

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"НИУ ВШЭ"**

Факультет физики

12 декабря 2021 г.

Лабораторная работа по теме: "Двигатель
Стирлинга"

Работу выполнил: Горяной Егор

Москва, 2020

Теоретическая часть

Существует множество вариантов реализации тепловых машин замкнутого цикла, позволяющих преобразовывать тепловую энергию в механическую или электрическую. Одним из таких вариантов является двигатель, предложенный в 1816 году Робертом Стирлингом. Исторически этот двигатель стал вторым известным человечеству тепловым двигателем после паровой машины. Со времени первоначального изобретения было создано множество различных вариантов реализации машины Стирлинга. Обычно выделяют три основных типа двигателя Стирлинга. Это двигатели α -, β -, и γ -типа. Их схематическое изображение приведено на рисунке ниже:

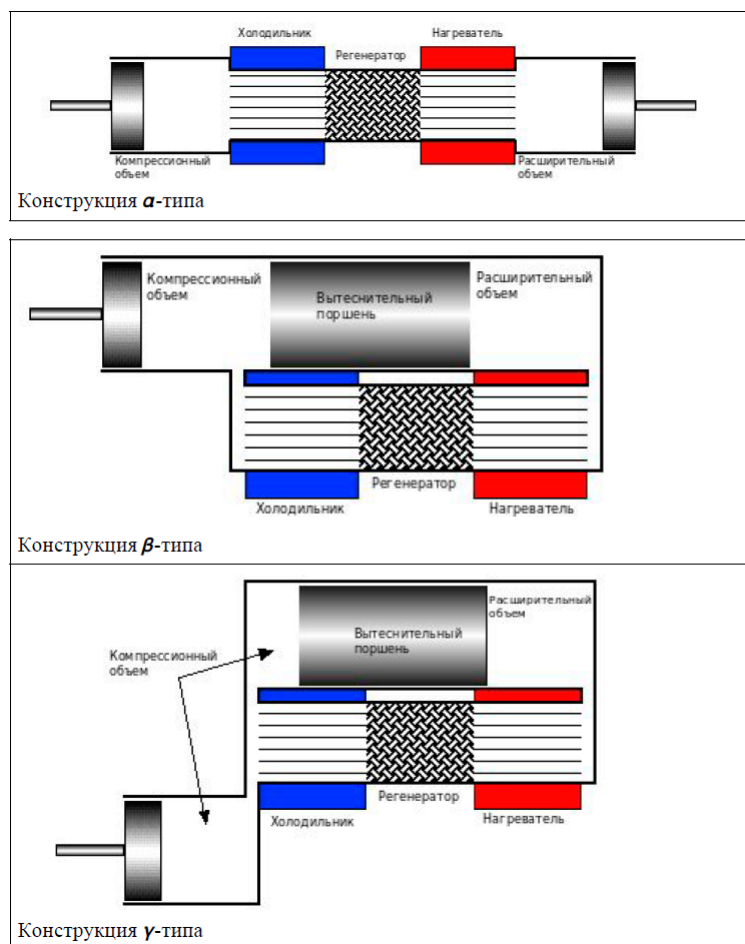


Рис. 1: типы двигателя Стирлинга

В данной работе будет рассматриваться конструкция γ -типа, как наиболее простая в технической реализации модель двигателя Стирлинга. Двигатель Стирлинга имеет несколько отличительных особенностей:

- Двигатель не имеет в своем составе клапанов и вентилях, что делает его

конструктивно очень простым.

- Это двигатель замкнутого цикла, то есть при его работе не происходит выброса рабочего тела в окружающую среду и забора газа из окружающего пространства. За счет этого давление в камерах двигателя близко к атмосферному, а работа, производимая за один цикл существенно больше, чем в двигателях других конструкций.
- Компрессионный поршень двигателя Стирлинга работает при низкой температуре, что значительно снижает скорость его износа.
- В качестве внешнего нагревателя может выступать источник тепла любой природы, что позволяет, в частности, строить экологически чистые двигатели.

