
НЕТРАДИЦІЙНІ І ПОНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

УДК 621.412

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

И.Л. Белецкий¹, В.А. Сафонов²

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Приведены результаты расчета мощности модели низкотемпературного двигателя Стирлинга. Определены параметры, влияющие на его работу. Показан простой и практичный способ вычисления мощности и КПД этого двигателя.

Введение

Известные в настоящее время методы расчета двигателей, работающих по циклу Стирлинга, выполнены преимущественно для мощных установок зарубежного производства и основаны в различных случаях на результатах предварительных экспериментов с большими двигателями [1]. Расчеты изобилуют весьма сложными формулами с экспериментальными коэффициентами [2]. Варьирование параметров в мощных установках затруднительно из-за дороговизны двигателей, поэтому подробное исследование целесообразнее проводить на небольших моделях. В этой работе предлагается простой и наглядный метод расчета мощности небольшой установки.

Сегодня многие ведущие энергетические компании мира ведут разработки установок, работающих по циклу Стирлинга, так как они имеют более высокий КПД. Создание таких устройств требует понимания принципа их работы и выведения соответствующих методов расчета.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является определение мощности модели низкотемпературного двигателя Стирлинга.

Для достижения данной цели решаются следующие задачи:

- определение температуры нагрева и охлаждения рабочего тела в зоне нагревателя и холодильника;
- оценка степени расширения рабочего тела двигателя в зависимости от частоты его вращения;
- вычисление работы двигателя;
- определение механической мощности двигателя;
- расчет КПД двигателя.

Определение температуры нагрева и охлаждения рабочего тела в зоне нагревателя и холодильника

Для определения мощности низкотемпературного двигателя Стирлинга использовалась модель с диаметром нагревателя 0,15 м.

Измерения велись при помощи таких приборов: мультиметр цифровой с термопарой, лазерный цифровой пирометр, лазерный цифровой тахометр, спиртовой градусник, весы электронные.

В качестве источника тепла использовалась емкость с горячей водой, на которую сверху помещалась испытуемая модель, вода нагревалась до кипения. Для съема температурных показателей нагревателя, холодильника, и температуры воздуха внутри двигателя была сделана отдельная конструкция, имитирующая нагреватель и холодильник исследуемой модели.

Внутри конструкции была помещена термопара для замера температуры воздуха, прилегающего к нагревателю (холодильнику).

Внутри вытеснителя был установлен магнит для управления им извне при помощи другого магнита (имитация штока вытеснителя).

Поместив эту конструкцию на емкость с горячей водой, температура которой 95 °С, и воздействуя магнитом извне, приведем в движение вытеснитель с частотой 60 об/мин и 120 об/мин, имитируя средний режим работы этого двигателя.

Замеры температуры нагревателя показали, что при температуре воды 95 °С его можно нагреть максимум до 75...80 °С, при этом температура воздуха, изнутри прилегающего к нагревателю, поднимается максимум до 65 °С.

Замеры температуры холодильника показали следующие результаты: холодильник 25...30 °С, воздух, прилегающий к холодильнику, 30...40 °С.

Предварительные опыты показали, что перепад температур рабочего тела (воздуха) в процессе работы этой модели двигателя находится в пределах 35...40 °С при условии частоты вращения двигателя в пределах 60...120 об/мин.

Оценка степени расширения рабочего тела двигателя в зависимости от частоты его вращения.

Далее соберем конструкцию, которая показала бы нам, на сколько увеличивается объем рабочего тела при заданном нагреве. Этот простой прием позволил бы нам, определив прирост объема, узнать, на сколько градусов реально был нагрет воздух внутри двигателя и каким при этом могло бы быть давление на рабочий поршень в начале его движения (в нижней мертвой точке) (рис. 1).

Удлинив максимально рабочий цилиндр, продолжим эксперимент, имитируя движение вытеснителя вручную через шток с частотой 60 об/мин и 120 об/мин.

Замеры показали:

- при 60 об/мин ход поршня составил 7 см (0,07 м);
- при 120 об/мин ход поршня составил 4 см (0,04 м).

Радиус рабочего поршня $r = 1$ см (0,01 м).

Итого: прирост объема в первом случае составил $\Delta V_1 = 22$ см³ (0,000022 м³), а во втором $\Delta V_2 = 12$ см³ (0,000012 м³).

Изначально, рабочий объем двигателя $V_0 = 130$ см³ (0,000130 м³).

По этим данным видно, на сколько увеличился рабочий объем двигателя:

- при 60 об/мин на $\Delta V_1 / V_0 = 17$ %;
- при 120 об/мин на $\Delta V_2 / V_0 = 9$ %.

