видов такого двигателя. В ходе практического проекта мы будем собирать маломощную модель данного двигателя в домашних условиях.

Тепловой двигатель - двигатель, в котором тепловая энергия преобразуется в механическую работу. Тепловые двигатели составляют наибольшую группу среди первичных двигателей. В основе работы теплового двигателя лежит замкнутый (или условно замкнутый) термодинамический цикл. Эффективность работы идеального теплового двигателя определяется термодинамическим КПД теплового двигателя. Эти двигатели широко используются в жизни человека.

Практическая актуальность нашего проекта заключается в том, что модель, созданную в ходе данной практической работы, можно будет использовать на уроках физики для демонстрации принципа работы теплового двигателя учащимся десятого класса.

**Объект исследования:** тепловые двигатели.

**Предмет исследования:** двигатель Стирлинга.

**Замысел:** созданная модель позволит продемонстрировать принцип работы двигателя Стирлинга. Модель будет представлять собой два цилиндра из жестяной банки, в которой будет находиться поршень-вытеснитель, частично выполненный из стекловаты, и алюминиевой трубки, где будет расположен рабочий поршень, сделанный из эпоксидного пластилина. Работать данная конструкция будет за счет кривошипно-шатунного механизма.

**Цель:** создание модели двигателя Стирлинга в домашних условиях и апробация его работы.

**Гипотеза:** мы предполагаем, что модель, которая будет создана в ходе работы, сможет облегчить понимание темы «Тепловые двигатели» для десятиклассников.

**Задачи:**

1. Проанализировать теоретическую литературу по теме проекта.
2. Создать действующую модель двигателя Стирлинга в домашних условиях.
3. Получение экспертной оценки.

**План:**

№ п/п	Вид деятельности	Сроки		Ожидаемый результат
		Начало	Окончание	
1.	Дать определение понятиям: тепловой двигатель, термодинамический цикл, тепловой баланс, конструктивные схемы, термодинамическое КПД	Сентябрь 2022	Октябрь 2022	Обзор основных понятий, приобретение необходимых, фундаментальных знаний
2.	Определить методы исследования	Октябрь 2022		Описание метода исследования
3.	Провести анализ трёх типов моделей двигателя Стирлинга	Ноябрь 2022		Описание наиболее подходящей модели

4.	Закупка необходимых материалов	Декабрь 2022		Список всего необходимого для сборки конструкции
5.	Создание и апробация двигателя в домашних условиях	Январь 2023	Февраль 2023	Описание работы модель двигателя Стирлинга
6.	Налаживание механизма, подгон деталей	Февраль 2023		Бесперебойная работа двигателя
7.	Определение эксперта	Март 2023		Список экспертов
8.	Создание экспертного листа	Апрель 2023		Экспертный лист
9.	Проведение экспертной оценки	Апрель 2023		Данные экспертной оценки.

## **1. Теоретическая часть**

### **1.1 Методы исследования**

В ходе работы над проектом были определены методы:

Литературный обзор - это изучение литературы по вопросу проекта. С помощью этого метода были даны определения основным понятиям проекта.

Экспертная оценка - получение оценки от специалиста по вопросу проекта. С помощью этого метода была получена оценка модели двигателя Стирлинга.

Инструментальный метод - эксперимент с помощью каких-либо дополнительных средств.

Так же были определены теоретические методы: анализ, сравнение обобщение.

Анализ - метод научного исследования путем рассмотрения отдельных сторон, свойств, составных частей.

Сравнение - метод сопоставления двух и более объектов, выделение в них общего и различного с целью классификации технологий. Обобщение – метод, используемый для объединения нескольких видов понятий в одном рядовом понятии.

С помощью этих методов были проведены анализ материалов проекта, его структурное оформление, сделаны выводы и написано заключение.

