

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики, электротехники и автоматики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
для студентов всех направлений подготовки

Лабораторная работа № 84

**ИЗУЧЕНИЕ ЦИКЛА КАРНО
ИДЕАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ**

Казань
2014

Составитель: Фахертдинова Д.И.

УДК 539.1
ББК 23.343
А47

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов всех направлений подготовки. Лабораторная работа № 84. "Изучение цикла Карно идеальной тепловой машины" / Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Сост. Фахертдинова Д.И. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2014 г. – 11 с.

Данные методические указания являются составной частью методического обеспечения аудиторной и самостоятельной работы студентов всех направлений подготовки.

В работе изложены вопросы, связанные с изучением процессов цикла Карно идеальной тепловой машины. Приведено описание лабораторной установки, метода экспериментального определения работы, совершенной газом за цикл Карно и экспериментальная проверка к.п.д. цикла Карно.

Рис. 4, табл. 2

Рецензент

доцент кафедры МКиИС КГАСУ
к.т.н. Л.А. Исаева

УДК 539.1
ББК 23.343

- © Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2014 г.
- © Фахертдинова Д.И.

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Тепловыми двигателями называют устройства, преобразующие внутреннюю энергию вещества (топлива) в механическую работу. Работа тепловых двигателей основана на так называемых циклических процессах (циклах). Циклом называется такой процесс, в результате которого термодинамическая система возвращается в первоначальное состояние.

Циклы бывают обратимыми и необратимыми. Обратимым является цикл, состоящий из обратимых процессов. Если хотя бы одна часть цикла необратима, то необратим и весь цикл. Из цикличности работы тепловых двигателей следует, что, например, за процессом расширения газа или другого вещества, называемого рабочим телом, должно последовать его сжатие до исходного состояния.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассмотрим один из простейших и широко распространенных типов тепловых машин, в устройство которых входит цилиндр с поршнем, перемещающимся под действием теплового расширения газа. При движении поршня совершается работа, столь необходимая в технике. Такова принципиальная схема тепловых двигателей на паровозах, тепловозах, автомобилях и т.д.

Пусть газ (рабочее тело) находится в цилиндре под поршнем. Сообщим ему некоторое количество теплоты Q_1 от источника энергии, называемого нагревателем. В результате этого температура и давление возрастают. Расширяясь, газ толкает поршень, совершая работу A_1 . Затем поршень надо вернуть в исходное положение. Это осуществляется под действием внешней силы. Если сжатие газа производить в тех же условиях, что и расширение, то работа сжатия по абсолютной величине будет равна работе расширения газа. Поэтому суммарная работа газа за один цикл окажется равной нулю. Для того, чтобы двигатель совершил механическую работу A , необходимо процесс сжатия проводить при более низких давлениях, чем расширение. Понижение давления можно достичь, если газ будет отдавать некоторое количество теплоты Q_2 телу, называемому охладителем, имеющему температуру ниже температуры нагревателя. Тогда работа сжатия газа A_2 по абсолютной величине меньше работы расширения A_1 , т.е. $|A_2| < A_1$, и работа газа, совершённая за цикл, равна

$$A = A_1 - A_2.$$

Итак, любой тепловой двигатель состоит из нагревателя, рабочего тела и охладителя (рис.1).

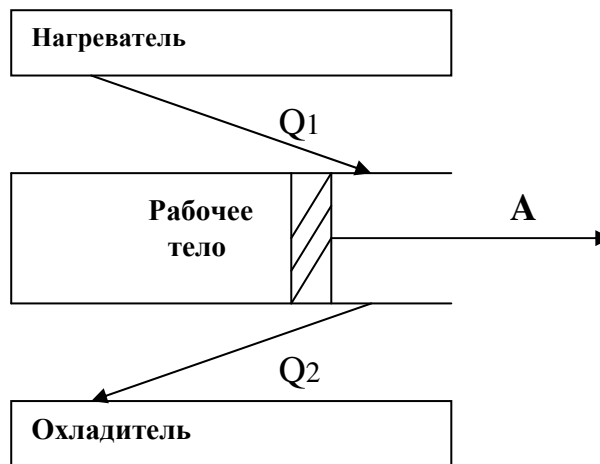


Рис.1.

