

# Двигатель Стирлинга с measureLAB



Физика

Термодинамика

Температура и теплопроводимость

Прикладные науки

Инженерные  
специальностиВозобновляемые источники  
энергии

Теплота



Уровень сложности

тяжелый



Кол-во учеников

2



Время подготовки

10 Минут



Время выполнения

20 Минут

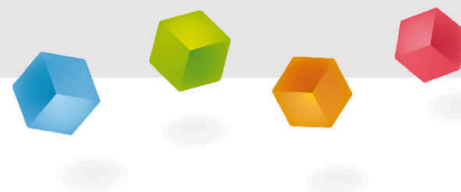
Этот контент также можно найти в Интернете по адресу:



<https://www.curriculab.de/c/616b1ba9bf955f0003ac7c41>

PHYWE

## Общая информация



## Описание

PHYWE



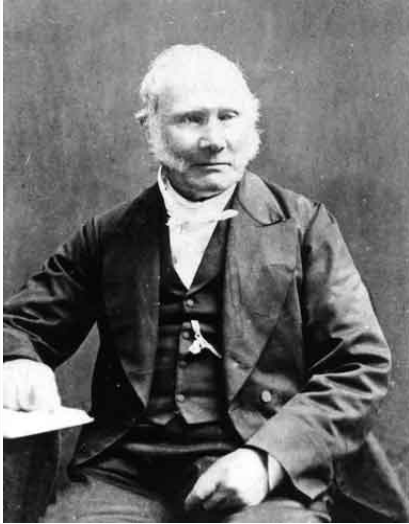
Двигатель Стирлинга

Прозрачный двигатель Стирлинга сочетает в себе следующие характеристики:

- Полностью прозрачный - все важные детали видны
- Измерение всех экспериментальных данных через модуль USB SmartSense
- совместимость с measureLAB
- Большое прозрачное маховое колесо.
- Цилиндр и вытесняющий поршень изготовлены из термостойкого стекла.
- Вытесняющий поршень с 2 измерительными патрубками для измерения температуры

## Описание

PHYWE



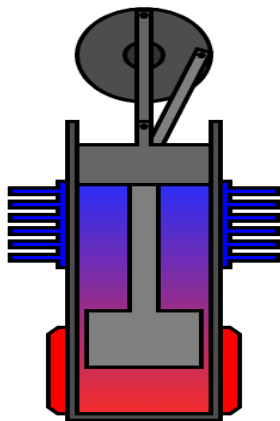
Доктор Роберт

Двигатель Стирлинга - это тепловой двигатель, который приводится в действие за счет циклического сжатия и расширения воздуха при различных температурах, так что происходит чистое преобразование тепловой энергии в механическую работу. В частности, двигатель Стирлинга представляет собой регенеративный тепловой двигатель замкнутого цикла с газообразной рабочей жидкостью.

Двигатель Стирлинга был первоначально разработан доктором Робертом Стирлингом (1790 - 1878).

## Описание

PHYWE



Принцип работы двигателя Стирлинга

Двигатель Стирлинга PHYWE имеет только один цилиндр, горячий на одном конце и холодный на другом. Буйковый уровнемер с неплотной посадкой направляет воздух между горячим и холодным концом цилиндра. Силовой поршень на открытом конце цилиндра приводит в движение маховик.

## Дополнительная информация (1/3)

PHYWE

### Предварительные

#### знания



#### Принцип



Цикл состоит из четырех термодинамических процессов / круг Карно

- Изотермический подвод тепла (расширение).
- Изохорный отвод тепла (постоянный объем).
- Изотермический отвод тепла (сжатие).
- Изохорный нагрев (постоянный объем).

Если цикл Стирлинга имеет перпендикулярные линии, в реальных приложениях, этот цикл является квазиэллиптическим.