### **1.2 Биография Стирлинга**

Стирлинг родился в Клог Фарме недалеко от Метвена, Шотландия. Он был третьим ребёнком в семье, а всего детей было восемь. От отца он унаследовал интерес к конструированию техники, но изучал богословие и стал священником Шотландской Церкви в местечке Лайф Кирк в 1816 году

Проживая в Килмарноке, Стирлинг сотрудничал с другим изобретателем — Томасом Муртоном, который предоставлял Стирлингу всё своё оборудование и инструменты для проведения опытов. Они оба интересовались астрономией. У Муртона Стирлинг научился шлифовать линзы, после чего изобрел ряд оптических приборов. [3]

Стирлинг был весьма обеспокоен травматизмом рабочих, работающих в его приходе с паровыми двигателями. Эти двигатели часто взрывались из-за низкого качества металла, из которого они изготавливались. Более прочного материала в те годы не существовало. Стирлинг решил усовершенствовать конструкцию теплового двигателя сделав его более безопасным. В последствии изобретя Двигатель Стирлинга.

Стирлинг умер в Галстоне, Шотландия в 1878 году [3]

### **1.3 Определение Двигателя Стирлинга, основных понятий и история его создания**

Двигатель Стирлинга — тепловая машина, в которой рабочее тело в виде газа или жидкости движется в замкнутом объёме, разновидность двигателя внешнего сгорания. Основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела с извлечением энергии из возникающего при этом изменения давления. Может работать не только от сжигания топлива, но и от любого источника тепла. [5]

Тепловой двигатель — это периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет получения теплоты. [5]

Термодинамический цикл — круговой процесс в термодинамике, то есть такой процесс, в котором начальные и конечные параметры, определяющие состояние рабочего тела (давление, объём, температура, энтропия), совпадают. Термодинамические циклы являются моделями процессов, происходящих в реальных тепловых машинах для превращения тепла в механическую работу. [8]

Тепловой баланс — это соотношение процессов теплопродукции, теплоудержания и теплоотдачи, т.е. баланс между системами, продуцирующими тепло и системами, в которых это тепло теряется.

Теплопродукция в основном является результатом биохимических процессов, теплоотдача и теплоудержание — преимущественно результат физических процессов. [8]

Термодинамическое КПД — отношение работы к подводимой теплоте для прямого цикла или отношение работы цикла к отводимой теплоты для обратного цикла. [8]

В 1816 году уроженец Шотландии Роберт Стирлинг запатентовал тепловую машину, которую сегодня называют в честь своего создателя. [9]

Изначально, установку разрабатывали с целью заменить машину, работающую за счёт пара. Котлы паровых механизмов взрывались, при превышении допустимых норм давлением. С этой точки зрения Стирлинг намного безопасней, функционирует, используя температурный перепад.

Несмотря на такой быстрый успех продвижения модели, в начале двадцатого столетия от дальнейшего развития двигателя внешнего сгорания отказались из-за его себестоимости в пользу двигателя внутреннего сгорания. [9]

#### 1.4 Виды Двигателей Стирлинга

##### Конструкция исполнения «Альфа»

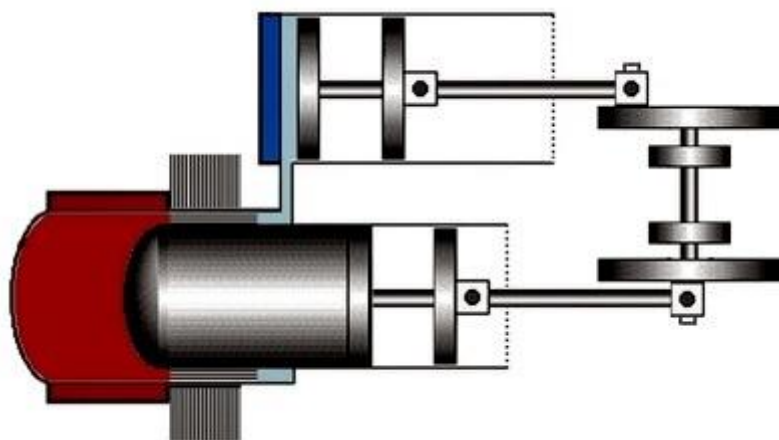


Рис. 1

Этот двигатель включает в себя два отдельных рабочих поршня. Каждый поршень расположен в отдельном цилиндре. Холодный цилиндр находится в теплообменнике, а горячий нагревается.

