

## РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Термодинамика и молекулярная физика» и «Распределение Максвелла». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с компьютерной моделью, описывающей поведение молекул идеального газа.

Экспериментальное подтверждение распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям.

Экспериментальное определение массы молекул в данной модели.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Статистическая физика** – это раздел физики, в котором изучаются свойства макросистем, исходя из индивидуальных свойств составляющих макросистему частиц и взаимодействий между ними. Описание движения каждой частицы макросистемы (а их число более  $10^{22}$ ) – задача невероятно сложная. Вместо этого статистическая физика оперирует со средними значениями параметров очень большого числа частиц. Огромное число частиц в макросистеме приводит к появлению новых, *статистических закономерностей*.

Основу статистической физики составляет теория вероятностей. Вероятность события характеризуется кратностью его повторения. Если в  $N$  случаях  $i$ -е событие происходит  $N_i$  раз, то **вероятностью**  $P_i$  этого события называют величину

$$P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$$

На практике  $N$  всегда конечно, тогда при достаточно больших  $N$  и  $N_i$  можно считать, что

$$P_i \approx \frac{N_i}{N}$$

Сумма вероятностей всех возможных результатов измерений равна единице.

$$\sum P_i = \sum \left( \frac{N_i}{N} \right) = 1$$

**Средние значения случайных величин.** Зная вероятности появления различных результатов измерения дискретной величины  $x$ , можно найти их среднее значение  $\langle x \rangle$ .

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum N_i x_i = \sum P_i x_i$$

### **Функция распределения.**

Случайная величина  $x$  может иметь непрерывный характер (например, скорости молекул). В этом случае область изменения  $x$  разбивают на отдельные интервалы и считают число попаданий случайной величины в тот или иной интервал. При большом числе небольших интервалов  $\Delta x$  и известной вероятности  $P_x$  попадания случайной величины в эти интервалы **функцией распределения  $f(x)$**  случайной величины называют

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x}{\Delta x} = \frac{dP_x}{dx}$$

Функции распределения можно приписать смысл **плотности вероятности**, т.е. вероятности того, что интересующая нас величина окажется в единичном интервале вблизи значения  $x$ .

Вероятность того, что величина  $x$  попадет в интервал  $(a, b)$

$$P = \int_a^b f(x) dx$$

В разных случаях функция распределения может иметь различный характер.

### **Распределение Максвелла**

Молекулы газа при своем движении постоянно сталкиваются. Скорость каждой молекулы при столкновении изменяется как по величине, так и по направлению. Она может возрасть и убывать. Однако среднеквадратичная скорость остается неизменной. Это объясняется тем, что в газе, находящемся при определенной температуре, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям. При этом все направления векторов скоростей молекул оказываются равноправными (равновероятными), а величины скоростей подчиняются определенной закономерности. Скорость отдельной молекулы с течением времени может меняться, однако доля молекул со скоростями в некотором интервале скоростей остается неизменной.

Нельзя ставить вопрос: сколько молекул обладает определенной скоростью. Дело в том, что, хотя в любом, даже малом объеме, содержится огромное число молекул, количество значений скорости бесконечно (как чисел в последовательном ряду), и может случиться, что ни одна молекула не обладает заданной скоростью.

Поэтому задача о распределении молекул по скоростям формулируется следующим образом. Пусть в единице объема находится  $N$  молекул. Какая доля молекул  $\frac{\Delta N}{N}$  имеет скорости от  $v_1$  до  $v_1 + \Delta v$ ?

♦  $\frac{\Delta N}{N}$  - это вероятность того, что  $\Delta N$  молекул будет иметь скорость в заданном интервале скоростей от  $v$  до  $v + \Delta v$ .

Это статистическая задача и при ее решении следует опираться на законы и положения статистической физики.

♦  $f(v) = \frac{\Delta N}{N\Delta v}$  - функция распределения по скоростям молекул идеального газа.

Экспериментально вид функции распределения молекул по скоростям был получен в опыте Штерна и имеет вид, показанный на рис. 1.

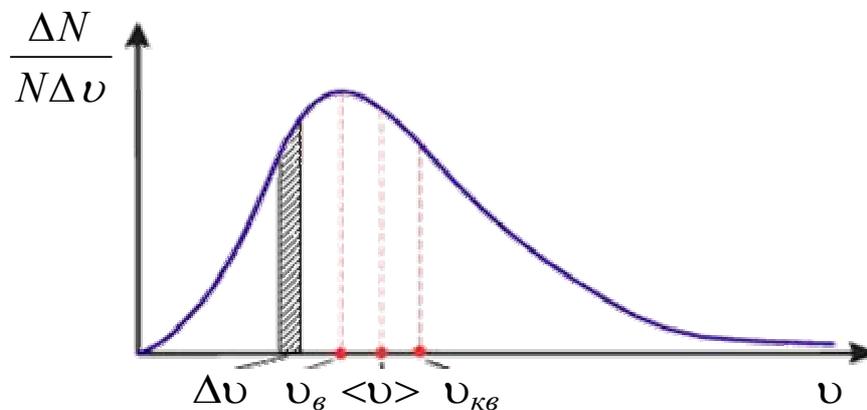


Рисунок 1.

Аналитический вид функции распределения молекул идеального газа по скоростям получил Дж. К. Максвеллом в 1859.

$$♦ f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv} = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left( -\frac{E_{кин}}{kT} \right) -$$

*распределение Максвелла (функция распределения молекул идеального газа по скоростям).* Здесь  $E_{кин} = \frac{mv^2}{2}$  - кинетическая энергия одной молекулы.

Конкретный вид функции распределения Максвелла зависит от рода газа (массы молекулы) и температуры. Давление и объем газа на распределение молекул по скоростям не влияет.

### Особенности функции распределения Максвелла (рис.1)

1.  $\Delta N = Nf(v)\Delta v$  - число молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $v + dv$ .

2. Доля молекул  $\frac{dN}{N} = f(v)dv$ , скорости которых лежат в интервале

от  $v$  до  $v+dv$ , равна площади заштрихованной полоски на рисунке 1.

3. Вся площадь под кривой равна доле молекул, имеющих скорость в интервале от 0 до  $\infty$ , т.е. площадь под кривой распределения Максвелла равна вероятности того, что любая молекула имеет хоть какую-нибудь скорость:

$$\int_0^{\infty} f(v)dv = 1.$$

4. Максимум функции Максвелла соответствует **наиболее вероятной скорости**.

♦ **Наиболее вероятная скорость** – это скорость, вблизи которой на единичный интервал скоростей приходится наибольшее число молекул. Чтобы найти наиболее вероятную скорость, нужно продифференцировать функцию распределения по скорости и приравнять производную нулю:

$$\frac{df}{dv} = 0. \text{ Отсюда}$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \approx 1,41 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$

5. Кривая распределения Максвелла позволяет найти среднюю арифметическую скорость.

♦ **Средняя арифметическая скорость** – это сумма скоростей всех молекул, деленная на общее число всех молекул в единице объема.