Запишем баланс энергии за один цикл. Рабочее тело получает количество теплоты, равное $Q = Q_1 - Q_2$, и совершает работу $A = A_1 - A_2$. Поскольку оно возвращается в исходное состояние, то его внутренняя энергия принимает первоначальное значение и изменение внутренней энергии равно нулю, т.е. $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A$ (1), запишем $Q_1 - Q_2 = A + Q_{\text{пот}}$, где $Q_{\text{пот}}$ — энергия, теряемая в течение цикла за счёт теплообмена с окружающей средой, трения и других явлений. Отсюда следует, что механическая работа подчиняется соотношению:

$$A \leq Q_1 - Q_2 \quad (2),$$

где знак неравенства соответствует реальным тепловым двигателям, а равенства — идеальному двигателю, работающему без потерь.

Коэффициентом полезного действия (η) называется отношение работы A , совершаемой двигателем, к затраченной энергии, т.е. к количеству теплоты Q_1 , взятой от нагревателя:

$$\eta = A / Q_1 \quad (3).$$

С учётом (2) получаем, что

$$\eta \leq \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4).$$

Из (4) видно, что даже у идеального теплового двигателя коэффициент полезного действия меньше 1, т.е. меньше 100%. Это вызвано тем, что в процессе сжатия надо охлаждать рабочее тело. В противном случае вообще никакой работы совершаться не будет.

ЦИКЛ КАРНО

Рассмотрим идеализированный цикл теплового двигателя, предложенный Карно и носящий его имя. Рабочим телом у этого двигателя является идеальный газ, находящийся, например, в цилиндре под поршнем. В начале цикла рабочее тело находится в тепловом контакте с нагревателем, имеющим температуру T_1 . Это состояние на графике изображено точкой 1 (рис. 2).

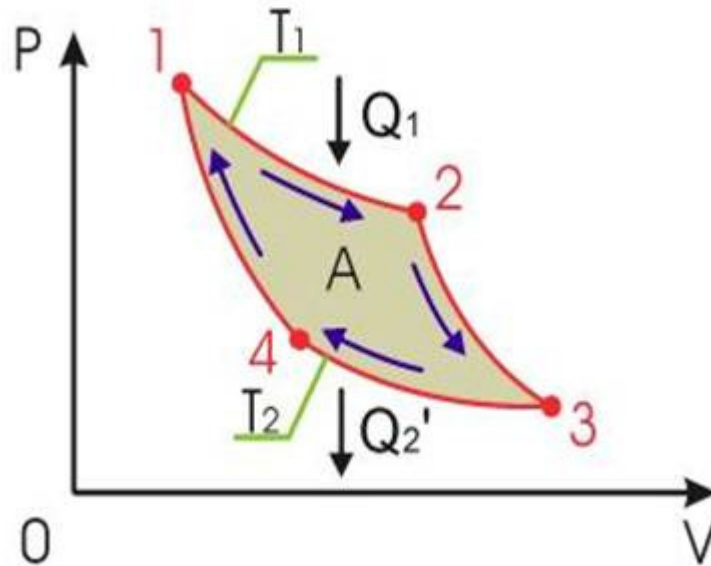


Рис.2.

Изотермически расширяясь, газ получает от нагревателя количество теплоты Q_1 и переходит в состояние 2. Затем он расширяется адиабатически до состояния 3. Его температура понижается и становится равной температуре охладителя T_2 . Далее, находясь в тепловом контакте с охладителем, газ под действием внешних сил изотермически сжимается (переход из состояния 3 в 4), передавая ему количество теплоты Q_2 . И, наконец, путём адиабатного сжатия температура газа повышается до первоначальной температуры, и газ возвращается в исходное состояние. При протекании цикла Карно предполагается, что отсутствуют потери энергии, связанные с теплообменом с окружающей средой и с трением, и что процессы являются равновесными, а, следовательно, цикл обратимый. Тогда, согласно второму закону термодинамики, изменение энтропии замкнутой термодинамической системы, состоящей из нагревателя, охладителя и рабочего тела, равно нулю, т.е. $\Delta S = 0$ (5). Изменение энтропии системы складывается из изменений энтропий тел, входящих в неё. Поскольку рабочее тело возвращается в исходное состояние, то его энтропия не изменяется. Поэтому $\Delta S = \Delta S_{нагр} + \Delta S_{охл} = 0$ (6), где $\Delta S_{нагр}$ и $\Delta S_{охл}$ — изменение энтропии нагревателя и охладителя. По определению

