

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Двигатели внутреннего сгорания

(направленность (профиль/специализация))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Двигатель Стирлинга. Методическое демонстрационное
пособие

Студент

М.Д. Шитов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Л.Н. Бортников

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

М.И. Фесина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

О.Н. Брега

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«___» _____ 2017 г.

Тольятти 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭМиСУ
_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 2017г

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

Студент Шитов Максим Дмитриевич

1. Тема Двигатель Стирлинга. Методическое демонстрационное пособие.

2. Срок сдачи студентом законченной бакалаврской работы 13.06. 2017

3. Исходные данные к бакалаврской работе: двигатель с диаметром цилиндра 10см и ходом поршня 10см.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов): тепловой расчет, кинематический расчет, описание принципа работы и конструкции разрабатываемого двигателя.

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала _____

6. Консультанты по разделам М.И. Фесина, А.Г. Егоров, О.Н. Брега.

7. Дата выдачи задания « 1 » февраля _____ 2017 г.

Руководитель бакалаврской работы _____ Л.Н. Бортников
(подпись) (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____ М.Д. Шитов
(подпись) (И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»
Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭМиСУ
_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 2017г

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы

Студента Шитова М. Д.
по теме Двигатель Стирлинга. Методическое демонстрационное пособие.

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Состояние вопроса	15.02.2017	15.02.2017		
Тепловой расчет	10.03.2017	10.03.2017		
Кинематический расчет	30.03.2017	30.03.2017		
Описание принципа работы и конструкции двигателя	30.04.2017	30.04.2017		
Описание экологичности и безопасности проекта	30.05.2017	30.05.2017		

Руководитель бакалаврской работы

_____ (подпись)

Л.Н. Бортников

_____ (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

_____ (подпись)

М.Д. Шитов

_____ (И.О. Фамилия)

Аннотация

Тема бакалаврской работы: “Двигатель Стирлинга. Методическое демонстрационное пособие.”

Объем бакалаврской работы 41 страница, на которых имеются 8 рисунков и 2 таблицы. К диплому прилагается 6 чертежей и плакатов формата А1. Для написания диплома использовалось 20 источников.

Ключевые слова: Стирлинг, двигатель, альтернативные источники энергии.

В бакалаврскую работу входят введение, 6 глав, выводы. В дипломе описывается состояние вопроса, делается тепловой и кинематический расчет двигателя Стирлинга, описывается методика создания демонстрационного макета, так же приводятся сведения об экологичности двигателя и описывается примерная инструкция по безопасности в помещении, в котором изготовлялся макет.

Abstract

The topic of the bachelor's work is: "The Stirling engine. Methodical demonstration manual. "

The volume of bachelor's work is 41 pages, on which there are 8 figures and 2 tables. 6 drawings and posters of A1 format are attached to the diploma. To write the diploma, 20 sources were used.

Keywords: Stirling, engine, alternative energy sources.

The bachelor's work includes an introduction, 6 chapters, conclusions. The diploma describes the state of the matter, the thermal and kinematic calculation of the Stirling engine is done, the technique for creating the demonstration model is described, the information on the engine's ecology is also given and an approximate safety instruction is given in the room in which the layout was manufactured.

4	Описание принципа работы и конструкции	25
	разрабатываемого двигателя	25
	25
4.1	Принцип работы двигателя	26
4.2	Описание конструкции двигателя	27
4.2.1	Блок цилиндров	
4.2.2	Головка блока цилиндров	
4.2.3	Шатунно-поршневая группа	
4.2.4	Коленчатый вал и маховик	
5	Разработка демонстрационного методического пособия	28
6	Безопасность проекта	32
6.1	Анализ опасных и вредных факторов	32
6.2	Техника безопасности при работе с газовым топливом	34
6.3	Общие технические требования к образцу	36
6.4	Требования к монтажепригодности, ремонтпригодности, контролепригодности	36
6.5	Требования к помещению	36
6.5.1	Пожарная безопасность	36
6.5.2	Требования к эксплуатации электроприборов и электробезопасности	37
6.5.3	Требования к системе отопления и вентиляции помещения	38
	Выводы	39
	Список использованных источников	40

ВВЕДЕНИЕ

Двигатель Стирлинга — это машина, которая работает по замкнутому термодинамическому циклу, в которой процессы сжатия и расширения протекают при разных температурах, а управление потока рабочего тела производится вследствие изменения его объема. Этот принцип положен в основу преобразования теплоты в работу или, наоборот, работы в теплоту.

Такое определение является обобщенным для различных машин Стирлинга, в том числе и холодильных машин, генераторов электричества, теплонасосов, компрессоров различающихся по своим функциям, характеристикам и конструктивным схемам. Двигатели Стирлинга могут быть как роторными, так и поршневыми с конструктивными схемами различной степени сложности[4].

В условиях бурного увеличения потребления энергоресурсов Земли и развития энергетики в последний век стоит вопрос о нахождении альтернативных источников получения энергии и избавления современной энергетики от постоянной необходимости использования органического топлива с целью уменьшения влияния на окружающую среду. Двигатель Стирлинга привлекателен тем, что он может работать на любом виде топлива и от любого источника тепла.

1 Состояние вопроса

Двигатель Стирлинга был изобретен в 1816 г. шотландцем Робертом Стирлингом. Такой двигатель по современным термодинамическим законам работает по циклу, состоящему из двух изотермических процессов и двух изохорных процессов. Машины, работающие на двигателях Стирлинга являются очень универсальными за счет того, что они могут использовать любой вид топлива. Двигатель Стирлинга обладает рядом преимуществ таких как высокая эффективность, способность работать на любом источнике тепла. В качестве рабочего тела двигателя чаще всего используют воздух, водород, гелий, менее распространены углекислый газ и химически реагирующие газы и др. Низкий уровень шума является еще одним важным преимуществом такого двигателя. Специфической особенностью двигателя Стирлинга является его возможность работать в условиях отсутствия атмосферного воздуха (под водой или в космосе).

По циклу Стирлинга также могут работать холодильные установки с широким диапазоном рабочих температур.

Перечисленные положительные качества двигателей Стирлинга делают данный тип двигателей теоретически конкурентоспособным во многих областях применений.

1.1 Выбор схемы и принцип работы проектируемого двигателя Стирлинга

Принцип работы двигателя Стирлинга состоит в циклическом переходе рабочего тела между полостью расширения (холодный цилиндр) и полостью сжатия (горячий цилиндр). Альфа-тип Стирлинга (рисунок 1) имеет два цилиндра, соединенные между собой через последовательно смонтированные нагреватель, регенератор и охладитель. Рабочее тело нагревается в горячем цилиндре, при этом увеличивается давление в системе. Затем усилие передается на поршень холодной полости сжатия. Поршень холодного цилиндра

перемещается, проворачивая коленчатый вал. Одновременно поршень горячего цилиндра выталкивает газ в холодный цилиндр. Газ проходит через регенератор и регенератор забирает часть теплоты рабочего тела. При дальнейшем повороте коленчатого вала холодный поршень сжатия выталкивает рабочее тело в горячий цилиндр. При обратном течении газа в горячий цилиндр регенератор отдает часть теплоты и рабочее тело поступает в полость расширения уже подогретым.