## Дополнительная информация (2/3)

PHYWE

### Цель обучения



Получаем понятие о

- Первый и второй закон термодинамики
- Обратимые циклы
- Изохорные и изотермические изменения
- Газовые законы
- КПД
- Преобразование тепла
- Тепловой насос
- Цикл Карно

## Дополнительная информация (3/3)

PHYWE

### Принцип



На двигатель Стирлинга подается нагрузка с помощью торсиометра. Наблюдаются изменения частоты вращения и температуры двигателя Стирлинга. Эффективная механическая энергия и мощность, а также эффективная электрическая мощность оцениваются в зависимости от частоты вращения. Количество энергии, преобразованной в работу за цикл, можно определить с помощью  $pV$ -диаграммы.

Можно вычислить КПД двигателя Стирлинга

## Инструкции по технике безопасности

PHYWE



### Этанол / Денатурированный спирт

Для этого эксперимента применяются общие инструкции по технике безопасности для проведения экспериментов естественных наук.

Правила работы с опасными веществами приведены в соответствующих паспортах безопасности

H225: Сильно воспламеняющаяся жидкость и пар.

H318: Вызывает серьезные повреждения глаз.

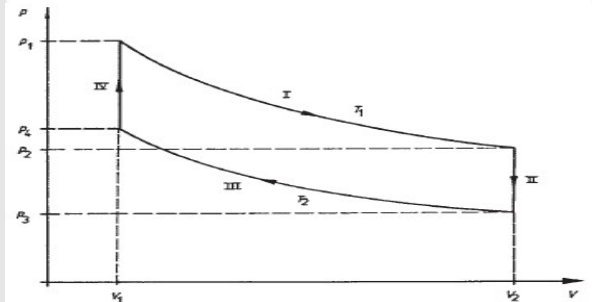
P210: Хранить вдали от тепла, горячих поверхностей, искр, открытого огня и других источников воспламенения. Не курить

## Теория (1/6)

PHYWE

В 1816 году Роберт Стирлинг получил патент на двигатель горячего воздуха, который сегодня известен как двигатель Стирлинга. В наше время двигатель Стирлинга используется для изучения принципа работы тепловых двигателей, поскольку в этом случае процесс преобразования тепловой энергии в механическую особенно нагляден и относительно прост для понимания. В настоящее время двигатель Стирлинга переживает новый этап дальнейшего развития благодаря своим многочисленным преимуществам. Так, например, она представляет собой закрытую систему, работает очень плавно, и может работать с различными источниками тепла, что позволяет учитывать и экологические аспекты.

Теоретически, в каждом цикле работы двигателя



$pV$ -диаграмма для идеального процесса Стирлинга

## Теория (2/6)

PHYWE

I) Изотермическое расширение рабочего тела, когда подводится тепло и выполняется работа:  
 $V_1 \rightarrow V_2; p_1 \rightarrow p_2; T_1 = \text{const.}$

II) Изохорный отвод тепла от рабочего тела к регенератору (охлаждение газа):  
 $T_1 \rightarrow T_2; p_2 \rightarrow p_3; V_2 = \text{const.}$

III) Изотермическое сжатие рабочего тела, когда выделяется тепло и выполняется работа:  
 $V_2 \rightarrow V_1; p_3 \rightarrow p_4; T_2 = \text{const.}$

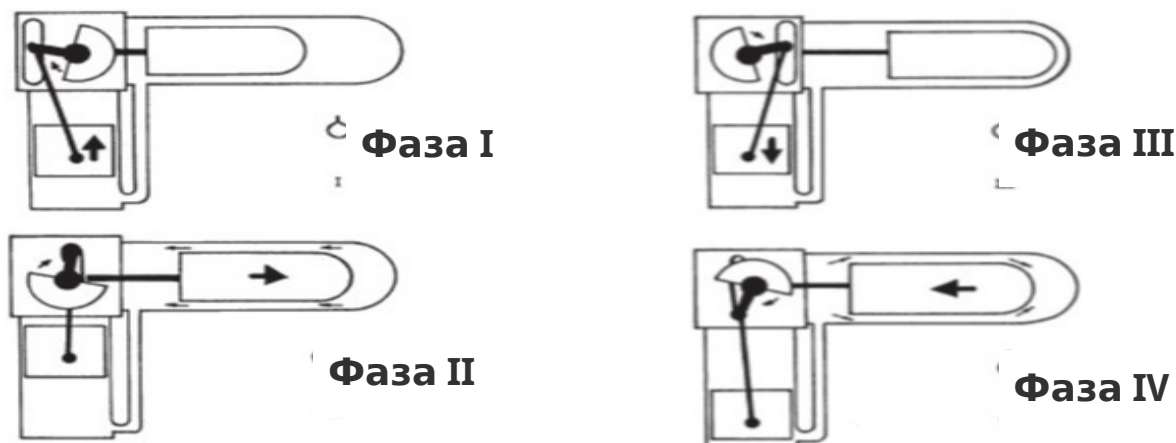
IV) Изохорный нагрев рабочего тела при подводе тепла к системе:  $T_2 \rightarrow T_1; p_4 \rightarrow p_1; V_1 = \text{const.}$