элементарное изменение энтропии $\Delta S = \frac{dQ}{T}$, где dQ – количество теплоты, а T – температура. Согласно этому, запишем, что $\Delta S_{\text{нагр}} = -Q_1 / T_1$, где знак (–) указывает на то, что нагреватель отдаёт энергию, и $\Delta S_{\text{охл}} = Q_2 / T_2$. Учитывая это, из (6) получаем:

$$-Q_1 / T_1 + Q_2 / T_2 = 0. \text{ Отсюда следует, что}$$
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (7).$$

Используя (4) и подставляя это выражение в (7), находим к.п.д. идеального теплового двигателя:

$$\eta_k = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (8).$$

Получили важный результат: к.п.д. идеального теплового двигателя, работающего по циклу Карно, зависит только от температуры нагревателя и охладителя. В любом реальном тепловом двигателе существуют всевозможные потери энергии, к тому же процессы, происходящие в нём, необратимые. Поэтому к.п.д. реального теплового двигателя всегда меньше к.п.д. двигателя Карно, работающего в том же температурном интервале. Необходимо отметить, что, совершенствуя тепловые двигатели, можно лишь приблизить их к.п.д. к к.п.д. двигателя Карно, который является максимально возможным для тепловых двигателей.

Рассмотрим несколько подробнее суть процессов, происходящих в цикле Карно. Прежде всего, отметим, что, кроме нагревателя, совершенно необходимой составной частью теплового двигателя является наличие охладителя. Действительно, если бы теплота не отдавалась охладителю, то сжатие газа происходило бы по той же изотерме, что и расширение, только в обратном направлении. Следовательно, температура газа оставалась бы неизменной, т.е. $T_2 = T_1$. Тогда к.п.д. цикла, согласно (8), будет равен: $\eta_k = 1 - T_2 / T_1 = 0$, т.е. работа бы не совершалась. Поэтому лишь при наличии охладителя можно создать поток энергии от нагревателя к охладителю и при этом часть этой энергии превратить в работу. Это справедливо не только для цикла Карно, но и для любых тепловых двигателей. Таким образом, невозможно полностью превратить теплоту в механическую работу при циклическом процессе, в то время как обратный процесс — превращение работы в теплоту — возможен.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Целью данной работы является изучение процессов цикла Карно для идеального газа посредством компьютерной модели, экспериментальное определение работы, совершенной газом за цикл и экспериментальная проверка к.п.д. цикла Карно.

Найдите на рабочем столе компьютера программу «Открытая физика 1.1» и зайдите в раздел «Термодинамика и молекулярная физика», затем выберите работу «Цикл Карно».