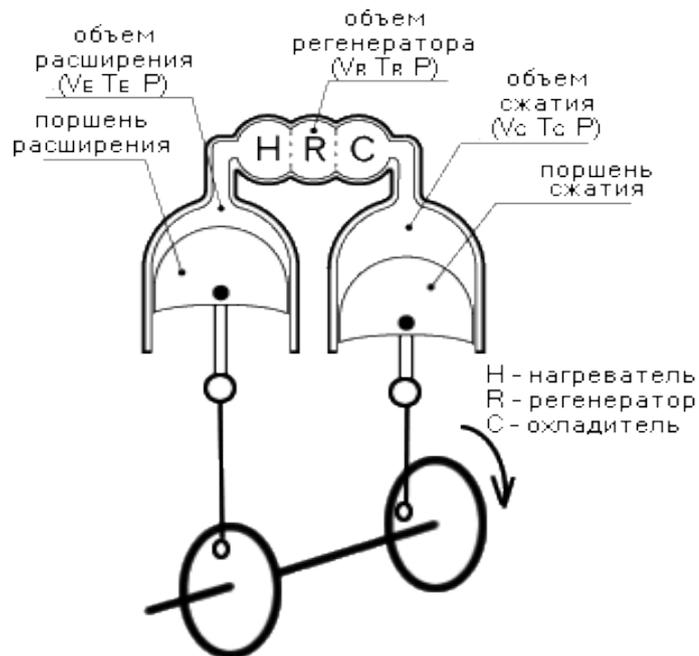


Рисунок 1 – Схема двигателя Стирлинга альфа типа

2 Тепловой расчет двигателя

2.1 Основные параметры двигателя

Предварительно задаемся ходом поршня $S = 100$ мм и диаметром цилиндра $D=100$ мм. Вычислим среднюю скорость поршня:

$$v_{\text{п.ср.}} = \frac{S \cdot n}{30000} = \frac{100 \cdot 3000}{30000} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (1)$$

Площадь поршня:

$$F_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 100^2}{4} = 78,5 \text{ см}^2. \quad (2)$$

Принимаем рабочий объем горячего и холодного цилиндра равными ($k = \frac{V_C}{V_E} = 1$) находим:

$$V_C = V_E = \frac{\pi D^2 S}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 0,1}{4} = 0,000785 \text{ м}^3 = 0,785 \text{ л} \quad (3)$$

По циклу Шмидта для двигателя Стирлинга найдем максимальный и минимальный объем двигателя:

$$V_Z = V_e + V_c + V_D, \quad (4)$$

где V_Z – мгновенный общий объем,

V_e – мгновенный объем полости расширения,

V_c – мгновенный объем полости сжатия,

V_D – мертвый объем (объем регенератора, соединительного канала и отверстий) принимаем равным 10% от рабочего объема одного цилиндра $V_D = 0,0785$ л.

Мгновенный объем полости расширения:

$$V_e = \frac{1}{2} V_E (1 + \cos \varphi) \quad (5)$$

Мгновенный объем полости сжатия:

$$V_c = \frac{1}{2} k V_E (1 + \cos \varphi - \alpha) \quad (6)$$

В этих формулах φ – угол поворота коленчатого вала, α – угол, на который изменение объема полости расширения опережает изменение объема полости сжатия $\alpha = 90^\circ$.

Максимальное значение $V_{z\text{макс}} = 1,419$ л соответствует $\varphi = 45^\circ$, минимальное значение $V_{z\text{мин}} = 0,308$ л соответствует $\varphi = 225^\circ$.

Частота вращения коленчатого вала $n = 3000$ об/мин

Тактность двигателя $\tau = 2$

Число цилиндров двигателя: 1-рабочий (горячий), 1-рабочий (холодный цилиндр)

2.2 Основные сведения об идеальном цикле Стирлинга

Цикл Стирлинга является в некоторых отношениях более простым, чем цикл Карно.

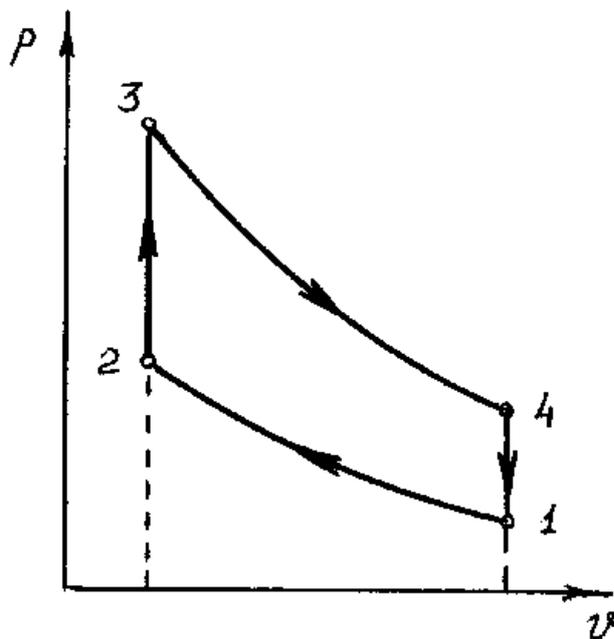


Рисунок 2. – pV- диаграмма идеального цикла Стирлинга

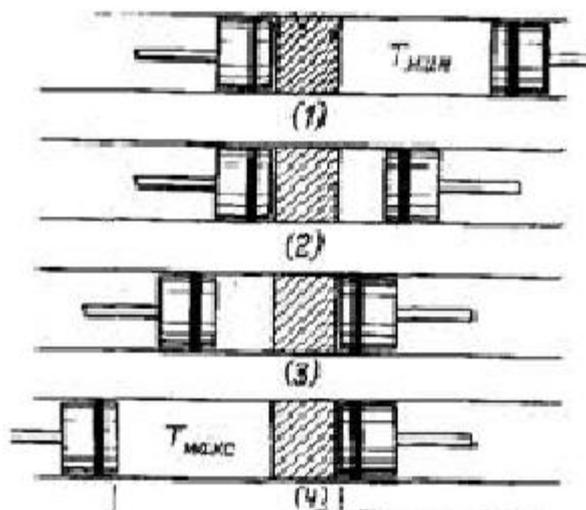


Рисунок 3 – Положение поршней в основных точках цикла

Рассмотрим цилиндр, имеющий два противоположно расположенных поршня с регенератором, находящимся между ними. Регенератор является некой термодинамической “губкой”, обладающей способностью как поглощать, так и отдавать теплоту с течением цикла. Он представляет собой металлическую насадку, состоящую из большого числа отдельных тонких проволок. Один объем находящийся между регенератором и поршнем находится при высокой температуре $T_{\text{макс}}$, такой объем называется полостью расширения. Другой объем, называется полостью сжатия и находится при низкой температуре $T_{\text{мин}}$. Получается, разница температур между двумя концами регенератора равна $T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}$; в продольном направлении предполагается, что насадка имеет нулевую теплопроводность. Для упрощения, принимается, поршни движутся без трения а в самой системе нет утечек рабочего тела.