Как видно из рисунка, все варианты двигателя имеют в своем составе расширительный и компрессионный объем, а также регенератор (теплообменник), наличие которого является наиболее существенной особенностью конструкции. Теплообменник, как будет показано ниже, позволяет значительно повысить эффективность работы двигателя и приблизить его КПД к КПД цикла Карно. Идеальная модель цикла двигателя Стирлинга показана на рисунке ниже в P - V и T - S координатах. Для сравнения, на том же рисунке показан идеальный цикл Карно, работающий между холодильником и нагревателем с той же температурой (не заштрихованные области).

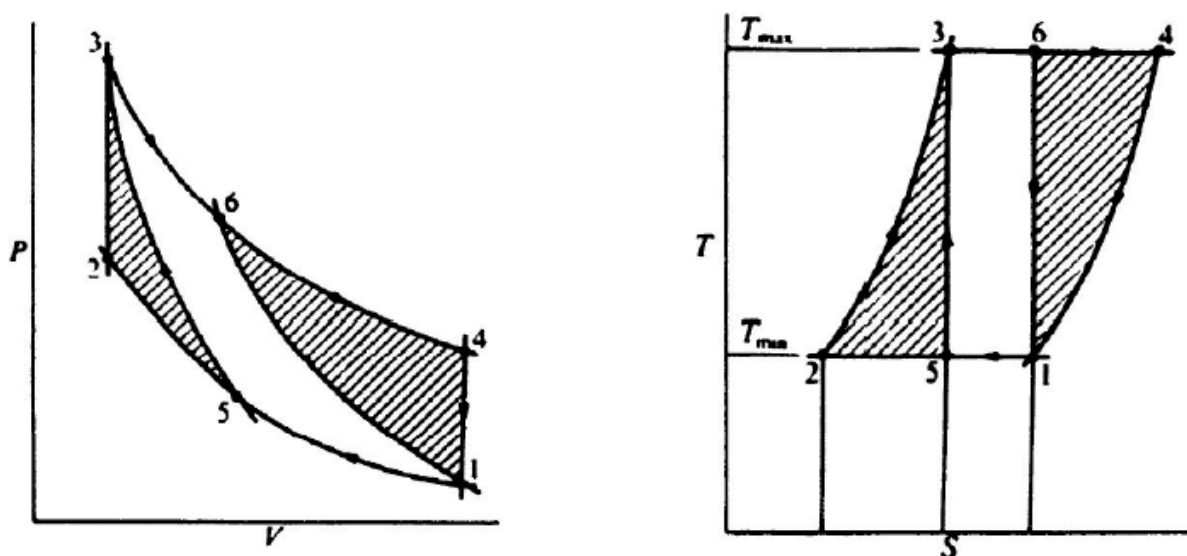


Рис. 2: цикл Стирлинга(в $T - S$) и Карно(в $p - V$)

Как видно из рисунка, цикл состоит из 4 фаз:

- 1-2 - холодное изотермическое сжатие с отдачей тепла во внешнюю среду
- 2-3 - нагрев при постоянном объеме за счет тепла, запасенного в регенераторе (теплообменнике)

- 3-4 - горячее изотермическое расширение с получением тепла от нагревателя
- 4-1 - охлаждение при постоянном объеме с передачей тепла регенератору (теплообменнику)

Исходя из p - V диаграммы можно сравнительно просто рассчитать КПД идеального цикла. Действительно, по определению:

$$\eta = \frac{A}{Q}$$

где A - работа, совершаемая рабочим телом за один цикл (она же площадь, ограниченная циклом в p - V координатах), а Q - количество тепла, полученное рабочим телом от нагревателя. Предполагая рабочее тело идеальным газом, для работы за цикл легко получить такое выражение:

$$A = \nu R T_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - \nu R T_X \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Тепло рабочее тело получает на участке изохорического ($V=\text{const}$) нагрева (2-3) и на участке изотермического расширения (3-4), но в процессе 2-3 обмен происходит не со внешней средой, а с тепловым резервуаром самого двигателя. Именно эта особенность двигателя Стирлинга приводит к существенному увеличению его КПД. Таким образом,

$$Q = Q_{34} = \nu R T_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Для КПД получаем такое окончательное выражение:

$$\eta = 1 - \frac{T_X}{T_H}$$

то есть КПД идеального цикла Стирлинга совпадает с предельным для тепловой машины значением, равным КПД цикла Карно, работающего между нагревателем и холодильником с теми же температурами. Следует отметить, что при одинаковом КПД, работа, совершаемая за один цикл двигателем Стирлинга больше, чем работа, совершаемая машиной Карно.