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v f(v)dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \approx 1,60 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$

где  $m$  – масса одной молекулы,

$k = R / N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  - универсальная газовая постоянная.

♦ **Средняя квадратичная скорость** молекулы газа определяется из зависимости средней кинетической энергии поступательного движения молекулы от температуры:

$$\frac{mv_{кв}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \approx 1,73 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}.$$

6. Из трех скоростей, характеризующих состояние идеального газа, **наименьшей** является наиболее вероятная скорость, а **наибольшей** – средняя квадратичная скорость (рис. 1).

7. При изменении температуры газа будут изменяться скорости движения

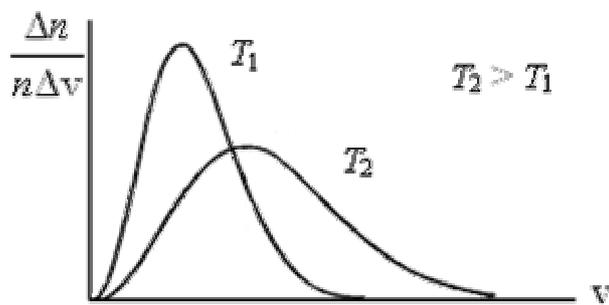


Рисунок 2.

всех молекул, а, следовательно, и наиболее вероятная скорость. При нагревании газа доля молекул, обладающих большими скоростями, увеличивается, а доля молекул с малыми скоростями, уменьшается. Поэтому **максимум кривой будет смещаться вправо при повышении температуры и влево при понижении температуры** (рис. 2). Высота максимума не будет оставаться постоянной, поскольку

площадь под кривой всегда должна быть равна единице.

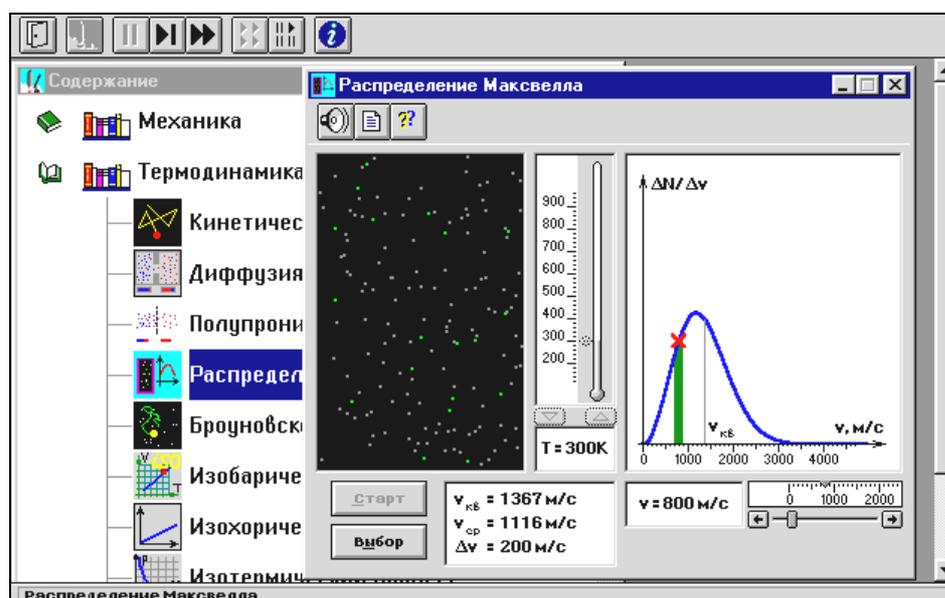
8. Кривые распределения Максвелла асимметричны. **Слева от максимума кривые распределения молекул по скоростям идут круче, чем справа.** Это означает, что число молекул, имеющих скорости больше наиболее вероятной скорости, превышает число молекул, чьи скорости меньше наиболее вероятной скорости.

#### ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Используя закон распределения молекул идеального газа по скоростям, выведите формулы для наиболее вероятной и среднеквадратичной скоростей.

#### МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу «Открытая физика», выберите раздел «Термодинамика и молекулярная физика», затем «Распределение Максвелла».
2. Внимательно рассмотрите картинку в средней части монитора. Найдите регуляторы с движками, задающие температуру газа  $T$ , скорость молекул  $v$ .



3. В процессе измерений можно останавливать движение всех молекул путем нажатия кнопки «||» вверху окна программы. Тем самым получать как бы «мгновенные фотографии», на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном диапазоне  $\Delta v$  вблизи заданной скорости  $v$  (т.е. имеющие скорости от  $v$  до  $v + dv$ ). Для продолжения наблюдения движения частиц надо нажать кнопку «▶▶».

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**  
 Приступайте к измерениям.

**ТАБЛИЦА 1. Значения температуры**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1$	160	160	200	220	240	260	280	300
$T_2$	700	720	740	760	780	780	800	820
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
$T_1$	340	360	380	400	420	460	480	500
$T_2$	820	840	860	880	900	920	940	960

**ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Исследование законов распределения молекул газа по скоростям.**

4. Нажмите кнопку «Выбор» и установите начальную температуру газа  $T_1$ , указанную в таблице 1 для Вашего варианта.
5. Установите скорость выделенной группы молекул, равную 0,5 км/с, и запишите данное значение в таблицу 2.
6. Нажмите мышью кнопку «Старт» в нижнем столбце кнопок, затем клавишу «||» в верхнем ряду кнопок и подсчитайте на «мгновенной фотографии» количество молекул  $\Delta N$ , скорости которых лежат в заданном диапазоне  $\Delta v$  вблизи заданной скорости молекул  $v$  (они более яркие). Результат запишите в таблицу 2.

7. Нажмите кнопку «▶▶» и через 10-20 секунд получите еще одну мгновенную фотографию, нажав кнопку «||». Подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результат запишите в таблицу 2.
8. Повторите п. 7 еще три раза, записывая количество молекул движущихся с заданной скоростью.
9. Нажмите кнопку «Выбор» и с помощью движка регулятора увеличьте заданную скорость на 0,5 км/с и повторите п.п. 6-7.
10. Повторите п. 9 до значения заданной скорости молекул 4,5 км/с.
11. Нажмите кнопку «Выбор» и установите температуру газа  $T_2$ , указанную в таблице 1 для Вашего варианта. Повторите п.п. 3-8, записывая результаты измерений в таблицу 3, аналогичную таблице 2.
12. Вычислите и запишите в таблицы средние арифметические значения количества частиц  $\Delta N_{cp}$ , скорости которых лежат в заданном диапазоне от  $v$  до  $v + \Delta v$ .
13. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей  $\Delta N_{cp} = f(v)$  для двух рассматриваемых температур газа, указав на них температуры.
14. По графикам для обеих температур определите значения наиболее вероятных скоростей молекул.
15. На графиках сравните площади под полученными кривыми для обеих температур.
16. Запишите ответы и сделайте вывод.