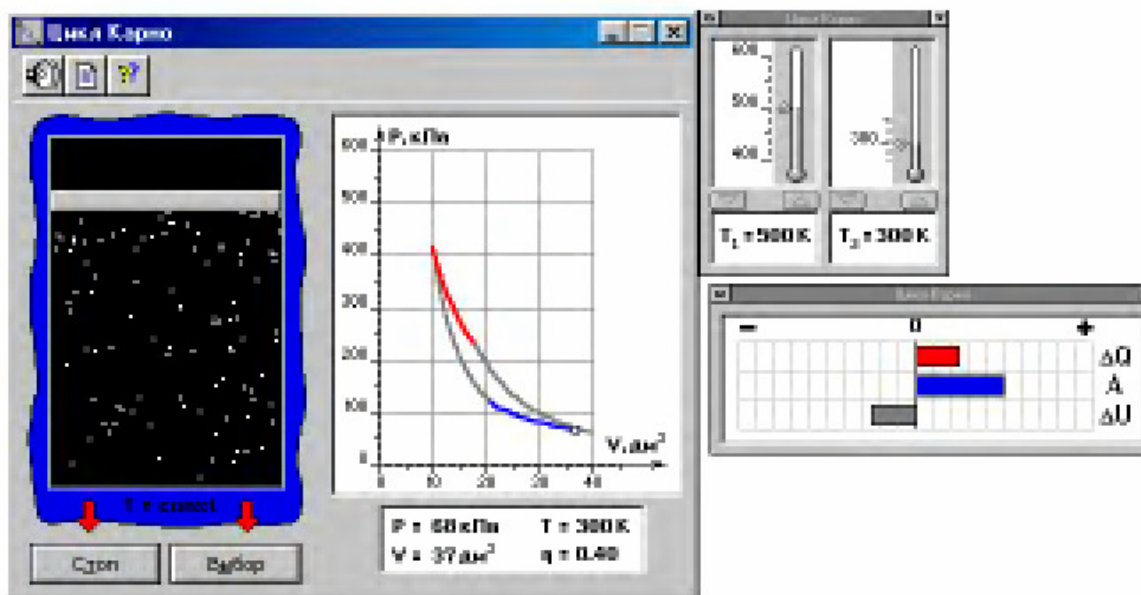


Рис.3.

Внимательно рассмотрите представленную демонстрацию. Цикл Карно изображен на рис.4, где изотермическое расширение и сжатие изображены соответственно кривыми 1-2 и 3-4, а адиабатическое расширение и сжатие – кривыми 2-3 и 4-1.

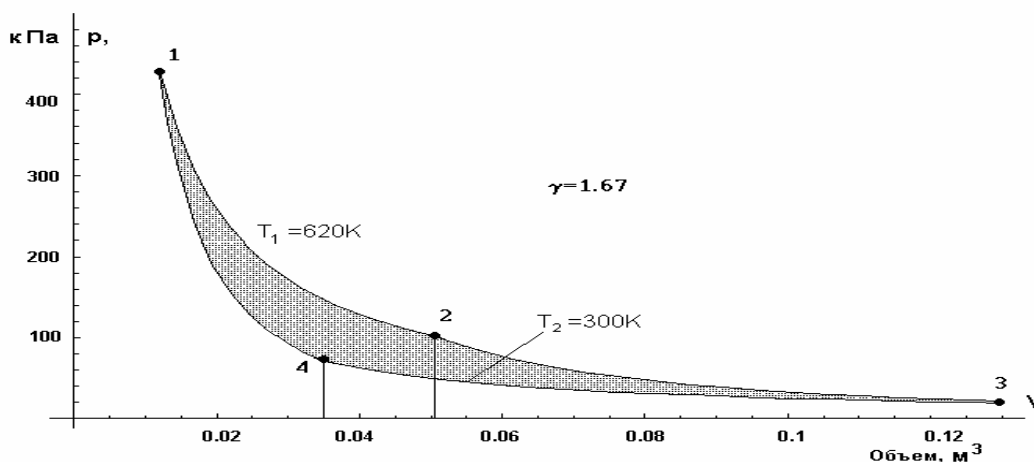


Рис.4.

При изотермическом процессе внутренняя энергия $U = \text{const}$, поэтому количество теплоты Q_1 , полученное газом от нагревателя, равно работе расширения A_{12} , которое газ совершает при переходе из состояния 1 в состояние 2:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1 \quad (9), \text{ где}$$

m – масса газа, M – молярная масса газа, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, T_1 – температура газа в состоянии 1, V_1 и V_2 – объемы газа в состояниях 1 и 2 соответственно.

При адиабатическом расширении 2-3 теплообмен с окружающей средой отсутствует, и работа расширения A_{23} совершается за счет изменения внутренней энергии газа

$$A_{23} = \frac{m}{M} C_v (T_2 - T_1) \quad (10), \text{ где}$$

C_v – теплоемкость газа при постоянном объеме.