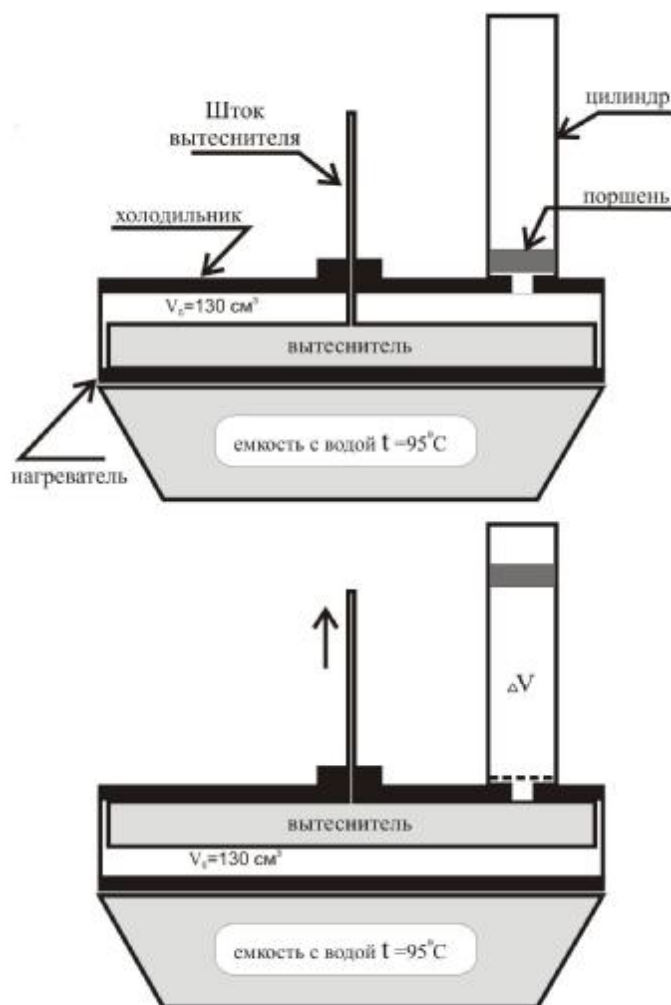


Рис. 1. Схема опытной установки по определению прироста объема рабочего тела в двигателе Стирлинга

Коэффициент расширения воздуха при изобарном нагреве на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $0,00367$ [3, 4]. Рассчитаем, на сколько градусов выше комнатной температуры нагрелся воздух в двигателе в каждом из случаев.

Температура рабочего тела при 60 об/мин возросла на

$$\Delta t_1 = 0,17 / 0,00367 = 46\text{ }^{\circ}\text{C},$$

а температура рабочего тела при 120 об/мин увеличилась на

$$\Delta t_1 = 0,09 / 0,00367 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Вычисление работы двигателя

Прирост объема на 17% создает давление на $0,17\text{ атм}$ (17225 Па) выше начального, а увеличение объема на 9% увеличивает давление на $0,09\text{ атм}$ (9119 Па) соответственно. Значит на 1 см^2 ($0,0001\text{ м}^2$) в первом случае оказывается давление $0,17\text{ кг}$ ($1,7\text{ Н}$), а во втором случае $0,09\text{ кг}$ ($0,9\text{ Н}$).

Площадь рабочего поршня S равна

$$S = p \cdot r^2 = 3,14 \text{ см}^2 \text{ (} 0,000314 \text{ м}^2 \text{)}.$$

В первом случае на поршень давит сила $0,5 \text{ кг}$ или $F_1 = 5 \text{ Н}$, а во втором случае $0,28 \text{ кг}$ или $F_2 = 2,8 \text{ Н}$.

Надо подчеркнуть, что давление такой силы оказывается на поршень в самой нижней мертвой точке его хода, то есть в самом начале его движения. Далее давление на поршень начинает ослабевать пропорционально его движению вверх и полностью выравнивается с атмосферным в самой верхней мертвой точке, в этот момент поршень останавливается.

Таким образом, наблюдается прямая зависимость между давлением внутри двигателя и объемом расширения рабочего тела или силой давления F на поршень и длиной его хода L , что позволяет легко посчитать работу, совершаемую нагретым газом, по формуле

$$A = \int F dL.$$

Представим этот процесс на графике в F и L координатах (рис. 2).