**ТАБЛИЦЫ 2 и 3. Результаты измерений при  $T = \underline{\hspace{1cm}}$  К.**

$v$ [км/с]=	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$\Delta N_1$							
$\Delta N_2$							
$\Delta N_3$							
$\Delta N_4$							
$\Delta N_5$							
$\Delta N_{cp}$							

*Табличные значения*

Газ	Водород	Гелий	Неон	Азот	Кислород
Масса молекулы $10^{-27}$ кг	3.32	6.64	33.2	46.5	53.12

**ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Определение массы молекулы газа.**

17. Нажмите кнопку «Выбор» и установите с помощью движков регулятора температуры начальную температуру газа  $T_1 = 120$  К. В нижнем белом окошке на экране монитора высветится значения наиболее вероятной

скорости и значение средней квадратичной скорости. Запишите значения данных величин в таблицу 4.

18. С помощью движков регулятора температуры увеличивайте значение температуры газа на 100К, каждый раз записывая в таблицу 4 соответствующие значения наиболее вероятной скорости и средней квадратичной скорости молекул. Измерения продолжайте до установки на регуляторе температуры значения, равного 920 К.

**Таблица 4. Результаты измерений и расчетов**

№ измерения	$T, K$	$v_v$	$v_v^2$	$v_{кв}$	$v_{кв}^2$
1					
2					
...					
9					
$m, кг$					

19. Рассчитайте квадраты наиболее вероятной и средней квадратичной скорости и занесите полученные значения в соответствующие столбцы таблицы 4.

20. Постройте график зависимости квадрата наиболее вероятной скорости от температуры  $v_v^2(T)$ .

21. По данному графику определите значение массы молекулы

$$m = 2k \frac{\Delta(T)}{\Delta(v_v^2)}$$

22. Постройте график зависимости квадрата средней квадратичной скорости от температуры  $v_{кв}^2(T)$ .

23. Определите значение массы молекулы по формуле

$$m = 3k \frac{\Delta(T)}{\Delta(v_{кв}^2)}$$

24. Сравните значения массы молекул, рассчитанные по этим формулам.

25. Используя таблицу 5, подберите газ, значение массы молекулы которого подходит к рассчитанным значениям массы молекулы в п. 21, 23.

26. Сделайте вывод.

### **Письменно ответьте на следующие вопросы**

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения. Что такое функция распределения?

2. Что такое максвелловский закон распределения молекул по скоростям? Для каких условий он получен? Напишите формулу для функции распределения Максвелла.
3. Какие особенности у графика функции распределения молекул по скоростям?
4. Что показывает числовое значение площади под кривой функции распределения молекул по скоростям? Может ли это значение быть дробным? Зависит ли площадь от числа молекул, температуры, молярной массы?
5. Запишите выражения для наиболее вероятной, средней квадратичной, средней арифметической скоростей. В чем их физический смысл?
6. Сравните графики максвелловской функции распределения для газа, находящегося при различных температурах.
7. Сравните графики максвелловской функции распределения для различных газов ( $m_1 < m_2$ ), находящихся при одинаковой температуре.
8. Почему для расчёта массы молекулы газа в данной лабораторной работе были справедливы формулы, приведённые в п.п 5, 6? Докажите их справедливость использования при вычислениях в данной работе.

### Выполните задание

1. Определите среднюю арифметическую скорость молекул идеального газа, плотность которого  $\rho$  при давлении  $P$  (значение плотности и давления взять из таблицы для своего варианта).
2. Вычислите температуру, при которой средняя квадратичная скорость молекул газа больше их наиболее вероятной скорости на 100м/с.
3. Найдите отношение средних квадратичных скоростей молекул гелия и газа из вашего варианта.
4. Докажите, что средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул газа пропорциональны  $\sqrt{\frac{P}{\rho}}$ .

**Таблица 5. Числовые значения параметров**

вариант	1	2	3	4	5	6	7
газ	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Ne	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
$P$ (кПа)	35	40 кПа	20	50	45	25	35
$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	0,3	0,4	0,15	0,6	0,3	0,2	0,2

$$1 \text{ а.е.м} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1

### АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Термодинамика и молекулярная физика» и «Адиабатический процесс». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

#### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

Изучение тепловых процессов в идеальном газе

Экспериментальное подтверждение закономерностей адиабатического процесса.

Экспериментальное определение показателя адиабаты, количества степеней свободы и структуры молекул газа в данной модели.

#### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

♦ **Термодинамическая система (ТС)** - совокупность макроскопических тел, рассматриваемых методами термодинамики, т.е. с точки зрения обмена энергией между телами и внешней средой.

♦ **Моль**  $\nu$  (моль) – единица количества вещества. В одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул или атомов. Число частиц, содержащихся в моле вещества, называют **постоянной Авогадро**:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

♦ **Молярная масса**  $\mu$ , (кг/моль) – масса одного моля вещества

$$\mu = m_0 N_A, \quad \text{где } m_0 \text{ – масса одной молекулы.}$$

♦ **Идеальный газ** – это физическая модель, в которой молекулы газа считаются материальными точками, не взаимодействующими друг с другом на расстоянии. Соударение таких молекул со стенками сосуда считается абсолютно упругим.

♦ **Термодинамические параметры** – это параметры, определяющие состояние газа:

- $P$  (Па – паскаль) - давление газа на стенки сосуда;
- $V$  (м<sup>3</sup>) – объем, занимаемый газом;
- $T$ , (К – кельвин) – абсолютная температура.

Температура по шкале Кельвина связана с температурой по шкале Цельсия:

$$T, \text{ К} = 273 + t \text{ } ^\circ\text{C}.$$

♦ **Термодинамическое равновесие** – состояние системы, при котором температура и давление в любой точке системы одинаковы.

♦ **Уравнение состояния** – уравнение, определяющее связь термодинамических параметров в равновесных процессах.

**Уравнением состояния идеального газа** является уравнение Менделеева – Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – универсальная газовая постоянная,

$\frac{m}{\mu} = \nu$  – количество вещества (число молей газа),  $m$  – масса газа.

Уравнению состояния можно придать другой вид, вводя постоянную Больцмана  $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ .

Тогда

$$PV = \frac{m}{\mu} RT = \frac{R N m_0}{N_A m_0} T \Rightarrow P = \frac{N R}{V N_A} T \Rightarrow P = n k T,$$

где  $n = \frac{N}{V}$  – концентрация молекул.

♦ Основное уравнение молекулярно - кинетической теории газов устанавливает связь между давлением газа  $P$ , его объемом  $V$  и средней кинетической энергией  $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle$  молекулы газа:

$$P = \frac{2}{3} n \langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle,$$

где  $n$  – концентрация молекул,  $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle$  – среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекулы или

Сравнивая с уравнением состояния  $P = nkT$ , получаем

$$\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Таким образом, абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения одной молекулы.