### Конструкция исполнения «Бета»



Рис. 2

Цилиндр с поршнем охлаждается с одной стороны, и нагревается с противоположной стороны. В цилиндре перемещается силовой поршень и вытеснитель, служащий для уменьшения и увеличения объема рабочего газа. Регенератор выполняет обратное перемещение остывшего газа в нагретое пространство двигателя.

### Конструкция исполнения «Гамма»

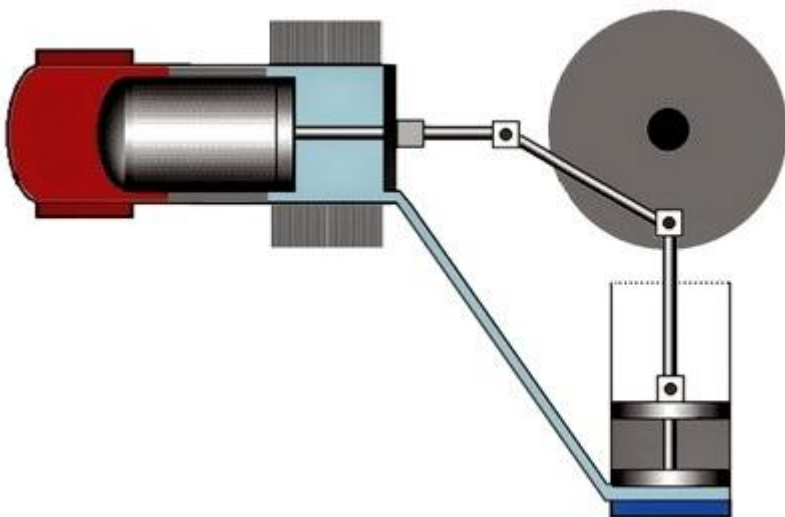


Рис. 3

Вся система состоит из двух цилиндров. Первый цилиндр весь холодный. В нем перемещается рабочий поршень, Второй цилиндр с одной стороны нагретый, а с другой – холодный, и предназначен для передвижения вытеснителя. Регенератор для перекачки охлажденного газа может являться общим для двух цилиндров, либо может быть включен в устройство вытеснителя. [7]

В ходе нашего проекта мы будем собирать модель двигателя Стирлинга, основываясь на конструкции «Альфа».



## 1.5 Применение в жизни

В наши дни ДС переживают второе рождение во много благодаря их уникальным экологическим характеристикам. Напомним, концентрация вредных веществ в продуктах сгорания ДС на несколько порядков ниже, чем у поршневых и газотурбинных двигателей и, что не менее важно, минимальные шумы у них не превышают 60-65 дБ. Они незаменимы там, где необходимо преобразовывать тепловую энергию в механическую.

Одно из перспективных направлений современной энергетики – децентрализация энергоснабжения, которое реализуется путем строительства когенерационных установок, производящих из первичного источника топлива два или несколько видов полезной энергии.

Использование ДС в когенерационных установках позволяет одновременно обеспечивать электроэнергией и теплом небольшие районы. КПД некоторых современных стирлинг-генераторов доходит до 95 %. [1]

Тепловые насосы на базе ДС работают подобно кондиционерам. Правда, они используются не для охлаждения помещений или воды, а для нагрева.

ДС могут работать, как холодильные установки. Некоторые компании-производители холодильников уже готовы устанавливать на свои изделия ДС, что делает их более экономичными, а рабочим телом станет обычный воздух. [1]

Малозумность ДС еще в 60-е годы привлекла внимание разработчиков подводных лодок в ряде стран. В результате в 1988 году шведская субмарина класса «Никкен» была оснащена воздухонезависимыми ДС, с которыми она проплавала свыше 10000 часов. Примеру Швеции последовала Япония, где новейшие подводные лодки класса «Сорю» были оснащены четырьмя ДС VA-275R, каждая мощностью по 8000 л. с.