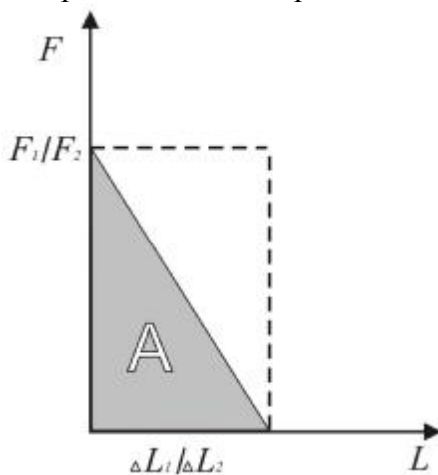


Рис. 2. График зависимости давления в двигателе от хода рабочего поршня

Линейная функция падения давления на поршень с увеличением его хода представляет собой прямую, пересекающую ось F в точке, соответствующей максимальной силе, а ось L — в точке, соответствующей максимальному ходу поршня. Работа, совершаемая силой давления на протяжении хода поршня, считается как интеграл от этой линейной функции на участке $L_1 - L_2$, где L_1 и L_2 — соответственно начальная и конечная точки хода поршня. На графике этой работе соответствует площадь фигуры, ограниченной нашей функцией и осями координат F и L . Имеем прямоугольный треугольник, площадь которого считается перемножением его катетов и делением на 2.

Произведем расчет работы модели при частоте 60 и 120 об/мин соответственно:

$$A_1 = \frac{F_1 \Delta L_1}{2} = \frac{5 \text{ Н} \cdot 0,07 \text{ м}}{2} = 0,175 \text{ Дж};$$

$$A_2 = \frac{F_2 \Delta L_2}{2} = \frac{2,8 \text{ Н} \cdot 0,04 \text{ м}}{2} = 0,056 \text{ Дж}.$$

Зная количество работы в единицу времени, легко вычислить мощность модели.

При частоте 60 об/мин в 1 с производится работа $A_1 = 0,175 \text{ Дж}$., что соответствует мощности $0,175 \text{ Вт}$.

При частоте 120 об/мин в 1 с производится двойная работа $A_2 = 0,056 \text{ Дж}$, что соответствует мощности $0,112 \text{ Вт}$.

Таким образом, мы получили два значения максимальной мощности при частотах работы двигателя 60 и 120 об/мин. Надо помнить о том, что эти показатели мощности

являются максимально возможными, а не реальными, поскольку конструкционно двигателю необходимо тратить часть этой мощности на обратный цикл (сжатие рабочего тела и возврат его в первоначальное положение) для поддержания собственной работоспособности.

Определение механической мощности двигателя

Для подтверждения полученных выводов была построена работающая модель низкотемпературного двигателя Стирлинга с параметрами, соответствующими вышеизложенным характеристикам (рис. 3).

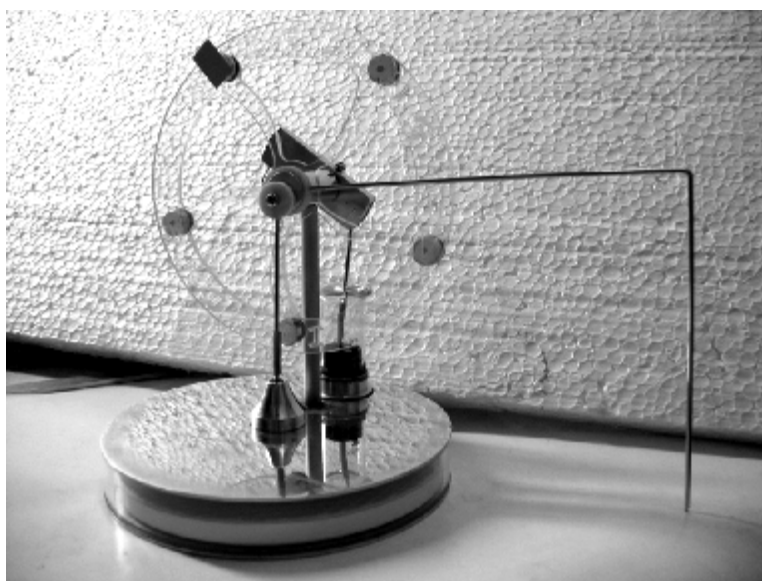


Рис. 3. Испытуемая модель низкотемпературного двигателя Стирлинга

Мощность P на валу двигателя равна произведению вращающего момента на угловую скорость:

$$P = F \cdot L \cdot \frac{P \cdot n}{30},$$

где L – длина рычага, который одним концом снимает усилие с оси двигателя, а вторым концом передает это усилие на контрольные весы, м;

F – сила, с которой рычаг длиной L давит на весы, кг;

n – частота вращения двигателя, об/мин.

Ход рабочего поршня равен 0,04 м при работе двигателя с частотой 120 об/мин. Нагрев производился, как и ранее, от горячей воды. Число оборотов двигателя измерялось цифровым тахометром, сила давления – электронными весами.