♦ Средняя квадратичная скорость молекулы

Из соотношений для средней кинетической энергии  $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{m_0 u^2}{2}$  и

основного уравнения молекулярно – кинетической теории  $\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{3}{2} kT$

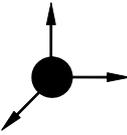
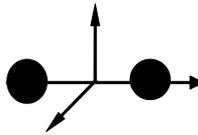
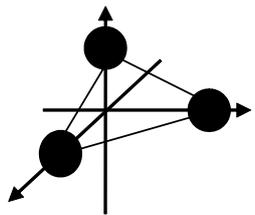
можно получить выражение для средней квадратичной скорости молекулы идеального газа

$$u^2 = \frac{3kT}{m_0} = \frac{3RT}{m_0 N_A} = \frac{3RT}{\mu} \quad \text{или}$$

$$u = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \text{ – средняя квадратичная скорость молекулы.}$$

♦ Число степеней свободы молекулы  $i$  — это количество независимых координат, необходимое для определения положения молекулы в пространстве.

**Число степеней свободы для идеального газа жестких молекул**

Число степеней свободы	Одноатомный газ	Двухатомный газ	Многоатомный газ
			
Поступательных	3	3	3
Вращательных	-	2	3
Всего	3	5	6

В реальных молекулах нет жесткой связи между атомами внутри молекулы, поэтому необходимо учитывать колебательные степени свободы атомов внутри молекулы. Независимо от общего числа степеней свободы молекулы, *три степени свободы всегда поступательные.*

♦ Закон равнораспределения энергии по степеням свободы: на каждую поступательную и вращательную степень свободы молекулы приходится одинаковая энергия, равная  $\frac{1}{2}kT$ .

♦ Внутренняя энергия  $U$  (Дж) идеального газа складывается из кинетической энергии поступательного и вращательного движения его молекул.

$$U = \frac{i}{2} \nu RT$$

♦ Количество теплоты  $Q$  (Дж) – это энергия, передаваемая системе путем теплообмена.

♦ Теплоемкость вещества  $C$  (Дж/К) — это количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1 градус.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

**Молярная теплоемкость** – теплоемкость одного моля газа.

**Удельная теплоемкость** - теплоемкость одного килограмма газа

♦ **Работа**  $A$  (Дж), совершаемая газом при изменении объема:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV .$$

Графически работа определяется площадью под кривой процесса в координатах  $(P, V)$ .

♦ **Первое начало термодинамики** является законом сохранения энергии в термодинамических процессах.

Количество теплоты  $dQ$ , сообщенное системе, идет на приращение ее внутренней энергии  $dU$  и на совершение системой работы  $dA$ :

$$dQ = dU + dA .$$

♦ **Изопроцесс** – процесс, при котором один из параметров состояния системы не меняется.

○ **Изохорный процесс** - процесс, протекающий при **постоянном объеме**,  $V = const$ . При изохорном процессе газ не совершает работу над внешними телами  $\Delta A = P\Delta V = 0$ . Вся теплота, сообщаемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии  $dQ = dU$ . Молярная теплоемкость идеального газа при изохорном процессе зависит только от числа степеней

свободы молекул  $C_V = \frac{i}{2} R$ .

○ **Изобарический процесс** - процесс, протекающий при **постоянном давлении**,  $P = const$ . При изобарном процессе работа газа при увеличении объема от  $V_1$  до  $V_2$  равна  $\Delta A = P\Delta V = P(V_2 - V_1)$ . Обмен энергией может происходить в форме работы и в форме теплопередачи. Подводимое к газу тепло затрачивается на приращение внутренней энергии газа и на совершение работы:  $dQ = dU + dA$ . Молярная теплоемкость идеального газа при изобарном процессе больше, чем при изохорном, на величину универсальной газовой постоянной, поскольку часть тепла, сообщаемого газу, идет на совершение работы.

$$C_p = C_V + R = \frac{i + 2}{2} R$$

○ **Изотермический процесс** - процесс, протекающий при **постоянной температуре**,  $T = const$ . При изотермическом процессе работа газа при

увеличении объема от  $V_1$  до  $V_2$  равна  $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ , внутренняя

энергия идеального газа постоянна. Все подводимое к газу тепло расходуется им на совершение работы против внешних сил  $dQ = dA$ . Молярная теплоемкость при изотермическом процессе равна бесконечности.

○ **Адиабатический процесс** – процесс, протекающий **без теплообмена** с окружающей средой,  $dQ = 0$ . Следовательно, для него характерно наличие

хорошей изоляции системы от внешней среды или высокая скорость термодинамического процесса, при которой теплообмен незначителен.

Примеры адиабатических процессов: работа двигателей внутреннего сгорания; процессы, происходящие в термостатах; разряжение и сжатие газа при распространении звуковой волны.

При адиабатическом процессе газ совершает работу только за счет своей внутренней энергии

$$A = -\Delta U = -(U_2 - U_1) = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_1 - T_2).$$

Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона

$$PV^\gamma = \text{const},$$

где  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$  показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

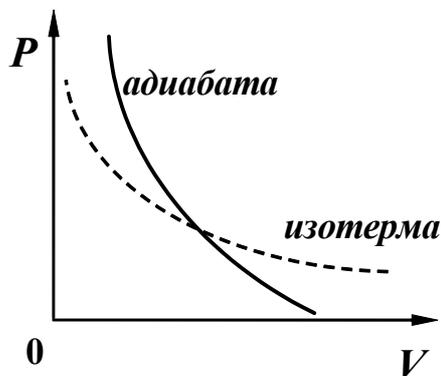


График адиабаты в координатах  $(P, V)$  (рис. 1) проходит более круто, чем график изотермы. Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, но и повышением температуры. Теплоемкость при адиабатном процессе равна нулю.

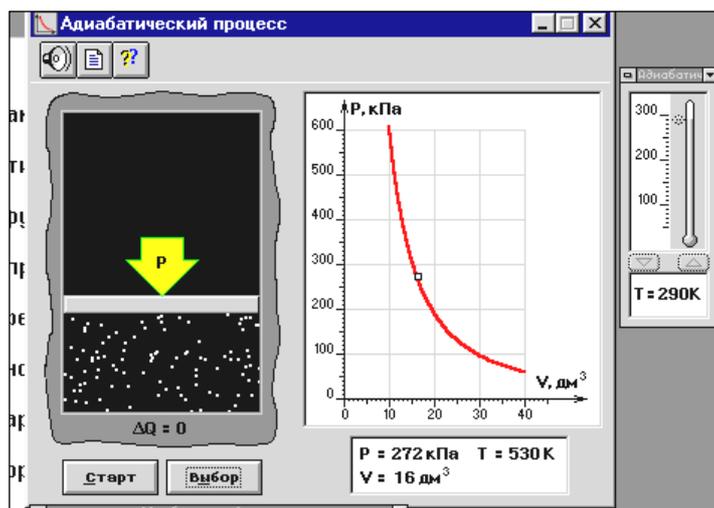
Рисунок. 1

#### ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА.

1. Рассчитайте число степеней свободы для молекулы воды, кислорода, метана, аргона.
2. Получите выражение для молярной теплоемкости идеального газа при изобарном процессе.
3. Получите выражение для показателя адиабаты.

#### МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика» и «Адиабатический процесс».



1. Внимательно рассмотрите картинку на экране. Обратите внимание на теплоизоляцию сосуда, в котором будет проходить процесс. Найдите математическую формулировку условия теплоизоляции. Найдите регулятор с движком, задающий начальную температуру газа.
2. С помощью кнопки «Выбор» установите любую начальную температуру газа. Нажмите на экране монитора кнопку «Старт» и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп». Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

Приступайте к измерениям.

