

УДК 621.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Петерс Н. А., ученик 9 класса МБОУ «Лицей №23»

Гальцев К. А., ученик 9 класса МБОУ «Лицей №23»

Петерс Е. В. к. арх., доцент,

Научный руководитель: Шеина И.В., учитель физики, МБОУ «Лицей №23»
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

В настоящее время в условиях истощения природных ресурсов, влекущего за собой энергетический кризис, ухудшения состояния окружающей среды, характеризующегося деградацией озонового слоя и усиления «парникового эффекта» остро встают задачи рационального природопользования и экономии энергоресурсов. Кроме того, развитие новых сфер науки и техники потребовало создания и использования специальных тепловых двигателей, не нуждающихся в атмосферном кислороде и способных работать от любого высокотемпературного источника тепла для работы в космосе или в подводных условиях. Одним из вариантов решения проблемы стала разработка и внедрение энерго-преобразующих систем на основе машин, работающих по прямому и обратному циклам Стирлинга. Это двигатель внешнего сгорания, запатентованный еще в 1816 г. (английский патент № 4081)[1]. В двигателе Стирлинга сочетается экономичность и надежность бензинового мотора с бесшумностью и "вседоступностью" паровой установки. В мировых обзорах по энерго-преобразующей технике двигатель Стирлинга рассматривается как двигатель, обладающий наибольшими возможностями для дальнейшей разработки. Такие преимущества как низкий уровень шума, малая токсичность отработанных газов, возможность работы на различных видах топливах, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, хорошие характеристики крутящегося момента определяют возможность машинам Стирлинга заменить двигатели внутреннего сгорания (ДВС) во многих отраслях в ближайшее время. Ряд зарубежных фирм («Philips», «STM Inc.», «DaimlerBenz», «Solo», «UnitedStirling») уже сейчас производят двигатели, технические характеристики которых превосходят ДВС и газотурбинные установки (ГТУ). Эти двигатели имеют эффективный КПД (до 45%), удельную массу от 3,8 до 1,2 кг/кВт, ресурс до 40 тыс. часов и мощность от 3 до 1200 кВт [2]. Такие перспективы дают двигателю Стирлинга все шансы стать доминирующим в будущем. Это определяет **актуальность** нашего исследования.

Цель работы: исследовать и собрать действующую модель двигателя Стирлинга. **Задачи:** на примере двигателя Стирлинга изучить один из законов термодинамики; сформировать конструкторские навыки в процессе сборки модели двигателя; проанализировать достоинства и недостатки двигателя Стирлинга; провести исследования перспектив применения двигателя в современной жизни.

Изначально двигатель Стирлинга был задуман как альтернатива небезопасным паровым двигателям, котлы которых часто взрывались из-за высокого давления пара. Двигателей Стирлинга же мог преобразовывать в работу любую разницу температур. Основной принцип работы двигателя Стирлинга заключается в постоянно чередуемых нагревании и охлаждении рабочего тела в закрытом цилиндре. Как правило, в роли рабочего тела выступает воздух, используются также водород и гелий.

В соответствии с законами термодинамики давление, температура и объем идеального газа находятся во взаимной связи:

$$PV = nRT, \text{ где}$$

P – давление газа; V – объём газа; n – количество молей газа; R – универсальная газовая константа, $R=8,31 \text{ Дж/моль}\times\text{К}$; T – температура газа в кельвинах.

Свойство газов увеличиваться в объеме при нагревании и уменьшаться в объеме при охлаждении лежит в основе работы двигателя Стирлинга.

Двигатель использует цикл Стирлинга, который позволил на практике получить работающий двигатель приемлемых размеров. Цикл Стирлинга состоит из 4 фаз и разделён 2 переходными фазами: нагрев, расширение, переход к источнику холода, охлаждение, сжатие и переход к источнику тепла. При переходе от тёплого источника к холодному источнику происходит расширение и сжатие газа, находящегося в цилиндре. При этом изменяется давление, за счёт чего можно получить полезную работу. Нагрев и охлаждение рабочего тела производится вытеснителем. В идеале количество тепла, отдаваемое и отбираемое вытеснителем, одинаково. Полезная работа производится только за счёт изотерм, то есть зависит от разницы температур нагревателя и охладителя [4]. В машине Стирлинга движение рабочего поршня сдвинуто на 90° относительно движения поршня-вытеснителя. В зависимости от знака сдвига машина может быть двигателем или тепловым насосом. При сдвиге 0° машина не производит никакой работы (кроме потерь на трение) и не вырабатывает её. Термический КПД идеального цикла Стирлинга совпадает с максимально достижимым КПД тепловых машин определяется формулой:

$$\eta = 1 - T_x/T_h, \text{ где}$$

η – КПД;

T_x – температура «холодного» объема;

T_h – температура «горячего» объема.