Согласно первому закону термодинамики, когда тепловая энергия подводится к изолированной системе, ее количество равно сумме увеличения внутренней энергии системы и механической работы, совершаемой последней:

$$dQ = dU + p dV$$

## Теория (3/6)

PHYWE



Принцип работы двигателя Стирлинга, фазы(этапы) I, II, III, IV

## Теория (4/6)

PHYWE

Таким образом, во время фазы IV количество тепловой энергии, высвобождаемой во время фазы II, регенерируется. Это означает, что внутри двигателя происходит только обмен тепловой энергией. Механические работы выполняются на этапах I и III. В связи с тем, что внутренняя энергия не изменяется во время изотермических процессов, работа, выполняемая во время этих фаз, соответственно равна поглощенной или выделенной тепловой энергии.

Поскольку

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$$

Работа, выполненная на этапе I, составляет:

$$W_1 = -n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$$

(отрицательная, так как это количество теплоты подводится).

Следовательно, работа, выполняемая на этапе III, составляет:

$$W_3 = + \nu \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_2/V_1)$$

$$|W_1| > W_3, \text{ так как } T_1 > T_2$$

## Теория (5/6)

PHYWE

Таким образом, полная работа определяется суммой  $W_1$  и  $W_3$ . Это равно площади диаграммы  $pV$ .

$$W_t = W_1 + W_3$$

$$W_1 = -\nu \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln(V_2/V_1)$$

Лишь часть этой полной эффективной энергии  $W_t$  используется в качестве эффективной работы  $W_m$  через внешние нагрузки, приложенные к двигателю. Остальное - это потери двигателя Стирлинга.

Максимальный тепловой КПД обратимого процесса в тепловом двигателе равен отношению всей суммарной работы  $W_1$  к количеству подводимой тепловой энергии  $Q_1 = -W_1$

$$\eta_{th} = W_t/W_1$$

$$\eta_{th} = \frac{\nu \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln(V_2/V_1)}{\nu \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1)}$$

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

## Теория (6/6)

PHYWE

### Коэффициент полезного действия (КПД)

Только часть этой полной эффективной энергии  $W_t$  используется в качестве эффективной работы  $W_m$  через внешние нагрузки, приложенные к двигателю.

Остальное - это потери двигателя Стирлинга.

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

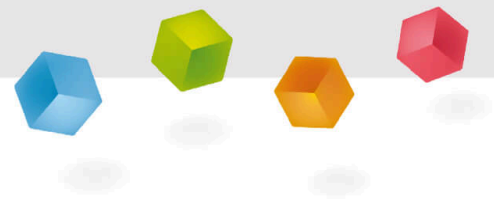
Карно установил, что это максимальный тепловой КПД для любого теплового двигателя, который может быть достигнут только теоретически. Видно, что КПД увеличивается с увеличением разности температур.



## Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	Двигатель Стирлинга, прозрач.	04372-00	1
2	Блок двигатель/ генератор	04372-01	1
3	Торсиометр	04372-02	1
4	Камин для двигателя Стирлинга	04372-04	1
5	Дигитальный модуль для двигателя Стирлинга.	04372-10	1
6	Программное обеспечение "measureLAB"	14580-61	1
7	Реостат, 330 Ом , 160 W	06116-03	1
8	Соединительный проводник, 500 мм, красный	07361-01	2
9	Соединительный проводник, 500 мм, синий	07361-04	3
10	Мерный цилиндр, 50 мл, прозрачный, PP	36628-01	1
11	Денатурат, 1000 мл	31150-70	1
12	Лампа накаливания 4 В/ 0,08 А, Е 10	06154-00	5

PHYWE



# Подготовка и выполнение работы

## Задачи

PHYWE

### Задачи



- Настройка экспериментальной установки
- Расчет общей энергии, производимой двигателем Стерлинга
- Оценка механической работы за один полный цикл и расчет механической мощности в зависимости от частоты вращения
- Определение КПД горелки
- Оценка выходной электрической мощности в зависимости от частоты вращения.
- Оценка КПД двигателя.

## Подготовка (1/2)

PHYWE

### Видео по настройке экспериментальной установки

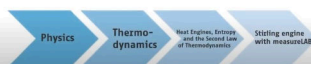
Вы можете легко выполнить настройку, следуя прилагаемому видео либо открыть видео по этой ссылке

[www.youtube.com/watch?v=MudeMYRnikE&t=1s](http://www.youtube.com/watch?v=MudeMYRnikE&t=1s)

#### Видео 1 нажмите

##### The Stirling Engine

How to use the new digital data logging module for the usage with measureLAB



**Двигатель Стирлинга:  
Как смонтировать модуль  
регистрации данных для  
использования с**

#### Видео 2 нажмите

##### The Stirling Engine

Возможности с measureLAB

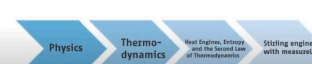


**Двигатель Стирлинга:  
Возможности с measureLAB**

#### Видео 3 нажмите

##### The Stirling Engine

Маркетинг



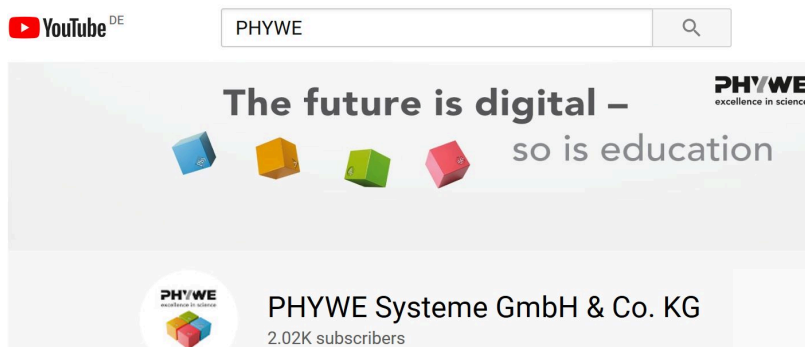
**Двигатель Стирлинга:  
Общий обзор**

## Подготовка (2/2)

PHYWE

Пожалуйста, подпишитесь также на канал PHYWE на YouTube

Вы никогда не пропустите в будущем новую информацию для соответствующих целей [чтобы подписаться, просто нажмите здесь](#)