3. Нажмите кнопку «Выбор» и установите начальную температуру газа  $T_1$ , указанную в таблице 1 для Вашей бригады.

**Таблица 1 Начальные значения температуры.**

<b>Вариант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
$T_1$ , К	50	70	100	120	140	160	180	220
$T_2$ , К	230	240	250	260	270	280	290	300
<b>Вариант</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
$T_1$ , К	60	80	110	130	150	170	190	210
$T_2$ , К	260	240	270	280	230	270	300	280

4. Запустите процесс, нажав кнопку «Старт». Останавливайте процесс, нажимая кнопку «Стоп», когда точка на теоретической адиабате (красная кривая) будет находиться **вблизи** следующих значений объема: 15, 20, 25, 30, 35 и 40  $\text{дм}^3$ , и записывайте при остановке в таблицу 2 значения объема, температуры и давления.
5. Установите значение температуры  $T_2$  из таблицы 1 для Вашего варианта и повторите измерения по п. 5, записывая результаты в табл 2.

**Таблица 2 Результаты измерений**

$T_1, \text{K}$						
$V_1, \text{дм}^3$						
$\ln V_1$						
$P_1, \text{кПа}$						
$\ln P_1$						
$T_2, \text{K}$						
$V_2, \text{дм}^3$						
$\ln V_2$						
$P_2, \text{кПа}$						
$\ln P_2$						

6. Постройте по результатам измерений графики зависимости  $p = f(V)$ ,  $p = f(T)$ ,  $V = f(T)$  для обоих адиабатических процессов.

7. Рассчитайте логарифмы давления и логарифмы объема. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей логарифма давления от логарифма объема для обеих адиабат, указав на них начальные температуры.

Для каждой адиабаты определите по графику значение показателя адиабаты, используя формулу:

$$\gamma = - \frac{\Delta(\ln p)}{\Delta(\ln V)}.$$

8. Определите число степеней свободы молекулы газа, исследуемого в данной компьютерной модели, используя формулу для показателя адиабаты, полученную в задании для допуска.

9. Подберите газ, структура молекул которого близка к структуре молекул исследуемого газа.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое параметры состояния системы?
2. Какой процесс называется обратимым?
3. Что такое уравнение состояния?
4. Для какого физического газа можно применить модель «идеальный газ»?
5. Напишите уравнение состояния идеального газа в двух видах?
6. Напишите основное уравнение молекулярно - кинетической теории газов.
7. Получите выражение для средней квадратичной скорости молекулы идеального газа.
8. Сформулируйте первое начало термодинамики и напишите его формулу.
9. Дайте определение теплоемкости тела и напишите ее формулу.

10. Дайте определение удельной теплоемкости и напишите ее формулу.
11. Выведите формулу для теплоемкости идеального газа при постоянном объеме, используя первое начало термодинамики.
12. Выведите формулу для теплоемкости идеального газа при постоянном давлении, используя первое начало термодинамики.
13. Что такое число степеней свободы? Чему оно равно для двухатомной молекулы?
14. Что такое показатель адиабаты?
15. Напишите формулу связи показателя адиабаты с числом степеней свободы молекулы идеального газа.
16. Дайте определение адиабатического процесса и напишите его уравнение.
17. Дайте определение изопротесса. Перечислите известные изопротессы.
18. Напишите уравнение и нарисуйте PV-диаграмму изотермического, изобарического и изохорического процесса.

## ЦИКЛ КАРНО

Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Термодинамика и молекулярная физика» и «Цикл Карно». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальная проверка уравнения состояния идеального газа.  
 Экспериментальное определение работы, совершённой газом за цикл.  
 Экспериментальная проверка теоремы Карно.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Термодинамическим процессом называется переход системы из одного состояния в другое. Такой переход всегда связан с нарушением равновесия системы.

♦ Термодинамическое равновесие – состояние системы, при котором температура и давление в любой точке системы одинаковы и не изменяются с течением времени.

♦ Равновесный или квазистатический процесс - процесс, состоящий из последовательности равновесных состояний. Бесконечно медленный процесс можно считать состоящим из последовательности равновесных состояний, т.е. равновесным

При изменении направления равновесного процесса (например, замене сжатия газа расширением) система будет проходить через те же равновесные состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Поэтому **равновесные процессы являются обратимыми**. Ясно, что все реальные процессы являются неравновесными и могут лишь в большей или меньшей степени приближаться к равновесным. В дальнейшем мы будем рассматривать только равновесные процессы.

Равновесное состояние системы изображают точкой на диаграмме процесса (нр. в координатах  $P$ - $V$ ), а обратимый процесс - сплошной линией. Необратимые процессы, протекающие между двумя равновесными состояниями, условно обозначаются штриховыми линиями.

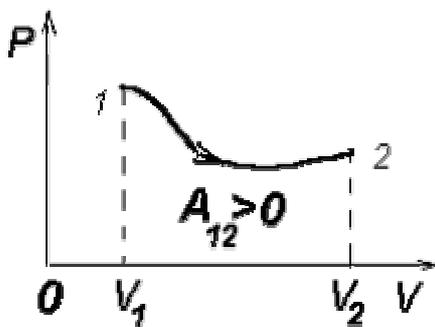


Рисунок 1.

♦ Работа газа  $A$  (Дж), совершаемая при изменении его объема:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV .$$

Графически работа определяется площадью под кривой процесса в координатах  $P$ - $V$

(рис.1). Работа не определяется только начальным и конечным состояниями газа, а зависит от пути, по которому идет процесс.

♦ **Круговой процесс или цикл** – это процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние.

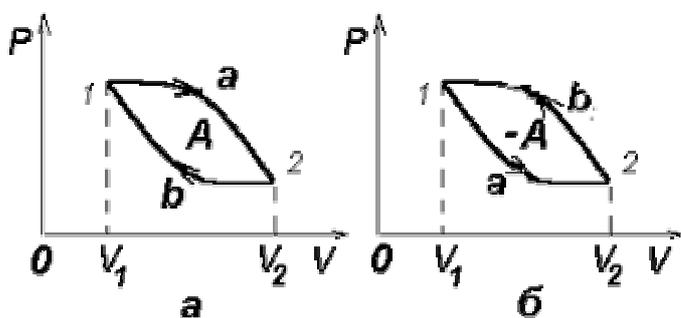


Рисунок 2

На диаграмме процессов цикл изображается замкнутой кривой. При расширении газ совершает положительную работу  $A_1$ , равную площади под кривой 1a2 (рис.2а), при сжатии газ совершает отрицательную работу  $A_2$ , равную по модулю площади под кривой 2b1 (рис.2а). Полная работа за цикл

$A = A_1 + A_2$  на диаграмме ( $P-V$ ) равна площади цикла.

Работа положительна  $A = \oint PdV > 0$ , если цикл обходится по часовой стрелке. Такой цикл называется **прямым**. Работа отрицательна  $A = \oint PdV < 0$ , если цикл обходится против часовой стрелки. Такой цикл называется **обратным**.

