

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.5

Изучение цикла Карно идеальной тепловой машины

Ознакомьтесь с теорией в конспекте лекций и в учебниках: [1], гл.9, §59; [2], гл.11, § 11.2. Запустите программу «Термодинамика и молекулярная физика», «Цикл Карно». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите краткие сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

Цель работы

- Знакомство с компьютерной моделью, иллюстрирующей цикл Карно для идеального газа.
- Экспериментальное определение работы, совершенной газом за цикл.
- Экспериментальная проверка теоремы Карно.

Краткая теория

Циклом Карно называется круговой процесс, состоящий из двух изотермических процессов и двух адиабатических процессов (см. окно теории).

Рабочим телом называется термодинамическая система, совершающая процесс и предназначенная для преобразования одной формы передачи энергии – теплоты или работы – в другую. Например, в тепловом двигателе рабочее тело совершает работу за счет части тепла, получаемого от нагревателя.

Нагревателем (теплоотдатчиком) называется устройство, сообщающее рассматриваемой термодинамической системе энергию в форме тепла.

Холодильником (теплоприемником) называется система (окружающая среда или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара), поглощающая часть тепла рабочего тела.

Прямым циклом называется круговой процесс, в котором рабочее тело совершает положительную работу: $\oint p dV > 0$. На графике p - V прямой цикл изображается в виде замкнутой кривой, проходимой рабочим телом в виде замкнутой кривой, причем при расширении давление (и температура) должны быть больше, чем при сжатии.

Работа любого теплового двигателя состоит из повторяющихся циклов, каждый из которых включает в себя получение рабочим телом энергии от нагревателя, расширение рабочего тела и совершение им работы, передачу части энергии холодильнику и возвращение рабочего тела в исходное состояние. Работа, совершаемая рабочим телом за один полный цикл, складывается из работы, совершенной им при расширении, и работы, совершенной им при сжатии: $A = A$

$A_{\text{расш}} + A_{\text{сж}}$. Учитывая, что при сжатии газ совершает отрицательную работу, последнее равенство можно переписать в виде

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}|.$$

При наличии холодильника газ перед сжатием или во время сжатия охлаждается, и потому процесс совершения им работы при сжатии протекает при меньшем давлении, чем при расширении. Поэтому $|A_{\text{сж}}| < A_{\text{расш}}$, и, следовательно, $A > 0$. Принцип действия теплового двигателя приведен на рис.1.