Пусть в начале цикла поршень холодной полости сжатия находится в верхней мертвой точке, а поршень полости расширения – в нижней мертвой точке, около края поверхности регенератора. В таком положении все рабочее тело будет находится в холодной полости. Его объем максимален, а давление с температурой минимальны; это соответствует точке 1 на p, V - диаграмме. По ходу процесса сжатия (1-2) холодный поршень движется по направлению к регенератору, а поршень горячей полости (полости расширения) остается

неподвижным. Рабочее тело сжимается в холодной полости, и давление увеличивается. Температура не изменяется, потому что процесс изотермический и вся теплота Q_c отводится от стенок цилиндра в окружающую среду.

По ходу процесса 2-3 оба поршня движутся одновременно: поршень горячей полости – от стенки регенератора, а поршень холодной полости сжатия к регенератору. Движение поршней происходит так, что объем между ними не изменяется, то есть постоянный. Тогда рабочее тело проходит через пористый регенератор, переходит из холодной полости в полость горячую. Когда рабочее тело проходит через регенератор, его температура за счет теплоты насадки растет с T_{\min} до T_{\max} . При увеличении температуры газа при неизменном его объеме растет давление.

По ходу расширения (процесс 3-4) поршень горячей полости движется от регенератора к верхней мертвой точке; правый поршень холодной полости остается неподвижным в нижней мертвой точке, находясь у края регенератора. Потому как это процесс расширения, тогда с увеличением объема рабочего тела давление его снижается. Температура рабочего тела не изменится, поскольку теплота Q_e в изотермическом процессе подводится к системе от внешнего источника.

Последний процесс в цикле 4-1, по ходу течения которого поршни движутся одновременно, при неизменном объеме так чтобы вернуть газ через регенератор с горячей полости расширения обратно в холодную полость. Рабочее тело проходит через насадку регенератора и теплота от газа передается обратно насадке и поэтому этого температура рабочего тела убавляется и достигает значения T_{\min} – температуры полости сжатия. Теплота, переданная в этом процессе 2-3 следующего цикла.

Таким образом, термодинамический цикл Стирлинга состоит из четырех процессов: 1-2 – процесс изотермического сжатия; 2-3 – изохорный процесс нагревания рабочего тела, теплота от насадки регенератора передается рабочему телу; 3-4 – процесс изотермического расширения, теплота от

нагревателя температуры $T_{\text{макс}}$ передается газу; 4-1 – изохорный процесс, теплота от газа передается материалу насадки регенератора.

Если количества теплоты получаемое и отдаваемое в процессах 2-3 и 4-1 соответственно одинаковое, тогда обмен тепла между двигателем и окружающей средой происходит путем подвода и отвода тепла соответственно при температуре нагревателя $T_{\text{макс}}$ и температуры охладителя $T_{\text{мин}}$. Такие условия подвода и отвода теплоты при постоянных температурах удовлетворяют выводам второго закона термодинамики для максимального термического к. п. д. цикла; вследствие этого термический КПД цикла Стирлинга такой же, как и для цикла Карно т. е. $\eta = (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}) / T_{\text{макс}}$. Главное преимущество цикла Стирлинга перед циклом Карно состоит в замене двух адиабатных процессов двумя изохорными процессами, что значительно увеличивает площадь на p, V - диаграмме. Поэтому для получения большого значения работы в цикле Стирлинге не требуется создавать высокие значения давления и вытесняемых объемов, как для случая цикла Карно[2].

2.3 Теоретический анализ расчета идеального цикла двигателя Стирлинга

Температура охладителя принимается $T_1 = T_2 = 300\text{K}$

Температура нагревателя принимается $T_3 = T_4 = 1000\text{K}$

Для анализа идеального цикла Стирлинга используются уравнения, приведенные ниже. Из-за большой степени идеализации цикла Стирлинга эти уравнения можно использовать только для предварительных элементарных расчетов двигателя. Введем основные положения и обозначения для этих уравнений.

1) некоторые из исходных параметров, такие как температура, давление или объем, описывают состояние 1;

2) отношение температур $\tau = T_{\text{мин}}/T_{\text{макс}}$;

3) отношение объемов $r = V_{\text{макс}}/V_{\text{мин}}$;

Для единицы массы рабочего тела идеального газа из уравнения термодинамического состояния идеального газа следует, что $V_1 = RT_1/p_1$.

Каждый из четырех процессов цикла характеризуется параметрами и функциями состояния.

Изотермический процесс сжатия (1-2). В этом процессе теплота отводится от газа при минимальной температуре цикла. Работа, затраченная на сжатие рабочего тела, эквивалентна теплоте, отводимой из цикла. При этом внутренняя энергия не изменяется, а энтропия уменьшается и

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = p_1 r; T_2 = T_1 = T_{\text{мин}}. \quad (7)$$

Отводимая теплота Q равна работе W , расходуемой на сжатие и составляет

$$W = p_1 V_1 \ln \frac{1}{r} = RT_1 \ln \left(\frac{1}{r} \right). \quad (8)$$

Изменение энтропии

$$S_2 - S_1 = R \ln \left(\frac{1}{r} \right). \quad (9)$$

Регенеративный процесс теплоотдачи при постоянном объеме (2-3). В рассматриваемом процессе теплота передается от насадки регенератора к рабочему телу; при этом температура рабочего тела увеличивается от минимального значения $T_{\text{мин}}$ до максимального $T_{\text{макс}}$. Работа в этом процессе не производится; внутренняя энергия и энтропия рабочего тела возрастают. При этом

$$p_3 = \frac{p_2 T_3}{T_2} = \frac{p_2}{\tau}; V_3 = V_2. \quad (10)$$

Количество теплоты, которое поглощает рабочее тело, вычисляется

$$Q = C_v T_3 - T_2. \quad (11)$$

Затраченная работа

$$W = 0.$$

Изменение энтропии

$$S_3 - S_2 = C_v \ln \frac{1}{\tau}. \quad (12)$$

Процесс изотермического расширения (3-4). В этом процессе энергия передается рабочему телу в виде теплоты во время расширения газа при максимальном значении температуры $T_{\text{макс}}$. Работа, совершаемая при расширении рабочего тела, равна количеству полученной теплоты от нагревателя. Внутренняя энергия газа остается не изменяется, а энтропия увеличивается. При этом

$$p_4 = \frac{p_3 V_3}{V_4} = p_3 \frac{1}{r}; \quad T_4 = T_3 = T_{\text{макс}}. \quad (13)$$