У двигателя Стирлинга этот параметр количественно равен 0,50. Это значительно больше, чем у самых лучших газовых турбин (0,28), бензиновых (0,30) и дизельных двигателей (0,40) [1].

Двигатели Стирлинга имеют целый ряд качеств, которые определяют перспективу их широкого применения. Двигатели почти бесшумны в работе, поскольку в цилиндрах двигателя и клапанном механизме газораспределения нет взрывных процессов, а рабочий цикл протекает довольно плавно при относительно равномерном крутящем моменте. Это качество делает двигатель перспективным для установки на подводных лодках. Двигатели Стирлинга имеют

высокий КПД, превосходящий дизельные и карбюраторные ДВС. Многотопливность – возможность применения разного вида топлива, при этом двигатель Стирлинга может работать почти от любого перепада температур, в т.ч. между разными слоями воды в океане, от солнца, от ядерного или изотопного нагревателя, угольной или дровяной печи и т. п. Соответственно, двигатели Стирлинга могут использоваться для утилизации некоторых видов тепловой энергии, что обуславливает их экономичность. Двигатели имеют большой запас работоспособности. Их рабочий ресурс составляет от 20 до 50 тыс. часов, что в 3-8 раз больше, чем у электрохимических генераторов (ЭХГ) [5]. Это обусловлено простотой конструкции и отсутствием сложных узлов. Двигатель не требует дополнительных систем, таких как газораспределительный механизм. Он запускается самостоительно и не нуждается в стартере. Важное преимущество «стирлинга» как автомобильного двигателя – высокая приспособляемость к изменениям нагрузки. Например, она на 50 % выше, чем у карбюраторного мотора, это позволяет уменьшить число ступеней в коробке передач [1]. И, наконец, двигатели Стирлинга экологичны. Они не имеют выхлопа, частей или процессов, которые могут способствовать загрязнению окружающей среды. Двигатели Стирлинга не расходуют рабочее тело. Экологичность двигателя определяется также экологичностью источника тепла. Кроме того, обеспечить полноту сгорания топлива в двигателе внешнего сгорания проще, чем в ДВС, поскольку полнота сгорания топлива в ДВС зависит от соответствия химического состава топлива физическим параметрам ДВС. Например, спирт или сжиженный газ сгорают в цилиндрах (камере роторного ДВС) полностью, а бензин или дизельное топливо не полностью.

Однако в настоящее время двигатель имеет ряд еще неустранимых недостатков. Основным из них является материалоёмкость. Для получения характеристик, сравнимых с характеристиками ДВС, приходится применять высокие давления (свыше 100 атм) и специальные виды рабочего тела – водород или гелий. Тепло не подводится к рабочему телу непосредственно, а только через стенки теплообменников. Стенки имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего снижается КПД. Горячий теплобменник работает в напряжённых условиях при очень высоких давлениях, что требует применения высокопрочных качественных и, соответственно, дорогих материалов. Недостатком двигателя Стирлинга является и его высокий удельный вес по сравнению с распространенным ДВС. Двигатели Стирлинга сложны в управлении и регулировке [6]. Есть и другие проблемы, нерешенные конструкторами. Работы по созданию и доводке двигателей Стирлинга продолжаются.

Для научного эксперимента мы сконструировали двигатель Стирлинга Бета-типа. Для работы нам потребовалось следующие материалы: 2 картонные банки, покрытые изнутри фольгой, с металлическим дном, кусок поролона, несколько скрепок, скотч, универсальный эпоксидный клей Момент Супер Эпоксилин (холодная сварка), термоусаживаемые трубы, 2 жестяные банки, сантехнический резьбовой фитинг – соединительный бочонок на 1/2, графитовый стержень, 4 CD-диска. В процессе изготовления двигателя обе картонные