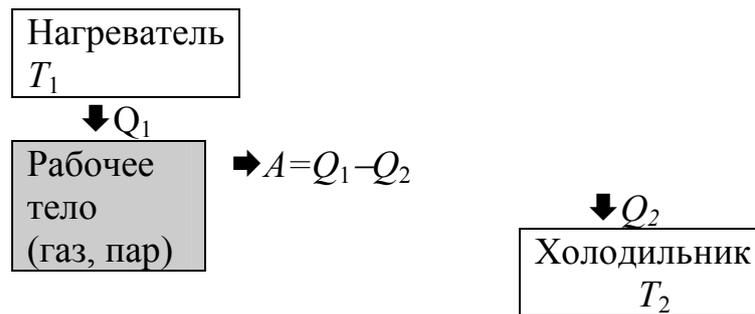
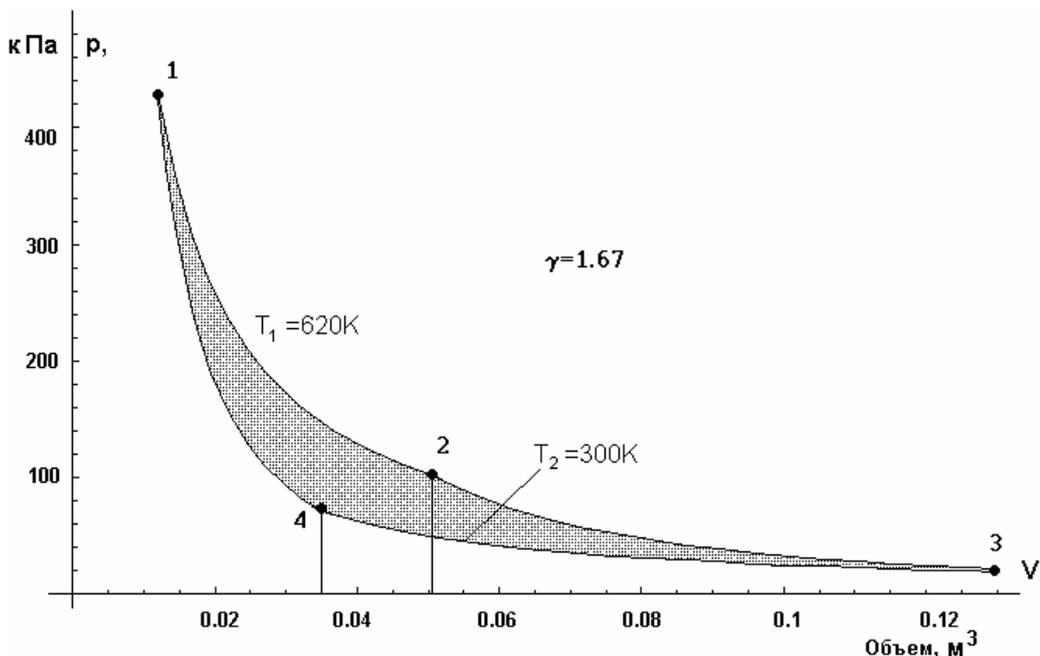


Рис.1

Рис.2



От нагревателя с температурой T_1 за цикл отнимается количество теплоты Q_1 , а холодильнику с температурой T_2 за цикл передается количество теплоты Q_2 . Рабочее тело при этом совершает полезную работу $A = Q_1 - Q_2$.

Цикл Карно изображен на рис.2, где изотермическое расширение и сжатие изображены соответственно кривыми 1-2 и 3-4, а адиабатическое расширение и сжатие – кривыми 2-3 и 4-1. При изотермическом процессе $U=\text{const}$, 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:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1. \quad (1)$$

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

$$A_{23} = \frac{m}{M} C_V (T_2 - T_1). \quad (2)$$

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

$$A_{34} = -\frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2. \quad (3)$$

Работа адиабатического сжатия

$$A_{41} = -\frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) = -A_{23}. \quad (4)$$