Подводимая теплота Q равна полученной работе W и составляет

$$p_3 V_3 \ln r = RT_3 \ln r. \quad (14)$$

Изменение энтропии

$$S_4 - S_3 = R \ln r. \quad (15)$$

Регенеративный процесс отдачи тепла при неизменяющемся объеме (4-1). В этом процессе энергия отводится в виде теплоты от рабочего тела к насадке регенератора; температура газа уменьшается от максимального значения $T_{\text{макс}}$, до минимального $T_{\text{мин}}$. Работа в этом процессе не производится; внутренняя энергия и энтропия рабочего тела уменьшаются. При этом

$$p_1 = \frac{p_4 T_4}{T_1} = p_1 \tau; \quad V_1 = V_4. \quad (16)$$

Количество переданной теплоты

$$Q = C_v T_1 - T_4. \quad (17)$$

Изменение энтропии

$$S_1 - S_4 = C_v \ln \tau. \quad (18)$$

В регенеративных процессах теплота, переданная от насадки регенератора рабочему телу в процессе (2-3), вновь воспринимается ею от рабочего тела в процессе (4-1). Внешнего притока теплоты к рабочему телу и ее потерь нет. Поэтому:

$$\text{подведенная теплота (при } T_{\text{макс}}) Q_E = RT_3 \ln r;$$

$$\text{отведенная теплота (при } T_{\text{мин}}) Q_C = RT_1 \ln \frac{1}{r}.$$

Тогда термический к. п. д. составит:

$$\eta_T = \frac{Q_E - Q_C}{Q_E} = \frac{RT_3 \ln r - RT_1 \ln r}{RT_3 \ln r} = 1 - \tau. \quad (19)$$

Это выражение аналогично выражению для к. п. д. цикла Карно при тех же температурах[3].

2.3.1 Процесс изотермического сжатия газа

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$$

$$V_1 = 1,419 \text{ л}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

Объем в конце сжатия

$$V_2 = 0,308 \text{ л}$$

Давление в конце сжатия:

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = 0,46 \text{ МПа} \quad (7)$$

Работа, затраченная на сжатие:

$$W_{1-2} = p_1 V_1 \ln \frac{1}{r} = RT_1 \ln \frac{1}{r} = -216,8 \text{ Дж} \quad (8)$$

2.3.2 Процесс изохорного нагрева газа

Максимальное давление в конце нагрева:

$$p_3 = \frac{p_2 T_3}{T_2} = 1,54 \text{ МПа} \quad (10)$$

Степень повышения давления:

$$\lambda_j := \frac{p_{zj}}{p_{cj}} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{1,54}{0,46} = 3,35$$

$$V_3 = V_2 = 0,308 \text{ л}$$

$$T_3 = 1000 \text{ К}$$

2.3.3 Процесс изотермического расширения газа (рабочий ход)

Давление в конце рабочего хода:

$$p_4 = \frac{p_3 V_3}{V_4} = 0,333 \text{ МПа} \quad (13)$$

$$V_4 = 1,42 \text{ л}$$

Работа газа, совершаемая при расширении:

$$W_{3-4} = p_3 V_3 \ln r = RT_3 \ln r = 722,6 \text{ Дж} \quad (14)$$

2.3.4 Изохорный процесс регенеративного теплообмена

В процессе изохорного регенеративного теплообмена рабочее тело возвращается в исходное состояние. Температура и давление рабочего тела уменьшаются. Так как процесс изохорный, значит работа в этом процессе не совершается.

2.3.5 Нахождение среднего индикаторного давления и эффективной мощности двигателя

Работа газа совершаемая за цикл:

$$W = W_{3-4} + W_{1-2} = 722,6 - 216,8 = 505,8 \text{ Дж} \quad (21)$$

Средняя сила давления газа:

$$P = \frac{W}{S} = \frac{505,8}{0,2} = 2500 \text{ Н} \quad (22)$$

Тогда индикаторное давление находим по формуле:

$$p_i = \frac{P}{F_{\text{п}}} = \frac{2500}{0,0785} = 0,322 \text{ МПа} \quad (23)$$

Давление механических потерь рассчитываем по формуле:

$$p_m = 0,034 + 0,0113v_{п.ср} = 0,034 + 0,113 = 0,147 \text{ МПа}$$

Эффективное давление двигателя:

$$p_e = p_i - p_m = 0,322 - 0,147 = 0,175 \text{ МПа} \quad (24)$$

Мощность двигателя:

$$N_e = \frac{p_e \cdot V_H \cdot n}{30 \cdot \tau} = \frac{0,175 \cdot (1,42 - 0,308) \cdot 3000}{30 \cdot 2} = 9,7 \text{ кВт.} \quad (25)$$

2.4 Расчет регенератора

Вначале заострим внимание на важных аспектах работы регенератора.

Регенератор – это трубка из теплоизоляционного материала, заполненная пористым материалом, через который проходит газ в горячий цилиндр и обратно в холодный цилиндр в процессе работы. Этот материал называется насадкой. Один конец регенератора имеет температуру холодной области, второй конец – температуру горячей области. Так что газ попадает в области нагрева и охлаждения, уже имея нужную температуру. В процессе нагрева газ принимает тепло от регенератора, а в процессе охлаждения отдает точно такое же количество тепла регенератору, запасая в нем тепло на следующий цикл. При этом температура регенератора не меняется. Так будет, если теплоемкость насадки многократно (в десятки раз) превышает теплоемкость газа. Чтобы не было теплопередачи вдоль регенератора, насадку укладываем тонкими слоями.

Удельная теплоемкость воздуха около 1 Дж/(литр*К). Для двигателя Стирлинга с объемом цилиндра 0,785 л теплоемкость равна 0,785 Дж/К. В качестве насадки лучше всего подходят сетки из тонкой (0.1-0.01 мм) металлической проволоки. В качестве материала насадки может быть принята сталь [2].

Теплоемкость стали 0,460 Дж/(г*К). Следовательно, для массы 100 г насадки, теплоемкость насадки будет равна:

$$C_{насадки} = C_{сталь} * m_{сталь} = 0,460 * 100 = 46 \text{ Дж/К}, \quad (26)$$

что в более чем в 50 раз выше теплоемкости газа в цилиндре.

Теперь определяем объем регенератора. Плотность стали равна

$\rho_{\text{сталь}} = 7,8 \text{ г/см}^3$, тогда объем насадки будет равен:

$$V_{\text{насадки}} = \frac{m_{\text{сталь}}}{\rho_{\text{сталь}}} = \frac{100}{7,8} = 12,8 \text{ см}^3 \quad (27)$$

Но еще останутся промежутки для того чтобы через регенератор проходил газ. Поэтому реальный объем будет в несколько раз больше (5-10 раз). Принимаем это соотношение равным 5. Тогда объем регенератора будет равен:

$$V_{\text{регенератор}} = 12,8 * 5 = 64 \text{ см}^3 = 0,064 \text{ л} \quad (28)$$

Объем регенератора – это мертвый объем (исключая объем проволоки). Следовательно, принятое заранее значение мертвого объема соответствует результатам расчетов и может быть принято для дальнейшего проектирования двигателя.

Внешний вид регенератора показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Регенератор двигателя

3 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя Стирлинга

3.1 Выбор длины шатуна $L_{шт}$ и отношения радиуса кривошипа к длине шатуна λ

В целях уменьшения высоты двигателя без значительного увеличения инерционных и нормальных сил величина отношения радиуса кривошипа к длине шатуна принимается $\lambda=0,28$ [1]. При этих условиях $L_{шт}=R/\lambda=50/0,28=178,6$ мм.