ДС найдет свое применение и в солнечной энергетике, где его устанавливают в фокус параболического зеркала, обеспечивающего постоянную «подсветку» зоны нагрева. [1]

## 1.6 Преимущества и недостатки

### Плюсы:

Первые промышленные ДС использовались в качестве водяных насосов и машин, обеспечивающих литейное производство. К началу XX века на предприятиях Европы работало уже более 250 тыс. вентиляторов, приводимых в действие ДС. Их КПД достигал 18%, что почти на 10 % выше КПД паровых двигателей. [2]

И это далеко не единственное достоинство двигателей Стирлинга. Как и все двигатели наружного сгорания, они «всеядны». В их топливном «меню» буквально «все, что горит» – от угля, дров, мазута, газа до солнечной, геотермальной энергии и ядерного топлива. [2]

Конструкция ДС чрезвычайно проста. Ей не требуются дополнительных систем и не нужен стартер, поскольку двигатель запускается самостоятельно. Как следствие этого – значительный рабочий ресурс, измеряемый иногда сотнями тысяч часов непрерывной работы. [2]

Двигатели Стирлинга очень экономичные и малошумные, что впоследствии было использовано при создании двигателей для подводных лодок.

### Минусы:

Из недостатков, пожалуй, главный – материалоемкость. К тому же, чтобы двигатели Стирлинга могли на равных конкурировать с ДВС, им приходится «добавить» высокое (более 100 атмосфер – прим. ред. [Techcult.ru](http://Techcult.ru)) давление, а также водород или гелий в качестве рабочего тела.

КПД ДС значительно снижается из-за того, что тепло рабочее тело «получает» через стенки теплообменника. Поскольку самому теплообменнику приходится работать в экстремальных условиях высокого давления и температуры, для его изготовления используются весьма дорогие жаропрочные материалы. [2]

Определенные сложности возникают при регулировке оборотов. В частности, чтобы регулировать частоту вращения коленчатого вала, потребуется изменять показатели температуры. [2]

## 1.7 Физические характеристики и КПД

КПД от разности температур в двигателе может достигать около 70%. По циклу Карно на графике КПД выглядит следующим образом. [6]

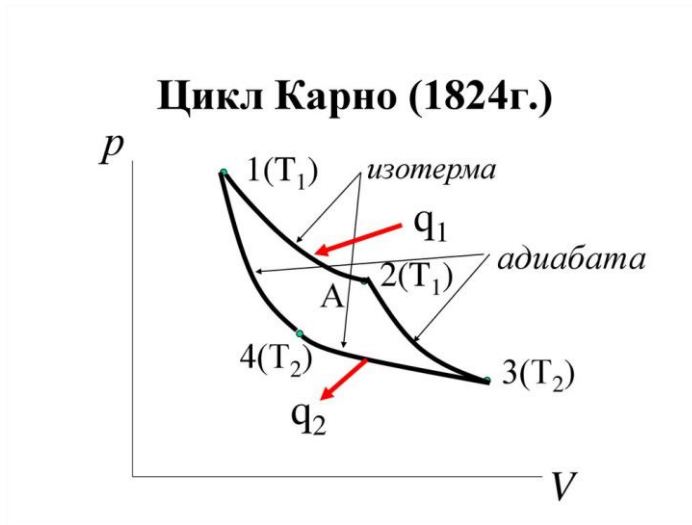


Рис.4

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

## **2. Практическая часть**

### **2.1 Необходимые материалы для сборки модели двигателя Стирлинга**

- Алюминиевая банка (объём 449мл) – 2 шт.
- Картон
- Алюминиевая рейка – 2 шт.
- Рублевая монета
- Фольга
- Пластиковая карта
- Жидкий герметик
- Алюминиевая стойка (внутренний диаметр 23мм и 18мм) – 2 шт.
- Пластиковая трубка (внутренний диаметр 8мм)
- Эпоксидный пластилин
- Латунная клемма (3 мм) – 2 шт.
- Свечка
- Алюминиевая вязальная спица (диаметр 2.5 мм) – 2 шт.
- Хромированная канцелярская скрепка – 2 шт.
- Стальная шайба
- Пластиковая крышка
- Консервная банка (85 мм)
- Пластиковые детали – 2 шт.