Круговые процессы лежат в основе действия тепловых двигателей и холодильных машин. Прямой цикл используется в **тепловых двигателях** - периодически действующих двигателях, совершающих работу за счет получения извне теплоты. Обратный цикл используется в **холодильных машинах** - периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

**Тепловой двигатель** превращает внутреннюю энергию топлива в механическую энергию (работу). **Тепловой двигатель** (рис. 3) состоит из **нагревателя** (котел, камера сгорания), **холодильника** (теплообменник, атмосфера) и **рабочего тела** (газ, пар).

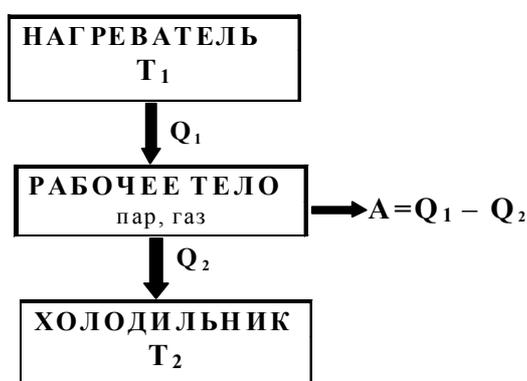


Рисунок 3

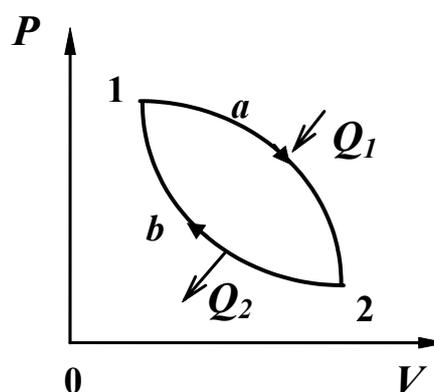


Рисунок 4

В рабочем цикле (рис.4) протекают следующие процессы:

- Рабочее тело получает от нагревателя теплоту  $Q_1$  при температуре  $T_1$ .
- Рабочее тело, расширяясь (процесс  $a$ ), совершает работу  $A_1$ .
- Для возвращения в начальное состояние, остаток теплоты  $Q_2$  рабочее тело отдает холодильнику при температуре  $T_2 < T_1$ .
- Внешние силы доводят температуру и давление рабочего тела до начальных значений, совершая над ним работу  $A_{BH} = -A_2$ . (процесс  $b$ ).

Полезная работа газового цикла  $A_n = A_1 - A_2$  численно равна площади цикла на диаграмме  $P-V$ .

При обходе цикла рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, следовательно, изменение его внутренней энергии равно нулю ( $\Delta U = Q - A = 0$ ). Согласно первому началу термодинамики, работа  $A_n$ , совершаемая рабочим телом за цикл, равна полученному за цикл количеству теплоты  $Q$ .

$$A_n = Q = Q_1 - Q_2.$$

Отношение работы  $A_n$  к количеству теплоты  $Q_1$ , полученному рабочим телом за цикл от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия  $\eta$  тепловой машины**.

♦ **КПД теплового двигателя**  $\eta$  определяется отношением полезной работы к затраченной:

$$\eta = \frac{A_n}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Коэффициент полезного действия также указывает, какая часть тепловой энергии, полученной рабочим телом от «горячего» теплового резервуара, превратилась в полезную работу. Остальная часть  $(1 - \eta)$  была «бесполезно» передана холодильнику. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы ( $\eta < 1$ ).

♦ **Цикл Карно** – идеальная модель кругового цикла.

**Цикл Карно** (рис. 5) состоит из двух изотерм (1–2 и 3–4) и двух адиабат (2–3 и 4–1).

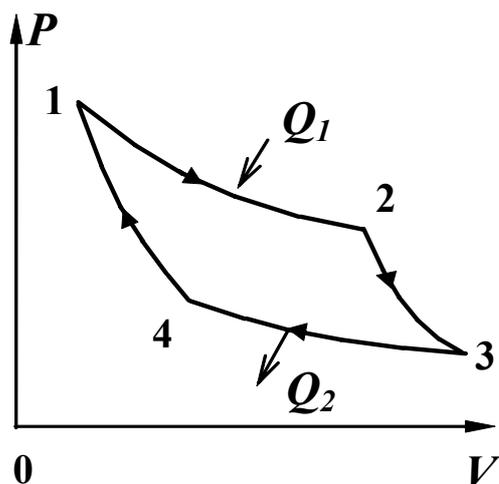


Рисунок 5

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

$$A_{12} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1$$

На участках 2–3 и 4–1 газ расширяется и сжимается адиабатически, не получая и не отдавая тепла. Количество теплоты  $Q_2$ , отданное газом холодильнику при изотермическом сжатии 3–4, равно работе сжатия  $A_{34}$ :

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

Тогда *КПД* цикла Карно

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

*КПД* цикла Карно, выраженный через температуры нагревателя и холодильника, называется *термическим КПД*

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Цикл Карно – наиболее эффективный круговой процесс из всех возможных при заданных температурах нагревателя и холодильника. Поэтому любая тепловая машина не может иметь *КПД* больше, чем машина, работающая по циклу Карно в том же температурном интервале, т.е.

$$\eta_{\text{реал}} \leq \eta_{\text{max}} = \eta_{\text{Карно}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

### ЗАДАНИЯ ДЛЯ ДОПУСКА:

1. Получите выражение для внутренней энергии некоторого количества идеального газа.

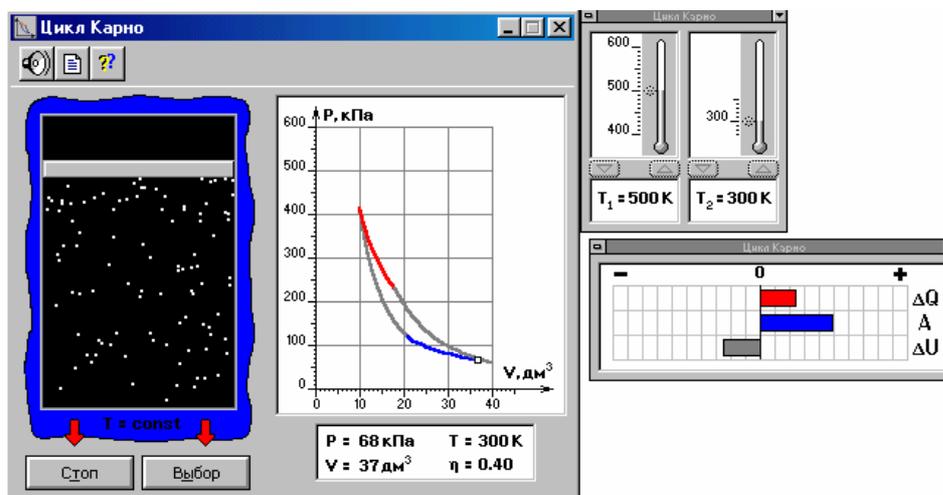
2. Используя уравнение Менделеева–Клапейрона, получите формулу для

вычисления работы при изотермическом процессе  $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ .

3. Получите выражение для термического к.п.д. цикла Карно.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

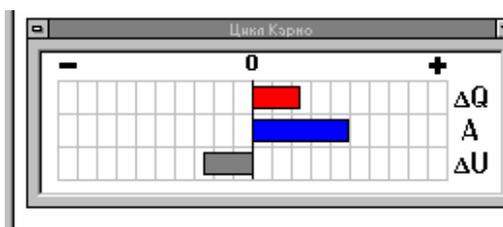
1. Запустите программу «Термодинамика и молекулярная физика», «Цикл Карно».



2. Попробуйте установить температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ . Для этого нажмите кнопку «ВЫБОР», переместите маркер мыши так, чтобы его остриё находилось на кнопках регуляторов термометров  $\nabla$  или  $\Delta$ . Последовательными короткими нажатиями на эти кнопки установите произвольные температуры нагревателя и холодильника.

3. Нажмите мышью кнопку «СТАРТ» и наблюдайте перемещение точки по замкнутой кривой цикла Карно. Серыми кривыми здесь показаны адиабатические процессы, красной – изотермическое расширение, синей - изотермическое сжатие.

Обратите внимание на окошко, в котором показано изменение работы, внутренней энергии газа и теплоты в процессе цикла Карно. Проследите, что в при изотермических процессах не меняется внутренняя энергия газа  $\Delta U$ , при адиабатических - количество теплоты  $\Delta Q$ .



**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

Приступайте к измерениям.

**ТАБЛИЦА 1. Значения температур нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$**

Номер задания	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	280	300	290	280
Номер	9	10	11	12	13	14	15	16

задания								
$T_1$	480	490	500	490	480	470	460	450
	580	590	600	590	580	570	560	550
$T_2$	350	340	330	320	310	300	290	280
	270	280	290	300	270	320	330	340

4. Установите любые температуры нагревателя и холодильника, соответствующие номеру вашего задания (таблица 1).

5. Запустите процесс, нажав кнопку СТАРТ. Остановите процесс нажатием кнопки СТОП вблизи произвольной точки. В нижнем прямоугольнике окна опыта будут показаны значения объема, давления и температуры в данной точке. Занесите их в таблицу 2.

6. Проведите аналогичные измерения для нескольких других точек на диаграмме процесса. Выбирайте точки, как на кривых адиабатических процессов, так и изотермических. Все результаты измерений занесите в таблицу 2.

**ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений параметров состояния газа в произвольных точках цикла Карно.**

	<i>АДИАБАТА</i>				<i>ИЗОТЕРМА</i>			
	1	2	3	4	5	6	7	8
$V, \text{дм}^3$								
$P, \text{кПа}$								
$T, \text{К}$								
$\nu, \text{моль}$								
$\langle \nu \rangle, \text{моль}$								
$PV$								
$\langle \nu \rangle RT$								

7. С помощью уравнения состояния идеального газа определите число молей газа  $\nu$ , находящихся в цилиндре под поршнем, для каждого набора параметров ( $P, V, T$ ) из таблицы 2.

8. Рассчитайте среднеарифметическое значение числа молей  $\langle \nu \rangle$ . Используя это значение, проверьте уравнение Менделеева – Клапейрона. Не забудьте перевести все единицы измерения в систему СИ!

9. Сделайте вывод.

10. Установите первые значения температур нагревателя и холодильника, соответствующие номеру вашего задания (таблица 1).

11. Запустите процесс. Остановите процесс в точке перехода изотермического расширения газа в адиабатическое (точка 1 на рис.5). Запишите в таблицу 3 значение объема  $V_1$ , которое в момент остановки процесса будет обозначено в нижнем прямоугольнике окна опыта.

12. Аналогичные измерения проведите для точек 2, 3, 4 (рис.5) и запишите значения объёмов  $V_2, V_3$  и  $V_4$  газа в соответствующие столбцы таблицы 3.

**ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений и расчетов.**

	$V_1$ дм <sup>3</sup>	$V_2$ дм <sup>3</sup>	$V_3$ дм <sup>3</sup>	$V_4$ дм <sup>3</sup>	$Q_1$ кДж	$Q_2$ кДж	$A$ кДж	$\eta$ %	$\eta_T$ %	$\eta_{mod}$ %
$T_1=$										
$T_2=$										
$T_1=$										
$T_2=$										
$T_1=$										
$T_2=$										
$T_1=$										
$T_2=$										

13. Прodelайте пункты 7 – 9 для трех других возможных комбинаций температур нагревателя и холодильника. Результаты опытов занесите в таблицу 3.

14. В последнюю колонку таблицы 3 запишите значение модельного к.п.д. цикла Карно  $\eta_{mod}$ , показанное в окне опыта.

15. Для каждого набора объемов ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ) рассчитайте величины полученной теплоты  $Q_1$ , отданной теплоты  $Q_2$  и совершенной работы  $A$ . Запишите эти значения в таблицу 3.

16. По формуле  $\eta = \frac{A}{Q_1}$  рассчитайте к.п.д. цикла Карно. Запишите эти значения в соответствующую колонку таблицы 3.

17. Рассчитайте термический к.п.д. цикла Карно  $\eta_T$ . Занесите его в таблицу 3.

18. Сравните между собой все три значения к.п.д.

19. Сделайте вывод.

**Письменно ответьте на следующие вопросы:**

1. Что такое термодинамические параметры? Перечислите основные термодинамические параметры и их единицы измерения.

2. Что такое идеальный газ? Запишите уравнение состояния идеального газа. Объясните смысл входящих в него величин.

3. Какие процессы называются изопроцессами? Перечислите их.

4. Изобразите графически в координатах ( $V, P$ ), ( $V, T$ ) и ( $P, T$ ) изопроцессы. Объясните, почему адиабата на диаграмме ( $V, P$ ) более крута, чем изотерма?

5. Как изменяется температура идеального газа при адиабатическом расширении? При адиабатическом сжатии?

6. Сформулируйте первое начало термодинамики. Поясните значение всех величин, входящих в него.

7. Запишите первое начало термодинамики его для изотермического, изобарического, изохорического и адиабатического процессов.

8. Дайте определение теплоёмкости тела, удельной и молярной теплоёмкости вещества.

9. Напишите уравнение Майера. Объясните, почему  $C_p$  всегда больше  $C_V$  для одного и того же газа. Объясните физический смысл универсальной газовой постоянной.

10. Напишите уравнение Пуассона для адиабатического процесса и выражение для коэффициента Пуассона.

11. Чему равен коэффициент Пуассона для идеальных одно-, двух- и многоатомных газов?

12. Что называется круговым процессом?

13. Поясните работу теплового двигателя.

14. Что понимают под циклом Карно? Чему равен к.п.д цикла Карно?

15. Может ли коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, быть равным 100 %? Пояснить.

16. Изобразите в системе координат  $(T-S)$  изотермический и адиабатический процессы и цикл Карно в целом.