3.2 Определение перемещения поршня

Расчет мгновенного положения поршня S_x производится аналитически через каждые 10° угла поворота коленчатого вала по соотношению:

$$S_x = R \left[1 - \cos\varphi + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right] \text{ м} \quad (29)$$

Рассчитанные значения S_x занесены в графы 2, 6 расчетной таблицы 1.

3.3 Нахождение скорости поршня

Расчет $v_{п}$ производится аналитически через каждые 10° угла поворота коленчатого вала по соотношению:

$$v_{п} = \frac{ds}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \frac{ds}{d\varphi} = \omega R \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с} \quad (30)$$

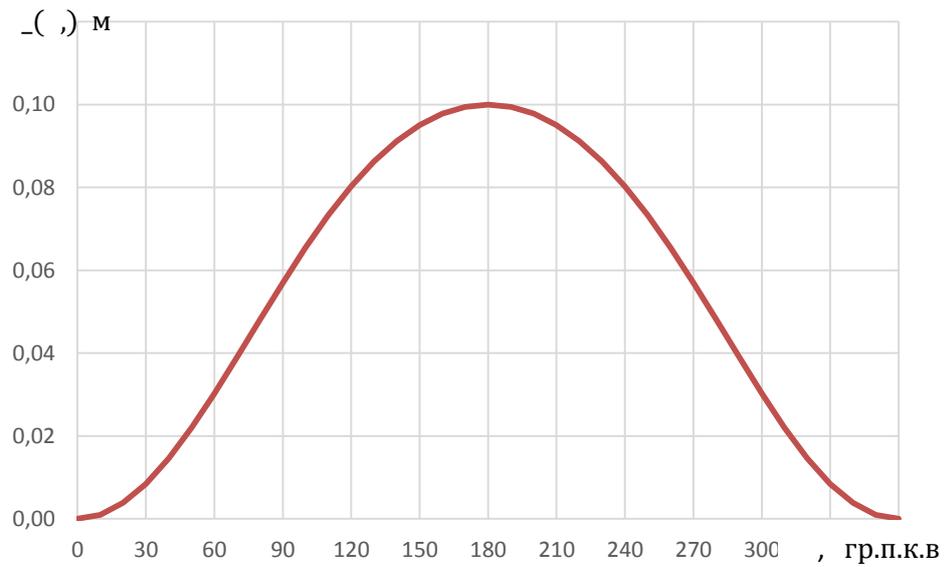
Таблица 1 – Перемещение, скорость, ускорение поршня

$\varphi, ^\circ$	S_x, M	$v_{III}, M/c$	$j_{III}, M/c^2$	$\varphi, ^\circ$	S_x, M	$v_{III}, M/c$	$j_{III}, M/c^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,000	0,00	6310,14	180	0,100	0,00	-3549,46
10	0,001	3,46	6152,00	190	0,099	-3,46	-3557,81
20	0,004	6,67	5689,90	200	0,098	-6,67	-3575,09
30	0,008	9,44	4959,50	210	0,095	-9,44	-3579,16
40	0,015	11,65	4016,14	220	0,091	-11,65	-3536,75
50	0,022	13,30	2929,12	230	0,086	-13,30	-3408,51
60	0,030	14,45	1774,73	240	0,080	-14,45	-3155,07
70	0,039	15,18	628,69	250	0,073	-15,18	-2743,50
80	0,048	15,57	-441,05	260	0,065	-15,57	-2153,15
90	0,057	15,70	-1380,34	270	0,057	-15,70	-1380,34
100	0,065	15,57	-2153,15	280	0,048	-15,57	-441,05
110	0,073	15,18	-2743,50	290	0,039	-15,18	628,69
120	0,080	14,45	-3155,07	300	0,030	-14,45	1774,73
130	0,086	13,30	-3408,51	310	0,022	-13,30	2929,12
140	0,091	11,65	-3536,75	320	0,015	-11,65	4016,14
150	0,095	9,44	-3579,16	330	0,008	-9,44	4959,50
160	0,098	6,67	-3575,09	340	0,004	-6,67	5689,90
170	0,099	3,46	-3557,81	350	0,001	-3,46	6152,00

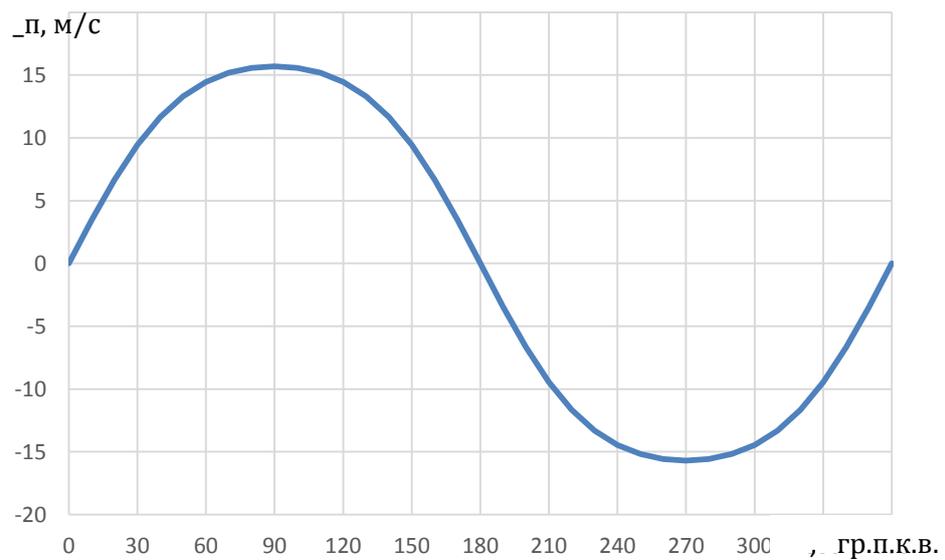
Угловая скорость вращения коленчатого вала ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с.} \quad (31)$$

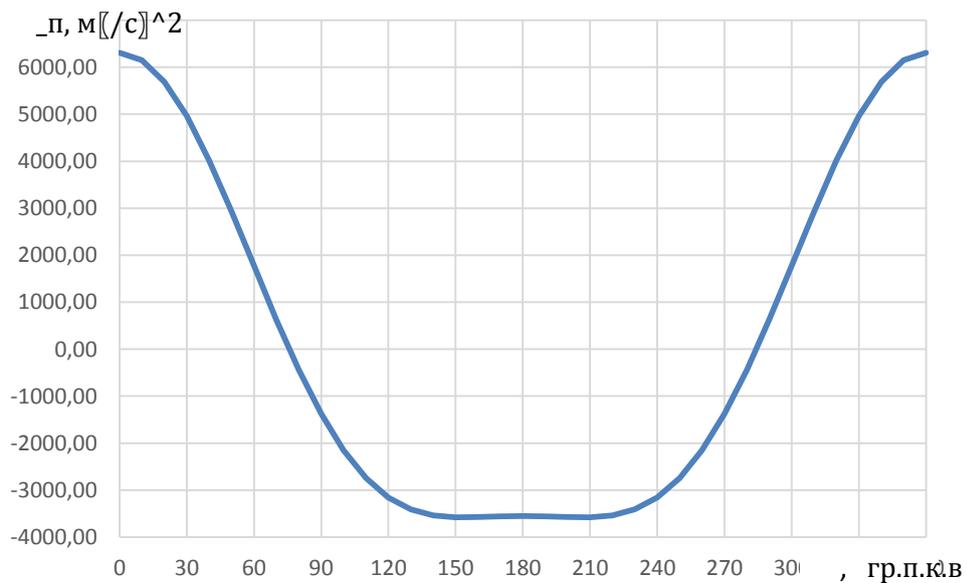
Рассчитанные значения $v_{\text{п}}$ занесены в графы 3, 7 расчетной таблицы 1.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – а) зависимость мгновенного положения поршня от угла п.к.в.,

б) зависимость мгновенной скорости поршня от угла п.к.в.,

в) зависимость мгновенного ускорения поршня от угла п.к.в.