### **2.2 Создание модели двигателя Стирлинга в домашних условиях**

#### **2.2.1 Изготовление цилиндра**

Пустую алюминиевую банку объёмом 449 мл обрезаем до высоты 90 мм. Днище деталей необходимо промять, чтобы оно не выступало во внутреннюю его часть.

#### **2.2.2 Изготовление заглушки**

Вырезаем заглушку цилиндра из такой же банки высотой 35 мм и определяем в ней центр, после чего делаем в центре отверстие сверлом на 5.

#### **2.2.3 Изготовление вытеснителя**

На листе двухслойного картона намечаем и вырезаем два диска диаметром 60 мм и полоска длиной 180 мм и шириной 35 мм, к одному из дисков приклеиваем развернутую канцелярскую скрепку, а ко второму – рублёвую монету, в данной схеме вытеснитель должен опускаться вниз исключительно под воздействием силы тяжести. Поэтому от его веса будет напрямую зависеть скорость перемещения воздушным масс, как следствие и выходные обороты движка. С полоски картона нужно снять верхний слой с одной из сторон, что позволит ей лучше сгибаться под нужный нам угол и теперь нам необходимо склеить 3 элемента между собой так, чтобы боковая полоса огибала собой оба диска. Далее обтягиваем получившийся каркас пищевой фольгой, не оставляя открытых щелей между картоном.

#### **2.2.4 Изготовление герметизирующей втулки**

Вырезаем из пластиковой карты круглую заготовку с диаметром 30 мм, далее надо подобрать сверло с диаметром, слегка превышающим диаметр скрепки, и просверливаем по середине заготовки отверстие. При изготовлении подобной втулки надо придерживаться двух конечных целей, во-первых, перемещаемая через неё скрепка должна иметь свободный ход без заеданий и с максимально низким трением, а во-вторых, втулка не должна пропускать воздух.

#### **2.2.5 Фиксация втулки и заглушки**

Втулка фиксируется с внутренней стороны заглушки цилиндра ровно по центру, место состыковки элементов заливаем цельным слоем жидкого герметика. Поверх заглушки необходимо поместить барьер, призванный не давать воде из резервуара-охлаждения попадать во втулку. Следующим действием нужно вставить заглушку в цилиндр. Она должна расположиться на таком уровне, при котором ход вытеснителя от верхней до нижней мертвой точки будет составлять 26 мм.

Далее необходимо укоротить две алюминиевые рейки до 160 мм, одну из них приклеиваем на высоте 30 мм от дна цилиндра.

#### **2.2.6 Изготовление поршневой группы**

Одним из ключевых моментов нашего двигателя является гильза, под неё необходимо подобрать металлическую трубку с приближенной к идеалу внутренней поверхностью, она должна обладать правильной круглой формой, не иметь дефектов литья или внутренних механических повреждений. Укорачиваем гильзу, так, чтобы её длина была 50 мм, место распила зачищаем при помощи наждачной бумаги. Далее нужно найти какой-нибудь цилиндрический предмет, который будет помещаться в гильзу при этом занимать максимум её площади. Сам поршень мы будем формировать из эпоксидного пластилина. Как только смесь достигнет своей полной однородности, скатываем её в форму эллипса и, поместив в гильзу начинаем спрессовывать ступой под большим давлением, обязательно перед этим смазав её маслом. В спрессованном положении оставляем заготовку затвердевать минимум на 4 часа. За счет того, что на гильзе присутствует слой смазки, эпоксидный пластилин не сможет к ней прилипнуть и на выходе мы получим обособленную деталь. Далее протираем наши детали от масла растворителем или ацетоном, и ставим маркером метку, которая в дальнейшем поможет нам определить верное положение поршня относительно гильзы. Теперь достаём застывший поршень из формы, поршень можно укоротить напильником до нужных значений, но важный нюанс в том, что его высота всегда должна быть не меньше собственного диаметра, в противном случае вы столкнётесь с заеданиями в поршневой на оборотах. Диаметр нашего поршня 18 мм, а длина 22 мм. Контактные поверхности следует тщательно обезжирить растворителем. Поршень в дальнейшем соединяется с двигателем через шатунное соединение. После этого необходимо подобрать пластиковую деталь, в которую будет помещена гильза, вставляем её в деталь и место стыка фиксируем герметиком. Затем в данной детали с боку проделываем отверстие под соединительную трубку. Ей может стать трубка с диаметром не менее 5 мм. Такое же отверстие делаем в цилиндре на максимально высоком уровне, а именно 40 мм от верхнего его края. Поршневую основу прикрепляем к детали, которую размещаем на рейке при помощи клея. Вклеиваем трубку, фиксируя

