

## Лабораторная работа № 2.3

### ЦИКЛ КАРНО

#### 2.3.1. Цель работы

Целью лабораторной работы является знакомство с компьютерной моделью цикла Карно в идеальном газе, экспериментальное определение работы, совершённой газом за цикл и КПД прямого цикла Карно.

#### 2.3.2. Краткая теория

*Циклом Карно* называется круговой процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатических процессов.

*Рабочим телом* называется термодинамическая система, совершающая круговой процесс в тепловой установке и предназначенная для преобразования одной формы передачи энергии – теплоты или работы – в другую. Например, в тепловом двигателе рабочее тело, получая энергию в форме теплоты, часть её передаёт в форме работы.

*Нагревателем* (теплоотдатчиком) называется устройство, сообщаемое 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. На графике  $p - V$  прямой цикл изображается в виде замкнутой кривой, проходимой рабочим телом по часовой стрелке.

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, совершённой им при расширении, и работы, совершённой им при сжатии

$$A = A_{\text{расш}} + A_{\text{сж}}. \quad (2.3.1)$$

Учитывая, что при сжатии газ совершает отрицательную работу, последнее равенство можно переписать в виде

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}|. \quad (2.3.2)$$

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 приведён на рис. 2.3.1.

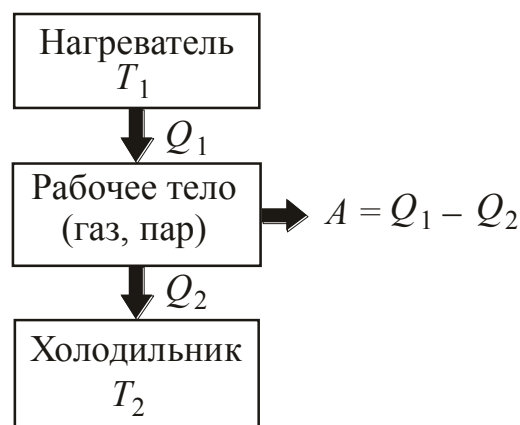


Рис. 2.3.1. Принцип действия теплового двигателя

От нагревателя с температурой  $T_1$  за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а холодильнику с температурой  $T_2$  за цикл передаётся количество теплоты  $Q_2$ . Рабочее тело при этом совершает полезную работу  $A = Q_1 - Q_2$ . Цикл Карно изображён на рис. 2.3.2. Кривые 1 – 2 и 3 – 4

соответствуют изотермическому расширению и сжатию, а кривые 2 – 3 и 4 – 1 – адиабатическому расширению и сжатию.

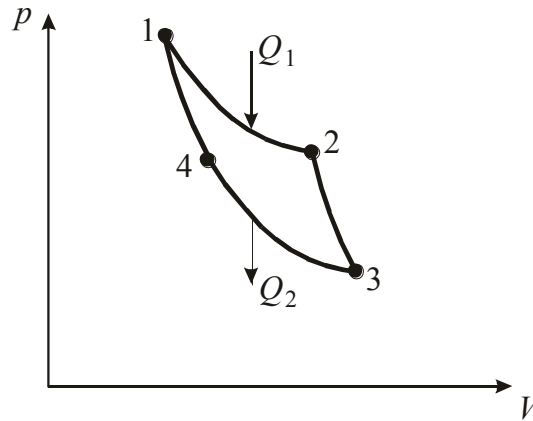


Рис. 2.3.2. Цикл Карно

При изотермическом процессе внутренняя энергия не изменяется ( $U = \text{const}$ ), поэтому количество теплоты  $Q_1$ , полученное газом от нагревателя, равно работе расширения  $A_{12}$ , совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2.

$$A_{12} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1. \quad (2.3.3)$$

При адиабатическом расширении 2 – 3 теплообмен с окружающей средой отсутствует и работа расширения 2 – 3 совершается за счёт изменения внутренней энергии газа.

$$A_{23} = -\Delta U_{23} = -\frac{m}{\mu} C_V (T_3 - T_2), \quad (2.3.4)$$

где  $C_V$  – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

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

$$A_{34} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2. \quad (2.3.5)$$

Работа адиабатического сжатия

$$A_{41} = -\Delta U_{41} = -\frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_4) = -A_{23}, \quad (2.3.6)$$

так как  $T_1 = T_2$ , а  $T_3 = T_4$ .

Работа, совершаемая в результате прямого кругового цикла Карно

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2. \quad (2.3.7)$$

Тогда термический КПД цикла Карно будет равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (2.3.8)$$

где  $T_1$  – температура нагревателя;

$T_2$  – температура холодильника.

### 2.3.3. Порядок выполнения работы

Запустите программу «Открытая физика 1.1». Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Цикл Карно». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

Внимательно рассмотрите рис. 2.3.3, найдите все регулируемые величины и запишите их в соответствующую таблицу в отчете (см. с. 6).