3.4 Расчет ускорения поршня

Расчет $j_{\text{п}}$ производится аналитически через каждые 10° угла поворота коленчатого вала по соотношению:

$$j_{\text{п}} = \frac{d\varphi}{dt} \frac{dv_{\text{п}}}{d\varphi} = \omega^2 R (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi) \text{ м/с}^2 \quad (32)$$

Расчитанные значения $j_{\text{п}}$ занесены в графы 4, 8 расчетной таблицы. По данным таблицы 1 построены графики зависимости перемещения, скорости и ускорения поршня от угла поворота коленчатого вала (рисунок 4).

4 Описание принципа работы и конструкции разрабатываемого двигателя

4.1 Принцип работы двигателя

За один рабочий цикл в двигателе Стирлинга происходит четыре такта: сжатие рабочего тела, нагрев рабочего тела, рабочий ход и процесс отдачи теплоты регенератору. Эти такты происходят за один оборот коленчатого вала, то есть каждый такт осуществляется за четверть оборота (90°) коленчатого вала.

Энергия расширения рабочего тела передается на коленчатый вал с помощью кривошипно-шатунного механизма. Детали КШМ при передаче энергии подвергаются высоким значениям термических и механических нагрузок. Выбор материалов для деталей кривошипно-шатунного механизма: поршня, пальца, поршневых колец предполагают надежное уплотнение, небольшую массу, минимизированный коэффициент трения, эффективную теплопередачу, высокие показатели надежности и прочности.

4.2 Описание конструкции двигателя

4.2.1 Блок цилиндров

Особенности устройства

Блок цилиндров отлит из алюминия. Основные размеры блока цилиндров представлены на чертеже 1.

4.2.2 Головка блока цилиндров

Особенности устройства

Головка блока цилиндров изготовлена из того же сплава, что и блок цилиндров. Она крепится на блок цилиндров с помощью шпилек. Над каждым цилиндром расположено отверстие для соединительного канала, состоящего из металлической трубки и регенератора. Кроме того над расширительным цилиндром (горячим цилиндром) расположен нагреватель. Нагреватель соединен с головкой цилиндра при помощи пайки твердым припоем[8]. Над нагревателем установлена камера сгорания. Теплообменные поверхности

4.2.3 Шатунно-поршневая группа

Особенности устройства

Основные размеры шатунно-поршневой группы представлены на чертеже 2.

Поршень – алюминиевый, литой. Зазор между цилиндром и поршнем равен 0,025-0,045 мм [6]. Он обеспечивается установкой поршней того же класса, что и класс цилиндра. Максимальный допустимый зазор между поршнем и цилиндром 0,15мм (при износе деталей).

Поршень имеет уплотняющую часть в которой располагаются 1 компрессионное и 1 маслосъемное кольцо.

Поршневые кольца изготовлены из чугуна. Компрессионное кольцо скребкового типа. Хромированное в рабочих кромках маслосъемное кольцо имеет разжимную витую пружину.

Поршневой палец изготовлен из стали. Сечение поршневого пальца трубчатое. Палец установлен прессом в верхнюю головку шатуна и свободно вращается в бобышках поршня.

Шатун изготавливается из ковальной стали. Шатун обработан вместе с крышкой шатуна, в отдельности шатун и крышка невзаимозаменяемые. На шатунах и крышках клеймятся номера цилиндров, чтобы не перепутать. Головка шатуна жестко крепится с шатуном на два болта [7].

4.2.4 Коленчатый вал и маховик

Коленчатый вал – чугунный, литой трех опорный. Для ремонта вала предусмотрена возможность перешлифовки шеек с уменьшением их диаметра на 0,5 мм.

Вкладыши подшипников коленчатого вала изготовлены из сплава стали и алюминия. Верхние вкладыши имеют масляную канавку на внутренней поверхности. Нижние вкладыши канавки не имеют. Ремонтные вкладыши делают с увеличенной толщиной под шейки коленчатого вала, с уменьшением диаметра на 0,5мм.

Маховик изготовлен из литого чугуна. Поверх чугуна напрессовывается зубчатый стальной обод для запуска двигателя с помощью стартера. Для центровки маховика с коленчатым валом используется цилиндрический выступ на фланце коленчатого вала.

5 Разработка методического демонстрационного пособия

В рамках выполнения бакалаврской работы стоит цель создания методического демонстрационного пособия для студентов. Оно представляет собой высокотемпературную маломощную установку Стирлинга. Для создания данной установки был выбран гамма тип двигателя, как самый простой для построения.

В интернете существует множество маломощных самодельных двигателей Стирлинга, сделанных из железных или алюминиевых банок. Такие банки не лучшим образом подходят для гамма типа двигателя, так как тепло с нагревательной полости передается через теплопроводность стенок банки в холодную полость. Поэтому были выбраны банки из под чипсов Pringles (рисунок 5), они хорошо подходят, так как днище цилиндра у них металлические, а стенки картонные. Таким образом при нагревании днища оно не загорится а теплопередача через стенки цилиндра будет отсутствовать, так как картон практически не пропускает теплоту.



Рисунок 5 – Цилиндр с металлическим днищем и картонными стенками

Таких банок понадобится две. Обе банки обрезаются на размер будущего хода вытеснительного поршня или вытеснителя. Посередине днища одной банки делается отверстие для будущего штока, в него вставляется отшлифованный пишущий узел ручки с заранее удаленным шариком. Между краем днища и отверстием для штока вырезается отверстие для цилиндра рабочего поршня (рисунок 6) в дальнейшем на это отверстие клеится небольшой цилиндр для рабочего поршня.



Рисунок 6 – Верхняя (холодная) часть цилиндра

Вытеснительный поршень изготавливается из губчатого материала так, чтобы оставался маленький зазор между вытеснителем и стенками цилиндра. Рабочий поршень для цилиндра делается из эпоксидина с графитом. В рабочий поршень и в поршень вытеснитель вклеиваются тяги из скрепки (рисунок 7).

Поршни устанавливаются на свои места и обе части большого цилиндра скрепляются изолентой.