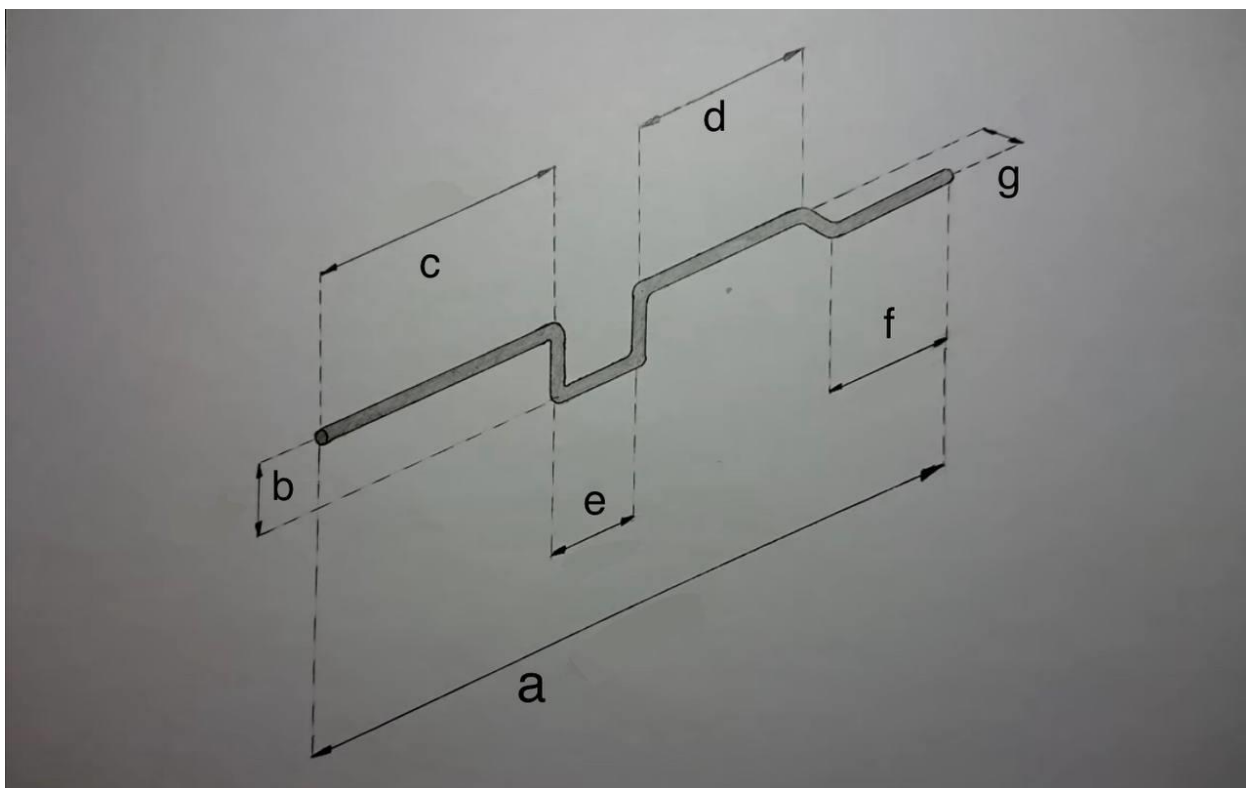
герметиком. Обратим внимание на то, что трубка не должна выступать во внутрь цилиндра, дабы не создавать препятствие вытеснителю.