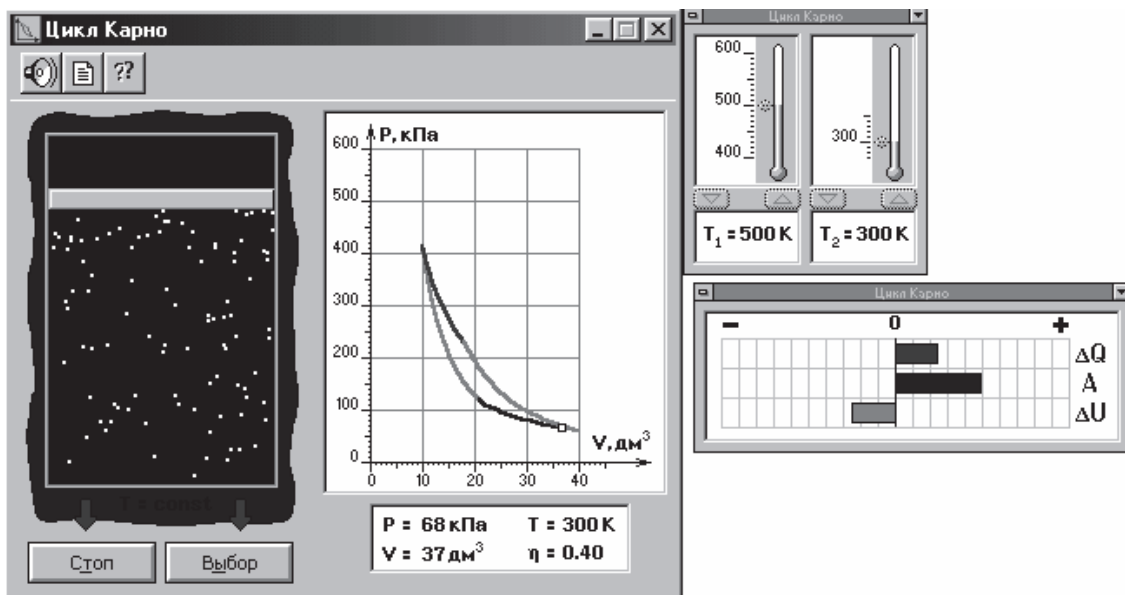


Рис. 2.3.3. Цикл Карно

1. Установите температуру нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ , указанные в табл. 2.3.1 для вашей бригады. Для этого нажмите кнопку «Выбор», переместите маркер мыши так, чтобы его остриё находилось на кнопках регуляторов термометров  $\nabla$  или  $\triangle$ . Последовательными короткими нажатиями на эти кнопки установите заданные температуры нагревателя и холодильника.

2. Запишите начальный объем  $V_1 = 40 \text{ дм}^3$  в таблицу 2.3.2. Нажмите мышью кнопку «Старт» и наблюдайте перемещение маленького квадрата по замкнутой кривой цикла Карно. Остановите процесс нажатием кнопки «Стоп» в точке 2, обозначенной на рис. 2.3.2, т. е. в месте перехода изотермического расширения газа в адиабатическое.

3. Запишите в табл. 2.3.2 значение  $V_2$ , которое в момент остановки процесса в точке 2 будет обозначено в нижнем прямоугольнике окна опыта.

4. Аналогичные измерения проведите для точек 3, 4 и запишите значения объёмов газа в соответствующие столбцы табл. 2.3.2.

5. Запишите в табл. 2.3.2 теоретическое значение КПД из прямоугольника окна опыта.

6. Установите вторые значения температуры нагревателя и холодильника (см. табл. 2.3.1) и проделайте все измерения по п.п. 2 – 5 ещё раз. Результаты опытов занесите в эту же таблицу.

Таблица 2.3.1

**Значения температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$**

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

Таблица 2.3.2

**Результаты измерений**

Измеряемые величины	Первый опыт	Второй опыт
	$T_1 =$ К $T_2 =$ К	$T_1 =$ К $T_2 =$ К
$V_1, \text{ дм}^3$		
$V_2, \text{ дм}^3$		
$V_3, \text{ дм}^3$		
$V_4, \text{ дм}^3$		
$\eta$ (теор.), %		

**Результаты расчетов**

Номер опыта	$Q_1$ , Дж	$Q_2$ , Дж	$A$ , Дж	$\eta$ (эксп.), %
1				
2				

**2.3.4. Обработка результатов измерений**

- Для любой произвольной точки цикла запишите значения давления, объёма и температуры, указанные в окне опыта, например для точки 1.
- С помощью уравнения состояния идеального газа  $pV = \frac{m}{\mu} RT$  определите число молей  $\nu$  газа, находящегося в цилиндре под поршнем ( $\nu = m/\mu$ , универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль К)).
- Используя уравнения (2.3.3), (2.3.5) и (2.3.7), рассчитайте  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $A$  и запишите эти значения в табл. 2.3.3.
- По формуле (2.3.8) рассчитайте экспериментальное значение КПД цикла Карно.
- Вычислите среднюю относительную и среднюю абсолютную погрешности определения КПД цикла Карно для обоих опытов (см. с. 8).
- Запишите ответы и сделайте выводы.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- Что такое цикл Карно?
- Какие устройства называют тепловыми двигателями?
- Из каких основных элементов состоит тепловой двигатель?
- Зачем в тепловом двигателе нужен холодильник?
- Что является холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
- Объясните принцип действия теплового двигателя.
- Чему равна работа, совершаемая в результате прямого цикла Карно? Как она определяется графически?
- Как вычисляется термический КПД цикла Карно?