Рисунок 7 – Поршень вытеснитель и рабочий поршень

К штокам крепятся шатуны из тех же скрепок при помощи пластиковой ленты под термическим воздействием (рисунок 8).



Рисунок 8 – Крепление штоков с шатунами при помощи расплавленной пластиковой ленты

Коленчатый вал изготавливается из длинной стальной. Колена к которым крепятся шатуны рабочего поршня и вытеснителя повернуты на угол 90 градусов. В каркас устанавливается коленчатый вал с шатунами, приклеенными

термической лентой к шатунным шейкам. На коленчатый вал крепится маховик из подставки для CD-дисков.

В конце изготавливается подставка под цилиндр, на которую будет ставиться нагревательный элемент.



Рисунок 8 – Макет двигателя гамма типа, работающего по циклу Стирлинга

6 Безопасность проекта

Бакалаврские работы, связанные с двигателями внутреннего и внешнего сгорания, должны соответствовать действующим и перспективным нормативным требованиям отечественных и международных стандартов по безопасности их эксплуатации и защиты окружающей среды от экологически вредных производимых ими воздействий. В случае несоответствия хотя бы одного нормативного требования, двигатель Стирлинга не может быть утвержден к производству и находиться в эксплуатации. Поэтому выбор конструктивных концепций и технологических реализаций различных узлов, агрегатов и систем двигателя Стирлинга должен определяться применением технологических решений, полностью удовлетворяющие всем предъявляемым нормативным требованиям стандартов в отношении их безопасности и экологичности.

6.1 Анализ опасных и вредных факторов

Автомобильный транспорт, бензогенераторы, стационарные установки, использующие ДВС в качестве силового агрегата, являются источниками загрязнения атмосферы. Производство различных ДВС непрерывно возрастает, а значит растет и массовый выброс токсических веществ, CO₂ в атмосферу.

Отработавшие и картерные газы, пары топлива являются токсичными выбросами ДВС. С отработавшими газами ДВС выходит в атмосферу основная часть токсичных примесей. С картерными газами и парами топлива в атмосферу поступает около половины углеводородов от их общего выброса.

Исследование состава отработавших газов ДВС показывает содержание нескольких десятков компонентов, основные из которых приведены в таблице 2

Таблица 2 - Состав отработавших газов ДВС

Компонент	Объемная доля компонента, %		Примечание
	Бензиновый ДВС	Дизельный двигатель	
Азот	74...77	76...78	Не токсичны
Кислород	0,3...0,8	2...18	
Пары воды	3,0...5,5	0,5...4,0	
Диоксид углерода	5,0...12,0	1,0...10,0	
Водород	0...5,0	-	
Оксид углерода	0,5...12,0	0,01...0,5	Токсичны
Оксиды азота	До0,8	0,0002...0,5	
Углеводороды	0,2...3,0	0,009...0,5	
Альдегиды	До0,2мг/л	0,001...0,9мг/л	
Сажа	0...0,04г/м	0,01...1,1г/м	
Бензопирен	10...20 мкг/м	До10 мкг/м	

Состав отработавших газов изменяется в зависимости от режима работы двигателя. На режимах разгона и торможения двигателя, работающего на бензине, нарушаются процессы смесеобразования, которые приводят к повышенному выделению токсичных веществ.

Двигатель Стирлинга не имеет процессов, способствующих загрязнению окружающей среды. Он не расходует рабочее тело. Его экологичность характеризуется экологичностью нагревателя [11]. Кроме того обеспечить полное сгорание топлива в нагревателе двигателя Стирлинга значительно проще, чем в двигателе внутреннего сгорания. В ДВС полнота сгорания топлива зависит от многих физических параметров ДВС и от химического состава топлива. Для сравнения в цилиндрах ДВС любой вид топлива сгорает не полностью [9].

Применение природного газа, как одно из самых дешевых топлив, позволит снизить загрязнение окружающей среды и открывает возможность

использования новых значительных топливных ресурсов, обеспечивая экономию природной нефти. Изменение состава газообразного топлива напрямую зависит от источника получения и способа производства.

Экологичность является основным преимуществом применения в качестве топлива в нагревателе двигателя Стирлинга газообразного топлива. Отработавшие газы содержат низкие уровни вредных веществ у двигателей, которые работают на природном газе. Природный газ почти полностью состоит из метана, который при сгорании выделяет диоксид углерода (CO_2) и воду.

Двигатель, работающий на природном газе, производит примерно на 65% меньше выбросов оксида азота (NO) и на 80 % выбросов твердых частиц, чем дизельный двигатель, оборудованный окисляющим каталитическим нейтрализатором.

Использование природного газа позволяет реализовать и ряд других преимуществ. Природный газ имеет в своем составе не значительное количество серы, влияющая на окисление почвы и воды, здоровье людей, разрушающая фасады зданий. Установки, работающие на природном газе, являются наименее шумными и меньше подвержены вибрации.

Среди газообразных моторных топлив природный газ является наиболее безопасным. При обращении с природным газом риск несчастного происшествия маловероятен, за счёт того, что газ легче воздуха. В случае утечки, он поднимается вверх и быстро смешивается с атмосферным воздухом, и смесь превращается во взрывобезопасную.

6.2 Техника безопасности при работе с газовым топливом

На основе анализа правил ЕЭК ООН R115 "Системы для ДВС, работающих на сжиженном нефтяном газе (СНГ) и сжатом природном газе (СПГ)", использование вместо жидкого топлива, которое является легко-воспламеняющейся жидкостью, таких газовых топлив, как сжатый и сжиженный природный газ, сжиженные углеводородные газы, приводит к

усложнению эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Данное явление связано с тем, что газовое топливо – горючий газ, который в определенных условиях может образовывать с воздухом взрыво- и пожароопасные смеси.

Особенностями углеводородных газов являются высокие температуры самовоспламенения, низкие нижние пределы и широкая область воспламеняемости смесей с воздухом, взрывающиеся при импульсах относительно небольшой интенсивности, а также возможность образования кристаллогидратов при низких температурах.

Повышенная способность электризоваться усложняет эксплуатацию сжиженных углеводородных и природных газов. В следствии электризации возможны искровые разряды из-за высокого электрического сопротивления, которым обладают углеводороды предельного ряда.

Взрыв защита электрооборудования выполняется в соответствии со свойствами газа, создающего взрывоопасность. Природный газ и его основные компоненты – метан, этан, пропан – относятся по взрывоопасности к группе ПАТ–1, что означает превышение безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ) для этих газов (0,9 мм), и температуры воспламенения смеси (450 С).

Минимальная энергия зажигания метан воздушных смесей выше, чем у других углеводородов, это означает, что они воспламеняются хуже. Температура воспламенения метана 540 С. Минимальное давление взрыва метана равно 0,72 МПа. Этого вполне достаточно, чтобы разрушить сооружение, в котором произошел взрыв, не смотря на то, что показатели ниже, чем у других углеводородов.

Метан легче воздуха (относительная плотность по воздуху 0,544), поэтому при утечках газообразная фаза поднимается вверх.