## Выполнение работы

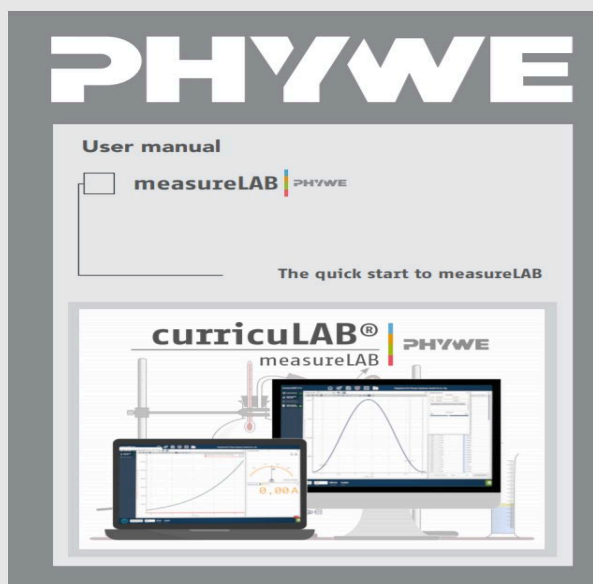
PHYWE

### Представление и $pV$ -диаграмма

- Подключите модуль к ПК через USB, а затем запустите measureLAB.
- Выберите "Быстрый старт", затем используйте режим P-V.
- Частота должна быть установлена на 2 кГц
- Настройки кривой: Ширина линии: 6 точек символа
- Поместите зажженную горелку под стеклянный цилиндр и наблюдайте за температурой на дисплее.
- Не забывайте о стеклянной посуде.
- Когда разность температур достигнет примерно 80 К, слегка подтолкните маховик по часовой стрелке, чтобы запустить двигатель.

## Руководство

PHYWE



### Использование measureLAB

- Использование программного обеспечения подробно описано в "Руководстве пользователя".
- Вы найдете это руководство, нажав следующую кнопку в программе measureLAB



## Оценка (1/3)

PHYWE



Спиртовая горелка, регулируемая 32154-00

Оценка тепловой мощности горелки (см. фото) приведена ниже.

Объем сожженного спирта  $\Delta V = 29 \text{ мл}$

Плотность спирта  $\rho = 0.83 \text{ г/мл}$

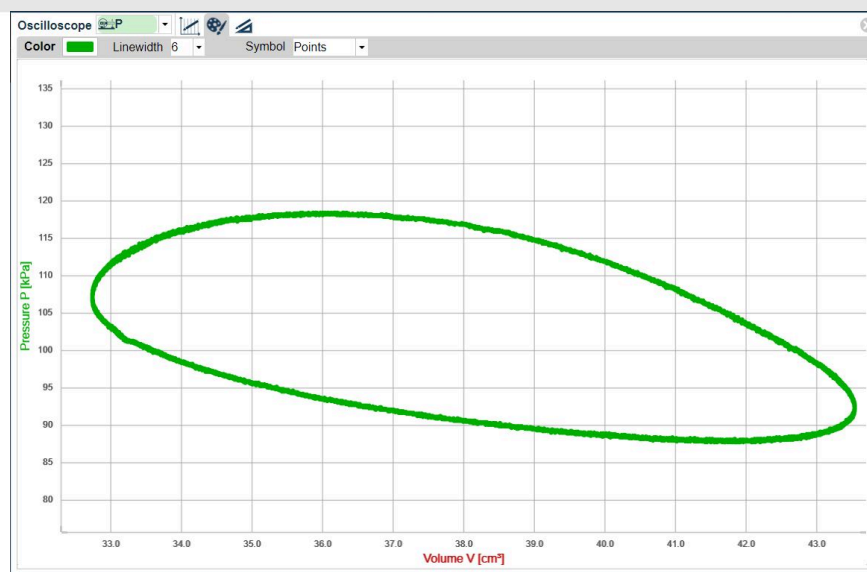
Это позволяет определить массу спирта, сжигаемого за секунду:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 6.69 \cdot 10^{-3} \text{ г/с},$$

а также тепловую мощность горелки:  
 $P_H = 167 \text{ Вт}$ .

## Оценка (2/3) - Типичная pV-диаграмма двигателя

PHYWE



## Оценка (3/3) -Типичная кривая $pV$ двигателя

PHYWE

После записи  $pV$ -диаграммы Вы можете после нажатия кнопки «Инструменты и анализ» определить с помощью функции «Интегрирование» значение интеграла.

С помощью этого инструмента Вы можете определить площадь поверхности кривой, необходимую для определения КПД двигателя

### Integrate

Calculated integral

243.744

Calculate

## Альтернативная установка

PHYWE

### Альтернативная экспериментальная установка

С внешним источником питания (например, источник питания PHYWE, 230 В, 13506-93), обеспечивающим постоянный ток: 0...12 В, 2 А, Вы можете инвертировать цикл Карно, подавая на прибор напряжение 5-10 В и постоянный ток 1,5 А согласно представленной фотографии.

Обратите внимание, что источник питания не входит в