В реальном двигателе невозможно обеспечить нагрев/охлаждение рабочего тела при постоянном объеме, т.к. взаимное движение поршней двигателя, как правило, осуществляется по синусоидальному закону при помощи кривошипно-шатунного механизма. Также невозможно обеспечить полностью изотермическое сжатие/расширение газа и полную передачу тепла между рабочим телом и теплообменником. Все это приводит к уменьшению КПД реального двигателя относительно теоретического.

Практическая часть

Цель работы

Познакомиться с практическими аспектами работы тепловых установок и методами оценки эффективности их работы на примере модели машины Стирлинга.

Задачи работы

- Используя данные о зависимости давления и рабочих объемов двигателя от времени построить цикл в $p - V$ координатах
- найти величину сопротивления нагрузки электродвигателя постоянного тока, при которой отдаваемая в нее мощность максимальна
- определить эффективность работы двигателя по максимальной отдаваемой мощности и скорости выгорания спирта в спиртовке
- сравнить реальную эффективность с теоретической, используя измеренные данные о температуре расширительного и компрессионного объемов

Ход работы

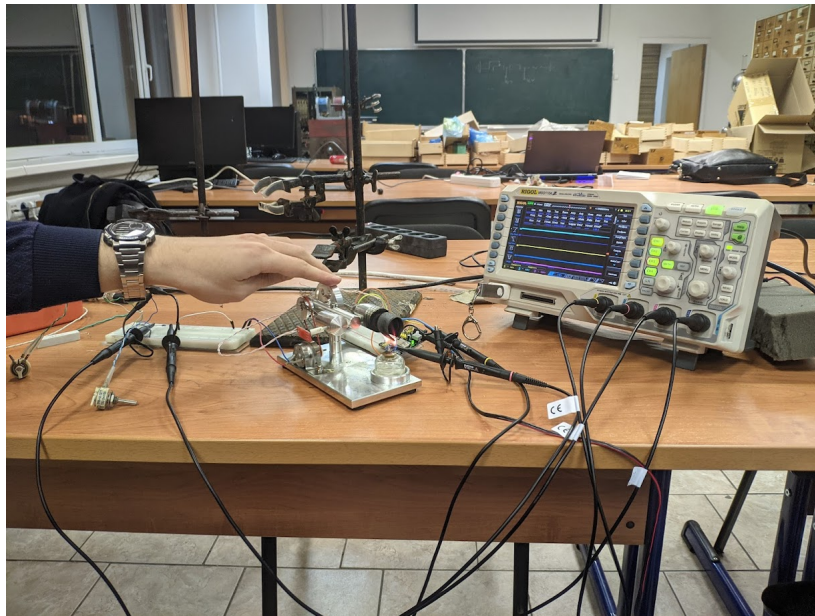


Рис. 3: Фотография установки

Зависимость $p(t)$ получалась путем снятия напряжения с датчика и перевода в давление по формуле $U_{out} = U_{DC}(ap + b)$, где $a = 0.002124 \frac{1}{\text{кПа}}$, $b = 0.00842$