6.3 Общие технические требования к образцу

1. Номинальная скорость пуска и нагружения, в том числе повторного, устанавливается на основании ТУ выбранной силовой установки. Система и конструкция двигателя Стирлинга должны обеспечивать возможность ускоренных пусков и нагружений длительностью не более 5 мин.

2. Время пуска и нагружения двигателя Стирлинга должно быть согласовано с условиями работы технологического оборудования.

3. Снижение фактической мощности в процессе эксплуатации в течении межремонтного периода не должно превышать 5 % номинальной.

6.4 Требования к монтажепригодности, ремонтпригодности, контролепригодности

1. Конструктивное оформление системы должно иметь присоединительные силовые элементы (фланцы, уголки и т.д.), позволяющие осуществить ее монтаж.

2. Конструкция должна предусматривать возможность технического осмотра и ремонта сборочных единиц и деталей двигателя в соответствии с регламентом технического обслуживания и ремонта.

3. В объем обслуживания системы могут входить работы по подготовке системы к работе, в том числе проверка функционирования системы.

4. Конструкция оборудования системы должна быть ремонтно пригодной. Ремонт обеспечивается использованием запасных частей (ЗИП).

6.5 Требования к помещению

6.5.1 Пожарная безопасность

В помещении в обязательном порядке должны быть соблюдены утверждённые руководителем требования, а также общие требования инструкции по противопожарной безопасности. Для помещения должен быть определен класс пожарной опасности и степень огнестойкости. Необходимо

закрепить за сотрудниками обязанности при возникновении пожара и назначить ответственного за соблюдением состояния пожарной безопасности помещения. Расстояние от электрических ламп и других электро установок до горючих материалов должно быть не менее 0,5 м.

6.5.2 Требования к эксплуатации электроприборов и электробезопасности

Обеспечение защиты от поражения электрическим током должно быть гарантировано оборудованием, подключенным к электрической сети. Необходимо совершать плановые профилактические предупредительные проверки электроприборов и сети питания. Запрещено использовать кабели не прошедшие профилактические проверки, а также кабели сопротивление изоляционной обмотки которых, нарушает требования нормативных актов. При использовании в помещении высокомошных приборов (электрообогреватели, микроволновые печи) не должна быть превышена допустимая нагрузка на электрическую сеть. Электрические приборы периодически необходимо осматривать на предмет загрязнения воспламеняющейся пылью или отложений. Периодичность осмотров необходимо указать в инструкции пожаробезопасности. Доступ электрощитам необходимо поддерживать свободным. Не должны приводить к опасной ситуации колебания электрического напряжения или изменения характеристик вспомогательной энергии, а также отключение энергии и последующее ее восстановление.

6.5.3 Требования к системе отопления и вентиляции помещения

Оборудование для отопления и вентиляции воздуха должно размещаться так, чтобы доступ к проверке и очистке был доступен всем. Систему отопления

перед началом отопительного сезона необходимо очищать от горючей пыли и других отложений. Профилактическая проверка исправности системы вентиляции должна проходить по графику, утвержденному руководителем помещения. Во время ремонта системы вентиляции не допускается снижать огнестойкость воздухопроводов, предусмотренные при проектировании.

ВЫВОДЫ

Способность двигателя Стирлинга работать на любом источнике теплоты делает его использование очень выгодным с точки зрения экономии топлива. Для такой страны как Россия с её большой территорией и разными ресурсами и климатами использование таких двигателей позволит расходовать любое местное топливо. Кроме того двигатели Стирлинга почти бесшумные и при работе на углеводородном топливе выпускают выхлопные газы с минимальным содержанием токсичных веществ, потому как процесс полного сгорания топлива в таких двигателях реализовать намного проще чем в двигателях внутреннего сгорания.

Список использованных источников

1. А.И. Колчин, В.П. Демидов / Расчет автомобильных и тракторных двигателей. Учебник для ВУЗов / М.: "Высшая школа 1980 г."
2. Г. Уокер. / Двигатели Стирлинга / М.: "Машиностроение 1985 г."
3. Г. Уокер. / Машины, работающие по циклу Стирлинга / М.: "Энергия 1978 г."
4. В.Н. Даниличев, С.И. Евимов, В.А. Звонов, М.Г. Круглов, А.Г. Шувалов / Двигатели Стирлинга / М.: "Машиностроение 1977 г."
5. А.М. Цирлин, А.А. Ахременков, Об оптимальной организации систем нагрева и охлаждения. ТОХТ, №1, 2012, том 46, 109-114
6. С.Н. Косарев, П.Л. Козлов, С.Н. Волгин, В.А. Яметов / Руководство по ремонту, эксплуатации и техническому обслуживанию автомобилей / М.: "КОЛЕСО 2001г."
7. В.Л. Легостаев, Е.Д. Мордовин / методика расчета шатунов кривошипно-шатунных приводов перемещения верхних полуформ форматоров-вулканизаторов пневматических автопокрышек / ISSN 0136-5835. Вестник ТГТУ. 2004. Том 10. № 2. Transactions TSTU.
8. Акулов А. И., Бельчук Г. А. и Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. М., «Машиностроение», 1977. 432 с. с ил.
9. Мышинский, Э.Л., Рыжков-Дудонов М. А. Судовые двигатели внешнего сгорания. Ленинград: Судостроение, 1976. — 76с.
10. Круглов М. Г., Даниличев В. Н., Ефимов С. И. и др. Двигатели Стирлинга. Москва: Машиностроение, 1997. — 150 с.
11. Бреусов В. П., Куколев М. И. Проектная разработка и технология изготовления двигателей с внешним подводом теплоты, работающих на биогазе // Двигателестроение. — 2009. — № 2. — С. 45–46.
12. Горина Л.Н., Фесина М.И. Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта». Уч.-методическое пособие. - Тольятти: изд-во ТГУ, 2016. –51 с.

13. Кривошеев С. Е. Перспективное развитие альтернативных источников электроэнергетики. Вестн. РНК СИГРЭ. 2015, N 6, с. 48-53. Рус.
14. Альтернативные источники энергии - экологическое будущее планеты. Энергосбережение (Россия). 2015, N 7, с. 14-15. Рус.
15. Masnadi Mohammad S., Grace John R., Bi Xiaotao T., Jim Lim C., Ellis Naoko From fossil fuels towards renewables: Inhibitory and catalytic effects on carbon thermochemical conversion during co-gasification of biomass with fossil fuels. Appl. Energy. 2015. 140, с. 196-209.
16. Energiewende in den Bundesländern. Euroheat and Power. 2016. 45, N 1-2, с. 6.
17. Unconventional Energy Resources: 2015 Review. Natur. Resour. Res.. 2015. 24, N 4, с. 443-508.
18. Buck, K. E. 1968. Experimental efforts in Stirling engine development. A.S.M.E. Paper No. 68-WA-Ener 3.
19. Davis, S.J. and Singham, J.R. 1951. Experiments on a small thermal regenerator. General discussion on heat transfer. I. Mech. London, pp. 434-5.
20. Finkelstein, T. 1964. Specific performance of Stirling engines. Third Conference on Performance of High Temperature, Systems, Pasadena, California.