### 2.2.7 Изготовление шатунного соединения

Сперва нежно определить центр в поршне, затем в центре поршня сверлим отверстие сверлом того же диаметра, что и спица, его глубина должна составлять примерно половину от длины поршня. Спица вставляется в это отверстие и фиксируется клеем, после чего торчащие излишки отрезаем пилой по металлу, оставив лишь хвостик высотой 8 мм. На образовавшийся выступ мы надеваем латунную винтовую клемму (на 4 мм.), в которой сверлим перпендикулярное сквозное отверстие, того же диаметра, что и спица. И уже в таком готовом состоянии фиксируем её на выступающем штыре, встроенным прижимным винтом. Через это отверстие в дальнейшем продевается алюминиевая скрепка.

### 2.2.8 Изготовление коленчатого вала

Делать его будем из алюминиевой вязальной спицы с диаметром 2,5 мм. Из неё надо будет выгнуть такую конструкцию.



$a = 130$  мм;  $b = 13$  мм;  $c = 50$  мм;  $d = 35$  мм;  $e = 20$  мм;  $f = 25$  мм;  $g = 13$  мм.

Колена располагаются под углом  $90^\circ$  друг относительно друга. Части коленвала должны находиться в одной плоскости. На центральном колене необходимо

сделать вспомогательное крепление для соединения с шатуном. По бокам от крюка насаживаем ограничители, которые призваны устранить его люфт по горизонтали.

### **2.2.9 Соединение коленвала и основной конструкции**

Продеваем коленвал через отверстие в одной стойке и симметрично ей фиксируем вторую рейку. На спице предварительно размещаем ещё два ограничителя, которые не дадут сместиться самому коленвалу. Алюминиевую скрепку соединяем с крючком на таком уровне, при котором вытеснитель не будет касаться дна цилиндра в нижней мёртвой точке, а так же упираться в заглушку цилиндра в верхней.

Над поршнем устанавливаем шатун, выполнен он из такой же спицы, что мы и использовали при создании коленвала. Сверху и снизу фиксируем шатун при помощи латунных клемм, высота такого шатуна равна 40 мм, а длина 50 мм.

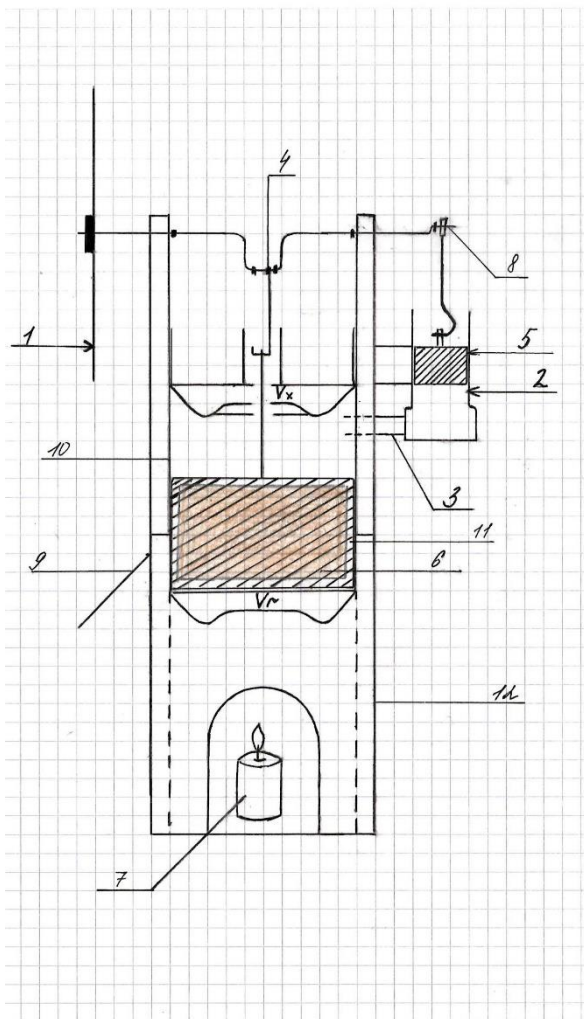
Все места подверженные трению при вращательном движении рекомендуется смазать «Ледолом» или другой густой смазкой, чтобы облегчить ход и избавиться от посторонних скрипов.