**Выполните следующее дополнительное задание:**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1.** Дан газ массой  $m$ . Начальная средняя квадратичная скорость молекул  $u$ . Начальный объем газа  $V_0$ . Числовые значения  $m$ ,  $V_0$  и  $u$  приведены в таблице.

<b>Вариант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<i>Газ</i>	$O_2$	$O_2$	$O_2$	$O_2$	$CO_2$	$CO_2$	$CO_2$	$CO_2$
Масса газа $m$ (кг)	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,1</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>
Ср.-кв. скор. $u$ (м/с)	<b>400</b>	<b>420</b>	<b>440</b>	<b>460</b>	<b>480</b>	<b>500</b>	<b>520</b>	<b>540</b>
Нач. объем $V_0$ (м <sup>3</sup> )	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>
Постоянный параметр	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>T</b>	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>T</b>	<b>P</b>	<b>V</b>
Изменение параметра во втором состоянии	$\Delta T =$ <b>50K</b>	$\Delta T =$ <b>60K</b>	$\Delta V =$ <b>0.050м<sup>3</sup></b>	$\Delta T =$ <b>100K</b>	$\Delta T =$ <b>40K</b>	$\Delta V =$ <b>0.1м<sup>3</sup></b>	$\Delta T =$ <b>150K</b>	$\Delta T =$ <b>80K</b>
<b>Вариант</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<i>Газ</i>	$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$	$H_2O$	$H_2O$	$H_2O$	$H_2O$
Масса газа $m$ (кг)	<b>0,010</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>
Ср.-кв. скор. $u$ (м/с)	<b>400</b>	<b>410</b>	<b>420</b>	<b>430</b>	<b>440</b>	<b>450</b>	<b>460</b>	<b>470</b>
Нач. объем $V_0$ (м <sup>3</sup> )	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>
Постоянный параметр	<b>T</b>	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>T</b>	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Изменение параметра во втором состоянии	$\Delta V =$ <b>0.150м<sup>3</sup></b>	$\Delta T =$ <b>70K</b>	$\Delta T =$ <b>160K</b>	$\Delta V =$ <b>0.2м<sup>3</sup></b>	$\Delta T =$ <b>140K</b>	$\Delta T =$ <b>30K</b>	$\Delta V =$ <b>0.250м<sup>3</sup></b>	$\Delta T =$ <b>120K</b>

**Определить:**

- 1) количество вещества  $\nu$ ;
- 2) число молекул газа  $N$ ;
- 3) массу молекулы  $m_0$ ;
- 4) плотность газа  $\rho$ ;
- 5) концентрацию молекул;
- 6) начальное давление газа  $P_0$ ;
- 7) среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы  $\langle \varepsilon \rangle$ ;
- 8) начальную температуру газа  $T_0$ .

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 2.** В результате одного из изопроцессов (в соответствие с вашим вариантом) газ переходит в другое состояние (газ нагревают или расширяют).

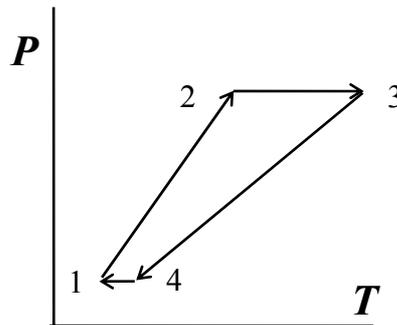
**Определить:**

- 1) тип процесса,
- 2) конечное давление  $P$ ,
- 3) конечную температуру  $T$ ,

- 4) конечный объем  $V$ ,
- 5) изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$ ,
- 6) работу газа  $\Delta A$ ,
- 7) количество полученной теплоты  $\Delta Q$ ,
- 8) теплоемкость процесса  $C$ .

◆ Дополнительные задачи:

1. Найти работу, совершаемую идеальным газом в количестве **2 моль** в процессе, изображенном на графике.  $P_2 = 5P_1$ ;  $T_4 = 2T_1$ ;  $T_1 = 280 \text{ K}$ .



2. В паровой турбине расходуется **0,35 кг** дизельного топлива на **1 кВт ч**. Температура поступающего в турбину пара **250°C**, температура холодильника – **30°C**. Чему равен фактический коэффициент полезного действия турбины? На сколько он отличается от коэффициента полезного действия идеального теплового двигателя, работающего при тех же температурных условиях?

3. Одноатомный идеальный газ совершает циклический процесс, состоящий из двух изохор и двух изобар. Изобразите график процесса в координатах  $(V, P)$ . Чему равен коэффициент полезного действия цикла, если  $P_{MAX} = 2P_{MIN}$  и  $V_{MAX} = 2V_{MIN}$ ?

## Список литературы.

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа -2003. 293с.
2. Грабовский Курс физики. М.: Высшая школа
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа.- 2005. 607с.
4. Яворский В.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М., 1990. 622с.

## НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g_0$	9.81	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6.02 \cdot 10^{23}$	$\text{моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	8.31	$\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	$m_e$	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

## ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	$10^1$
гекто	г	$10^2$
кило	к	$10^3$
мега	М	$10^6$
гига	Г	$10^9$
тера	Т	$10^{12}$

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	$10^{-1}$
санти	с	$10^{-2}$
милли	м	$10^{-3}$
микро	мк	$10^{-6}$
нано	н	$10^{-9}$
пико	п	$10^{-12}$

## ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ.

$\alpha$  - альфа,     $\beta$  - бета,     $\gamma$  - гамма,     $\Delta, \delta$  - дельта,     $\epsilon$  - эпсилон,  
 $\zeta$  - дзета,     $\eta$  - эта,     $\theta$  - тэта,     $\iota$  - нота,     $\kappa$  - каппа,  
 $\lambda$  - лямбда,     $\mu$  - мю,     $\nu$  - ню,     $\xi$  - кси,     $\omicron$  - омикрон,  
 $\pi$  - пи,     $\rho$  - ро,     $\Sigma, \sigma$  - сигма,     $\tau$  - тау,     $\phi$  - фи,  
 $\chi$  - хи,     $\Psi, \psi$  - пси,     $\Omega, \omega$  - омега .

Замкова Наталья Геннадьевна  
Кузовникова Людмила Александровна  
Денисова Елена Александровна  
Комогорцев Сергей Викторович

# **Ф И З И К А**

**Виртуальный лабораторный практикум**

**ЧАСТЬ 1. МЕХАНИКА  
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА  
ТЕРМОДИНАМИКА**

© Замкова Н.Г.  
© Кузовникова Л.А.  
© Денисова Е.А.  
© Комогорцев С.В.  
© Красноярский институт  
железнодорожного транспорта  
филиал ГОУ ВПО ИрГУПС в г.Красноярске

Редактор Н.Г.Замкова  
Компьютерная верстка Л.А. Кузовниковой  
Подписано в печать .  
Формат 60 × 84/16  
Бумага тип. № .  
Офсетная печать.  
Усл. печ. лист .  
Уч.-изд. л. 3,5.  
Заказ №  
Тираж 500 экз.  
Отпечатано на ризографе ООО «Принт»  
660062, г. Красноярск, ул. Высотная, 4