банки мы обрезали таким образом, чтобы осталось металлическое дно и приблизительно 3 см картона. Из куска поролона мы вырезали круг (вытеснитель), сделав его диаметр на 2 мм меньше внутреннего диаметра банки, а высоту немного больше ее половины. В центр вытеснителя из поролона мы приклеили кусочек проволоки высотой около 5 см. В верхней части одной из картонных банок мы сделали небольшое отверстие в центре и еще одно чуть большего диаметра ближе к краю. Для более ровного хода вытеснителя к отверстию посередине мы прикрепили небольшой кусочек эпоксилина (также проделав в нем отверстие). Поршень мы изготовили из эпоксилина и натертого графитового стержня. Поршень должен входить в сантехнический соединительный бочонок на 1/2 свободно, но без больших зазоров. В поршне мы сделали отверстие и вклейли тягу из скрепки. Над большим отверстием с помощью эпоксилина мы прикрепили сантехнический соединительный бочонок. Затем при помощи скотча мы соединили две части из картонных банок, вставив вытеснитель из поролона таким образом, чтобы скрепка, приклеенная к поролону, выходила из маленького отверстия на одной из частей банки. В консервной банке мы сверху сделали два небольших отверстия для колен-вала и большое технологическое отверстие сбоку для упрощения работ. Колен-вал мы изготовили из длинной скрепки. Углом между коленами составил 90°.2 шатуна мы также изготовили из скрепок. На концы шатунов мы насадили термоусадочные трубочки. Из этих же термоусадок мы сделали ограничители для шатунов на колен-вале. Мы вставили колен-вал в консервную банку, которую сверху прикрепили к нашему двигателю. Для скрепления шатунов с вытеснителем и поршнем, мы насадили на них трубочки термоусадки, прикрепленные к шатунам. Из другой консервной банки мы сделали подставку для свечи – нагревателя двигателя. К одному из концов колен-вала мы прикрепили маховик из склеенных вместе четырех CD-дисков.

Таким образом, мы собрали модель двигателя Стирлинга. Собранную модель двигателя Стирлинга мы проверили в работе при разных условиях. В соответствии с законами термодинамики КПД тепловой машины Карно:

$$\eta = (T_h - T_x)/T_h, \text{ где}$$

η – КПД [%]; T_x – температура «холодного» объема [°К]; T_h – температура «горячего» объема [°К].

Мы нагревали двигатель, поставив его на стакан с горячей водой с температурой 40°C (313°K), при температуре в помещении 25°C (298°K). КПД для собранного двигателя Стирлинга в данных условиях составил:

$$\eta_1 = ((313\text{°K} - 298\text{°K})/313\text{°K}) \times 100\% = 4,8\%$$

Затем мы стали нагревать двигатель, поставив его на стакан с горячей водой с температурой 50°C (323°K), при температуре в помещении 25°C (298°K). КПД для собранного двигателя Стирлинга в данных условиях:

$$\eta_2 = ((323\text{°K} - 298\text{°K})/323\text{°K}) \times 100\% = 7,7\%$$

Значит, при повышении температуры «нагревателя», КПД двигателя Стирлинга увеличивается. Для третьего испытания мы при помощи льда понизили температуру «холодильника» до 0°C или 273°K. Мы рассчитали КПД для

нашего двигателя Стирлинга в данных условиях:

$$\eta_3 = ((323\text{K} - 273\text{K})/323\text{K}) \times 100\% = 15,5\%$$

Оказалось, что повысить КПД двигателя Стирлинга можно не только повышая температуру «горячего» объема, но понижая температуру «холодильника» двигателя. Результаты эксперимента позволяет сделать вывод, что двигатель Стирлинга позволяет получать больше работы, не с помощью повышения затрат теплоты, а за счет улучшения отвода тепла.

Двигатель Стирлинга обладает высоким потенциалом использования в самых разных сферах деятельности. Его используют как универсальный источник электроэнергии, в качестве насосов, в холодильных системах, на подводных лодках, в качестве аккумуляторов, на солнечных электростанциях и т.д. Возможно, в будущем, двигатели Стирлинга появятся и в космосе, где нагрев от солнца регулярно сменяется охлаждением до абсолютного нуля. КПД такого двигателя будет очень высоким, стремиться к 1.

Широкое использование автономных источников энергии, работающих на местном топливе, отражает мировую тенденцию к энерго- и ресурсосбережению. Ввиду истощения природных запасов и удорожания органического топлива значительный интерес представляет возможность серийного производства электрогенераторов с модификацией двигателя Стирлинга под местное топливо (торф, измельченный уголь, сланцы, отходы сельского хозяйства и лесоперерабатывающей промышленности). Известно, что в лесопильном производстве России 50% древесины превращается в отходы, к которым добавляются соизмеримые по величине отходы деревообрабатывающих и мебельных предприятий. Кроме того, в сельском хозяйстве ежегодно накапливаются значительные количества отходов биомассы. Данное направление интенсивно развивается в странах, имеющих значительный запас биоресурсов (леса, торфяных болот и т.д.): Швеции, Норвегии, Дании, Финляндии, прибалтийских странах[2]. Возврат к биоресурсам – это разумный подход к экономике и экологии.

Список литературы

1. <https://wiki.zr.ru/%D0%94%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0>
2. <https://www.eprussia.ru/epr/45/3045.htm>
3. <https://www.metodolog.ru/node/220>
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0>
5. <https://cianet.info/viewtopic.php?f=10&t=371>
6. https://infourok.ru/nauchno-prakticheskaya_konferenciya_start_v_nauku_konstruirovanie_modeli_dvigatelya_stirlinga-137641.htm
7. <http://www.ntv.ru/novosti/148803/>