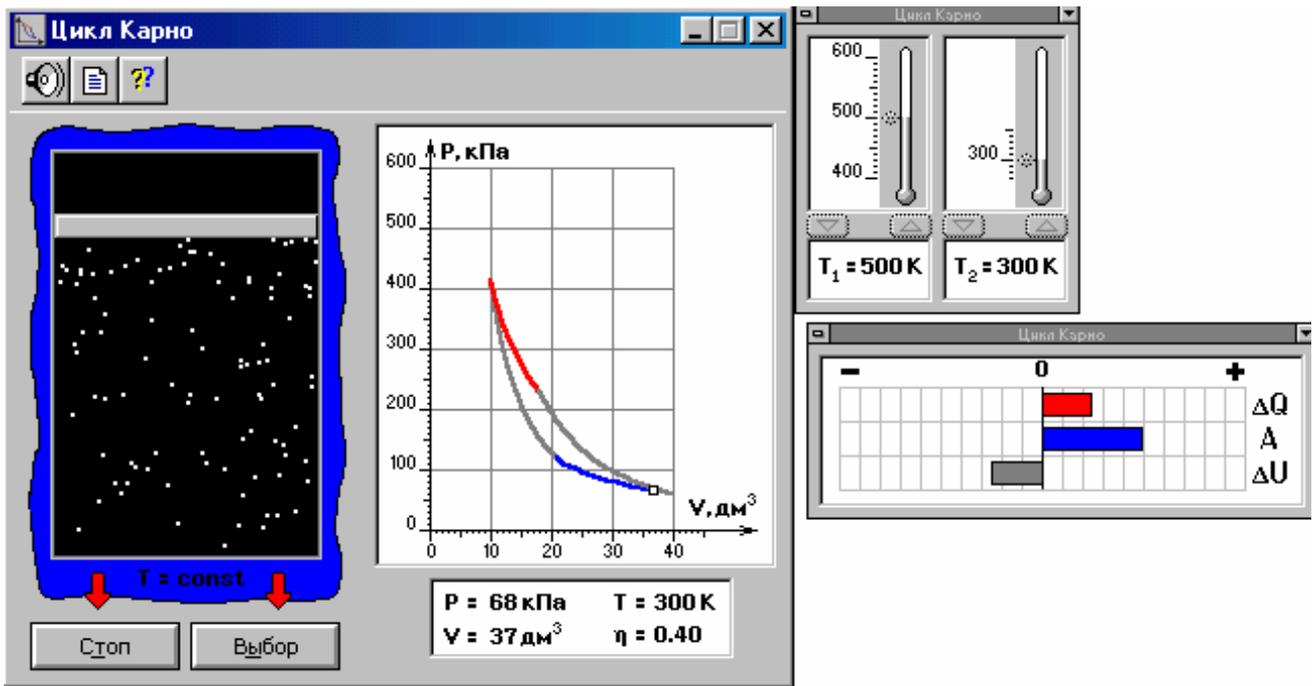
Работа, совершаемая в результате прямого кругового цикла Карно:

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2. \quad (5)$$

Тогда термический КПД цикла Карно будет равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6)$$

Методика и порядок измерений



Установите температуры T_1 и T_2 , указанные в табл. 1 для вашей бригады. Для этого нажмите кнопку «ВЫБОР», переместите маркер мыши так, чтобы его острое 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.

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

Аналогичные измерения проведите для точек 3, 4 и 1 и запишите значения объемов газа в соответствующие столбцы таблицы по форме 1.

Установите вторые значения температуры нагревателя и холодильника, указанные в табл. 1, и проделайте все измерения по пп. 2–4 еще раз. Результаты опытов занесите в таблицу по форме 1.

Обработка результатов и оформление отчета

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

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

3. Используя уравнения 1, 3 и 5 рассчитайте Q_1 , Q_2 , A и запишите эти значения в таблицу по форме 1.

4. По формуле (6) рассчитайте КПД цикла Карно и сравните его со значением, приведенным в окне опыта.

5. Вычислите среднее значение работы цикла Карно и абсолютную погрешность измерения A .

Значения температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2

Табл. 1

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
T_1	400	410	420	430	440	450	460	470
	500	510	520	530	540	550	560	570
T_2	270	280	290	300	310	320	330	340
	350	340	330	320	310	300	290	280

Результаты измерений (количество измерений и строк = 3)

$T_1 =$

$T_2 =$

Форма 1.

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									

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие устройства называют тепловыми двигателями?
2. Из каких основных элементов состоит тепловой двигатель?
3. Зачем в тепловом двигателе нужен холодильник?
4. Что является холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
5. Чем отличаются обратимые и необратимые процессы? Почему все реальные процессы необратимы?
6. Дайте понятие энтропии (определение, размерность и математические выражения изменения энтропии для различных изопроцессов идеальных газов).

7. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? незамкнутой системы?
8. В чем заключается теорема Карно?
9. Выведите формулу цикла Карно.
10. Изобразите в системе координат T - S изотермический и адиабатический процессы и цикл Карно в целом.
11. Докажите, что КПД теплового двигателя, работающего по произвольному обратимому циклу, всегда меньше, чем КПД цикла Карно, работающего между максимальной и минимальной температурой этого цикла.