### **2.2.10 Изготовление махового колеса**

Для изготовления маховика нам понадобится металлическая квадратная пластина. На ней намечаем центр и чертим окружность с радиусом, не превышающим 110 мм, после вырезаем такую окружность. После этого чертим еще одну окружность, используя центр старой, но теперь с радиусом 35 мм. Далее чертим 12 радиусов так, чтобы между соседними радиусами были углы в 30°. Потом делаем надрезы по этим радиусам до меньшей окружности. Получившиеся лопасти загибаем.

### **2.2.11 Чертёж получившейся модели**





- 1) Маховик
- 2) Рабочий цилиндр
- 3) Трубопровод
- 4) Шок
- 5) Рабочий поршень
- 6) Вытеснитель
- 7) Источник пламени
- 8) Кривошипно-шатунный механизм
- 9) Теплоотводное отверстие
- 10) Цилиндр
- 11) Фольга
- 12) Подставка под двигатель

### 2.3 Апробация созданного двигателя

Апробацию созданной модели мы проводили на уроке физики. Для запуска заполняем охладитель прохладной водой, подносим зажжённую свечу под цилиндр. Ждем примерно 1 минуту и подаем лёгкий импульс на маховик.

$V_r$  – горячая полость

$V_x$  – Холодная полость

### 2.4 Экспертная оценка

#### 2.4.1 Список экспертов

Ф.И.О	Занимаемая должность
Рыжкова Ольга Алексеевна	учитель физики МБОУ СОШ №103
Пахомов Александр Сергеевич	учитель физики МБОУ СОШ №103
Терещенко Роман Александрович	учитель физики МБОУ СОШ №103

Была проведена экспертная оценка, в ходе которой мы выяснили, что модель соответствует заявленным критериям

## **Заключение**

В ходе работы над проектом мы достигли цели, выполнив поставленные задачи, подтвердили гипотезу при помощи экспертной оценки. В ходе работы над теоретической частью были названы и охарактеризованы методы работы над проектом, определены области их применения. Для определения основного содержания теоретической части были описаны основные понятия по теме проекта. С помощью методов были проведены анализ материалов проекта, его структурное оформление. В ходе работы над практической частью была проведена закупка необходимых материалов для сборки модели двигателя Стирлинга, также была создана модель двигателя Стирлинга в домашних условиях. После чего мы провели апробацию созданной модели на уроке физики, и с помощью этого выяснили, что такая модель интересна для учеников. При помощи экспертной оценки мы выяснили, что модель двигателя Стирлинга соответствует заявленным критериям.

### **Список литературы:**

1. Буховцев Б.Б, Мякишев Г.Я., Сотский Н.Н.: Учебник Физика 10 класс: М. :Просвещение, 2010.
2. Грэхем Т.Р., Хупер Ч.: Двигатели Стирлинга, 1986
3. Мякишев Г.Я., Синяков А.З.: Учебник Физика 10-11 класс: М. :Дрофа, 2019.
4. Перышкин А.В. Учебник Физика.7 класс: М. :Дрофа, 2014.
5. Перышкин А.В. Учебник Физика.8 класс : М. :Дрофа, 2013.
6. Сэр Гилберт Т.У.: Двигатели Стирлинга, 1985
7. Двигатель внешнего сгорания Стирлинга: устройство, принципы работы и 3 модификации. / <https://auto-gl.ru/dvigatel-vneshnego-sgoraniya-stirlinga-ustroystvo-principy-raboty-i-3-modifikacii/>
8. Двигатель Стирлинга. Виды и конструкции. Устройство и работа. / <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/dvigatel-stirlinga/>
9. Мощный двигатель Стирлинга. / <https://yandex.ru/turbo/autostuk.ru/s/samyj-moshhnyj-dvigatel-stirlinga.html>

## Приложение

### 2.4.2 Бланк экспертной оценки

№ п/ п	Критерий оценки	Соответствует	Условно соответствует	Не соответствует	Примечание
1.	Соответствует модель теме урока и его содержанию				
2. А Б	Возможность применения представленной модели в урочной и внеурочной деятельности: при изучении нового материала, при проверке домашнего задания				
3.	Информативность				
4.	Способна модель облегчить понимание темы урока				