Количество теплоты Q_2 , отданное газом холодильнику при изотермическом сжатии, равно работе сжатия A_{34} :

$$A_{34} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2 \quad (11).$$

Работа адиабатического сжатия

$$A_{41} = -\frac{m}{M} C_v (T_1 - T_2) = -A_{23} \quad (12).$$

Работа, совершаемая в результате прямого кругового цикла Карно:

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2 \quad (13).$$

Тогда КПД цикла Карно будет равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (14).$$

Проведение измерений

1. Установите температуры T_1 и T_2 , указанные в табл. 1 для вашего варианта согласно вашему номеру в лабораторном журнале.

ТАБЛИЦА 1. Значения температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 .

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
T₁	400	410	420	430	440	450	460	470
	500	510	520	530	540	550	560	570
T₂	270	280	290	300	310	320	330	340
	350	340	330	320	310	300	290	280

Для этого нажмите кнопку «ВЫБОР», переместите маркер мыши так, чтобы его острие находилось на кнопках регуляторов термометров σ или ρ .

Последовательными короткими нажатиями на эти кнопки установите заданные температуры нагревателя и холодильника.

Нажмите мышью кнопку «СТАРТ» и наблюдайте перемещение точки по замкнутой кривой цикла Карно. Остановите процесс нажатием кнопки «СТОП» вблизи точки 1, обозначенной на рис. 2, т.е. в месте перехода изотермического расширения газа в адиабатическое.

2. Запишите в таблицу 2 значение V_2 , которое в момент остановки процесса в точке 1 будет обозначено в нижнем прямоугольнике окна опыта.

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений.

$T_1 =$ и $T_2 =$

Номер измерения	V_1 дм ³	V_2 дм ³	V_3 дм ³	V_4 дм ³	Q_1 кДж	Q_2 кДж	A кДж	ΔA кДж	η %
1									
2									
3									

3. Аналогичные измерения проведите для точек 3, 4 и 1 и запишите значения объемов газа в соответствующие столбцы таблицы 2. Проведите эксперимент всего три раза.

Установите вторые значения температуры нагревателя и холодильника, указанные в табл. 1 согласно своему варианту, и проделайте все измерения по пп. 2 – 3 еще раз. Результаты опытов занесите в таблицу 2 для вторых значений температур T_1 и T_2 .

4. Для любой произвольной точки цикла запишите значения давления, объема и температуры, указанные в прямоугольнике окна опыта.

5. С помощью уравнения состояния идеального газа $PV = \frac{m}{M}RT = \nu RT$ определите число ν молей газа, находящихся в цилиндре под поршнем.

6. Используя формулы 9, 11 и 13 рассчитайте Q_1 , Q_2 , A и запишите эти значения в таблицу 2.

7. По формуле (14) рассчитайте КПД цикла Карно и сравните его со значением, приведенным в окне опыта.

8. Вычислите среднее значение работы цикла Карно и абсолютную погрешность измерения A . Для данных вычислений воспользуйтесь методическими указаниями *.

* Фахертдинова Д.И. Методические указания к решению задач по физике «Измерение физических величин». – Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. – 11 с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения тепловому двигателю, циклу. Опишите принцип работы теплового двигателя.
2. Выведите формулу (4) для определения к.п.д. (η) теплового двигателя.
3. Опишите процессы, происходящие в цикле Карно.
4. Выведите формулу (8) для определения к.п.д. (η_k) цикла Карно.
5. Поясните методику проведения эксперимента и запишите формулы (9), (10), (11), (12), (13), (14) для определения работ, совершаемых в результате прямого кругового цикла Карно и к.п.д. цикла Карно.

Лабораторная работа № 84
ИЗУЧЕНИЕ ЦИКЛА КАРНО
ИДЕАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

Методические указания
к лабораторным работам по физике
для студентов всех направлений подготовки.

Составитель: Фахертдинова Д.И.

Корректурa автора

Редакционно-издательский отдел
Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать:

Заказ

Бумага тип № 2

Печать RISO

Тираж 60 экз.

Формат 60x84/16

Усл. печ. л.

Уч.- изд. л.

Печатно-множительный отдел КазГАСУ
420043, Казань, ул. Зеленая, 1