Длина рычага $L = 0,16$ м. Обороты вращения поддерживались в режиме $n = 120$ об/мин. Сила давления $F = 0,04$ Н.

Итак, реальная механическая мощность данного низкотемпературного двигателя Стирлинга равна

$$P = 0,04 \cdot 0,16 \cdot 12,56 = 0,08 \text{ Вт.}$$

Она оказалась меньше на 0,032 Вт, которые тратятся на завершение цикла Стирлинга.

Расчет КПД двигателя

Зная механическую мощность, можем рассчитать КПД этого двигателя. Для этого нужно определить количество теплоты, проходящее через двигатель.

Источником тепла является емкость с горячей водой объемом 0,5 л.

Замер температуры воды, спустя 10 мин при работающем и не работающем двигателе, показал разницу в 2 °С. При работающем двигателе вода остывала быстрее, откуда можно предположить, что через работающий двигатель проходило то количество тепловой энергии, которое необходимо для нагрева/остывания 0,5 л воды на два градуса за это же время. Что бы нагреть 0,5 л воды на два градуса, потребуется энергия 4200 Дж, разделим на 600 с, получим 7 Дж, или 7 Вт тепловой мощности.

КПД установки равен

$$\text{КПД} = \frac{0,08}{7} \cdot 100\% = 1,14\% .$$

Выводы

В результате проведенной работы было выявлено:

- реальная температура нагрева/охлаждения рабочего тела сильно отличается от температуры нагревателя/холодильника двигателя и прямо зависит от скорости его работы. Это связано с тем, что как на нагрев, так и на охлаждение требуется определенное время;

- измерив прирост объема рабочей полости двигателя при заданных оборотах, легко найти силу давления на поршень, что позволяет оценить максимальную работу;

- максимальная расчетная мощность больше реальной (полезной), поскольку двигателю необходимо тратить часть запасенной в маховике энергии на сжатие рабочего тела для замыкания цикла;

- механический способ определения полезной мощности двигателя оказался весьма эффективным и доступным;

- полученный КПД установки полностью отражает главные проблемы этого типа двигателей. Машины Стирлинга, работающие на малом перепаде температур, будут иметь больший КПД при малой частоте рабочего цикла или при более быстром подводе тепла, например с применением солнечного концентратора. Это связано с тем, что простая и дешевая конструкция нагревателя/холодильника не может быстро нагреть и охладить рабочее тело.

Главным недостатком и предметом дальнейших исследований подобного типа конструкций является отсутствие регенератора, который позволяет запасать и возвращать тепловую энергию цикла.

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНОСТІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДВИГУНА СТИРЛІНГА

І.Л. Белєцький, В.О. Сафонов

Наведено результати розрахунку потужності моделі низькотемпературного двигуна Стирлінга. Визначено параметри, що впливають на його роботу. Наведено простий і практичний спосіб обчислення потужності і ККД цього двигуна.

DETERMINATION OF POWER CHARACTERISTICS OF LOW-TEMPERATURE STIRLING ENGINE

I. Beletskiy, V. Safonov

The power calculation of low-temperature Stirling engine model was resulted. The parameters influenced on its operation were determined. The simple and practical method of power and engine efficiency calculation was suggested.

Список используемых источников

1. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга / Г. Уокер. – М.: Наука, 1978. – 152 с.
2. Ридер Г. Двигатели Стирлинга / Г. Ридер, Ч. Хупер. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
3. Сычев В.В. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман // ГСССД. Серия Монографии. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. - М.: Мир, 1985. – 520 с.

Надійшла до редакції 04.06.2013 р.

УДК 621.311.243:620.9(07)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕРМОСИФОННОЙ УСТАНОВКИ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В.А. Якимов¹, В.В. Кувшинов², М.Б. Кузьмин², С.Г. Осетров¹

²Академия военно-морских сил им. П.С. Нахимова, г. Севастополь

¹Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Приведены результаты первого опыта физического моделирования установки солнечного горячего водоснабжения (УСГВ) с термосифонным плоским коллектором. Определены возможности оценки параметров полномасштабной УСГВ с естественной циркуляцией (ЕЦ) теплоносителя по результатам модельных опытов. Модель УСГВ разработана и создана на кафедре «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии».

Введение

В Украине накоплен большой опыт исследования, проектирования и эксплуатации бытовых и промышленных систем горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования на основе солнечной энергии.

Наиболее широкое распространение получили системы горячего водоснабжения объектов сезонного функционирования (пансионаты, базы отдыха и туризма, детские лагеря, оборудованные пляжи), а также индивидуальных жилых домов и строений дачного типа. Для этих целей необходимо разрабатывать и проектировать простые в эксплуатации установки, не требующие дополнительного энергетического обеспечения и имеющие невысокую цену.