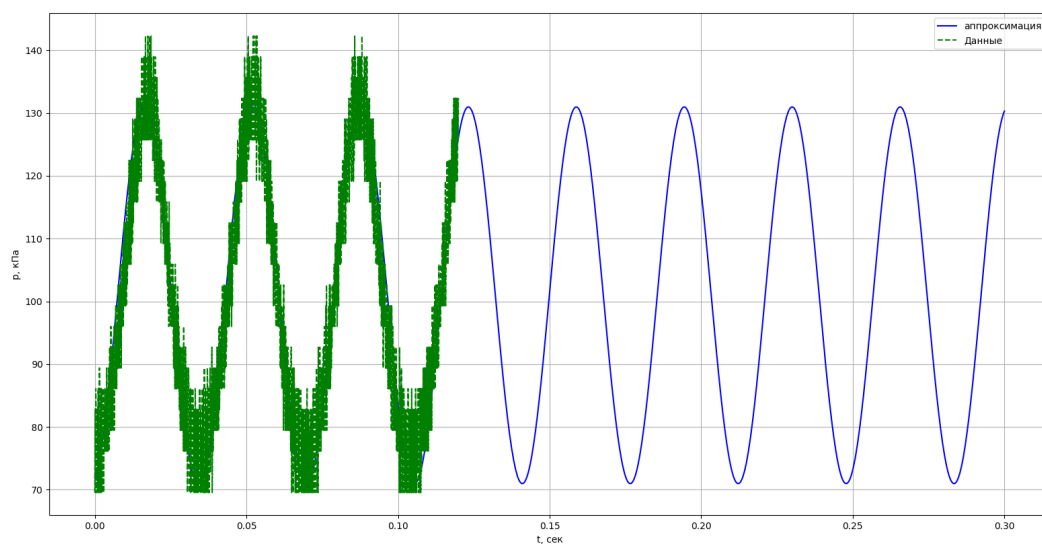


Рис. 4: $p(t)$

Зависимость $V(t)$ получалась с использованием контроллера Arduino, который фиксировал положение поршня.

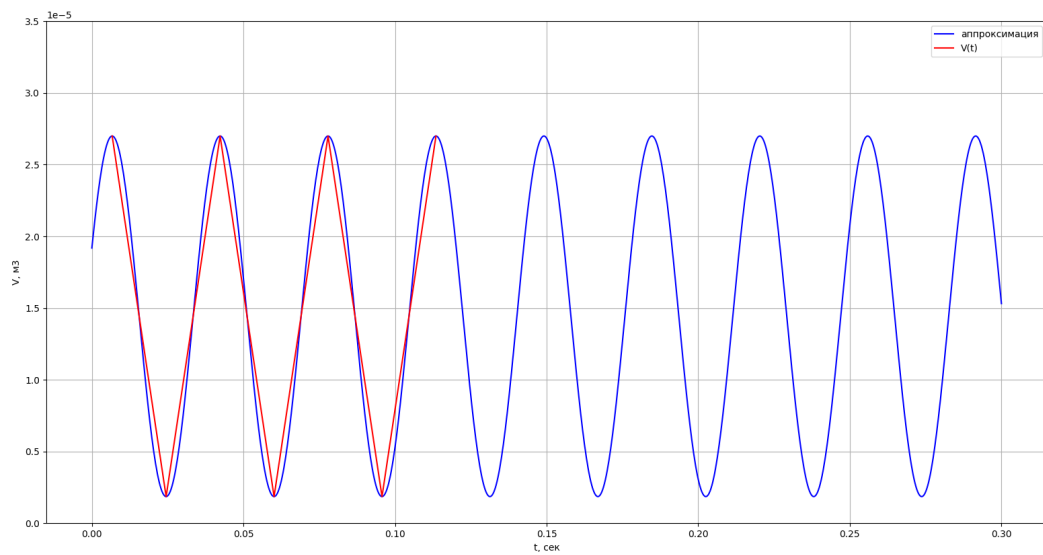


Рис. 5: $V(t)$

Тогда, сопоставляя p и V , получим:

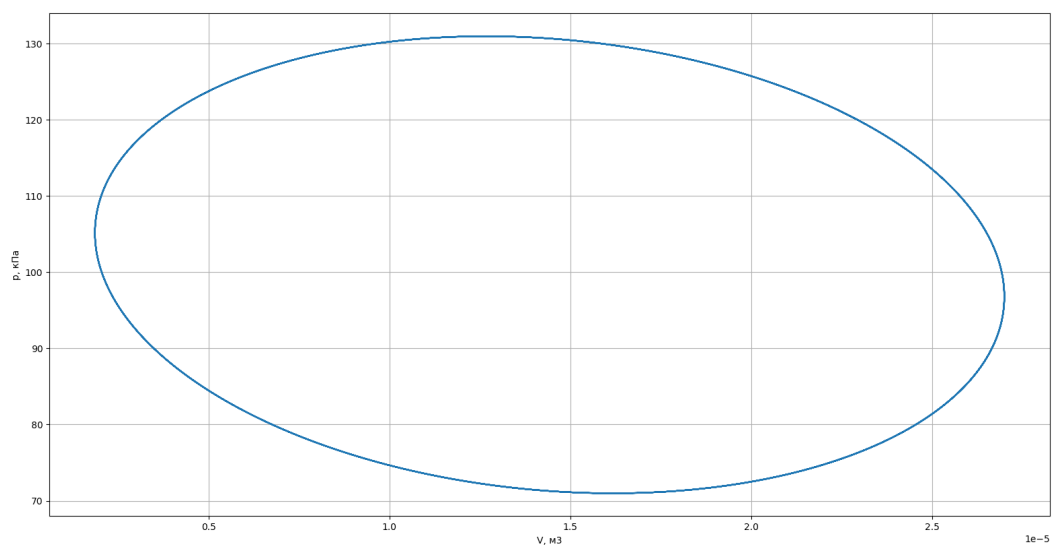


Рис. 6: $p(V)$

Для определения КПД нужно знать, как меняется масса спирта в спиртовке со временем:

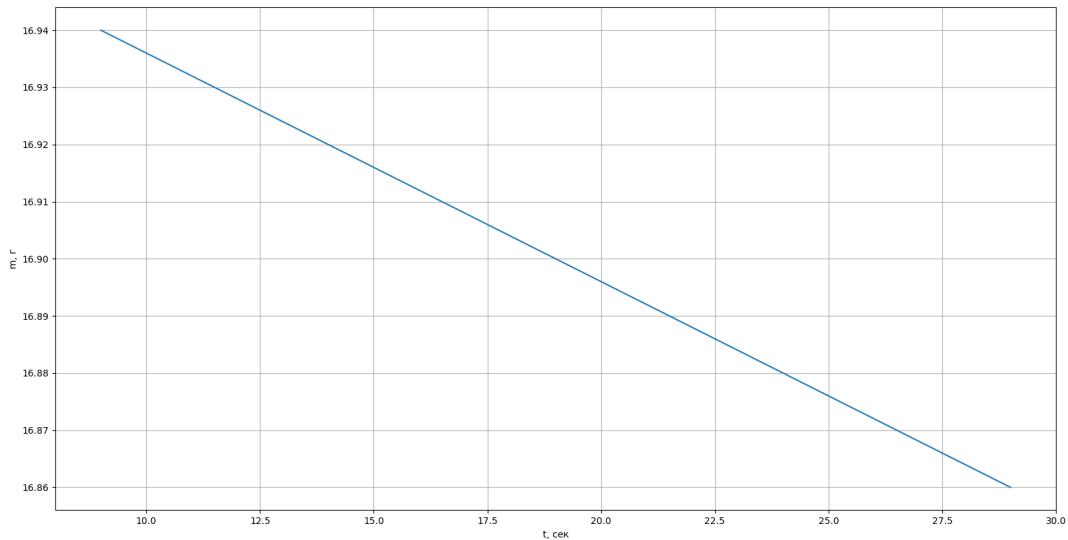


Рис. 7: $m(t)$

Здесь $m(t) = at + b$, где $a = -0.004 \frac{\text{г}}{\text{сек}}$, $b = 16.976 \text{ г}$

КПД определяется по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q}$$

Посчитаем Q за период:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} q dm(t) \approx 4.1 \text{ Дж}$$

Поскольку данные с щупов снялись очень криво, работу будем считать через площадь фигуры цикла в $p - V$ координатах.

$$A \approx 1.2 \text{ Дж}$$

$$\text{Тогда } \eta \approx 29\%$$

Теоретическое значение КПД можно вычислить по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{T_X}{T_H}$$

Температуру холодильника примем равной комнатной $T_X \approx 29^\circ\text{C}$, а температура нагревателя снималась с термопары $T_H \approx 452^\circ\text{C}$

Тогда $\eta_{\text{теор}} \approx 58\%$.

Погрешности

Поскольку снять данные с щупов не удалось, то погрешности никакие и не посчитаешь, так как помимо мощности требовались только графики.

Вывод

Несмотря на то, что снять данные с резисторов не удалось, КПД посчитать все же получилось. Его значение пусть и отличается от теоретического, но отличие в 2 раза не является чем-то большим по причинам, описанным в разделе с теорией и, возможно, ещё и в связи с тем, что температура холодильника всё же выше комнатной.