

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»  
Институт математики, информационных технологий и физики  
Кафедра общей физики

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К КОНТРОЛЬНЫМ  
И ЭКЗАМЕНАЦИОННЫМ СРЕЗАМ СТУДЕНТОВ ПО КУРСУ  
«МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»**

Учебно-методическое пособие



Ижевск  
2023

УДК 539.1(075.8)+536(075.8)  
ББК 22.2я73+22.36я73+22.317.1я73  
С232

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом УдГУ*

**Рецензент:** канд. физ.-мат. наук, профессор каф. теоретической и экспериментальной физики  
ФГБОУ ВО "УдГУ" П.Н. Крылов.

**Составители:** Гатауллина А.И., Новикова Т.А., Романов Э.А.

С232 Сборник материалов для подготовки к контрольным и экзаменационным срезам студентов по курсу «Механика. Молекулярная физика и термодинамика» : учеб.-метод. пособие. : [Электрон. ресурс] / сост. А.И. Гатауллина, Т.А. Новикова, Э.А. Романов. – Ижевск : Удмуртский университет, 2023. – 34 с.

Сборник по курсу «Механика. Молекулярная физика и термодинамика» предназначен для студентов естественнонаучного направления очной и заочной формы обучения.

В сборнике рассматривается краткий теоретический материал по основным разделам механики, молекулярной физики и термодинамики, подобраны качественные вопросы и задачи к темам лекционного курса, которые позволят студенту провести самоконтроль своей готовности по данной дисциплине при подготовке к контрольным и экзаменационным вопросам.

УДК 539.1(075.8)+536(075.8)  
ББК 22.2я73+22.36я73+22.317.1я73

© А.И. Гатауллина, Т.А. Новикова,  
Э.А. Романов, сост., 2023  
© ФГБОУ ВО «Удмуртский  
государственный университет», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
РАЗДЕЛ I. МЕХАНИКА .....	5
Тема 1. Кинематика и динамика поступательного движения.....	5
Тема 2. Кинематика и динамика вращательного движения.....	9
Тема 3. Работа. Энергия. Мощность.....	12
Тема 4. Законы сохранения в механике .....	15
РАЗДЕЛ II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА .....	19
Тема 5. Молекулярная физика .....	19
Тема 6. Термодинамика .....	27
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	34

## ВВЕДЕНИЕ

Сборник по курсу «Механика. Молекулярная физика и термодинамика» предназначен для студентов естественнонаучного и инженерного направлений очной, очно-заочной и заочной формы обучения.

Выпускник университета естественнонаучного и инженерного направлений обязан владеть одной из основных фундаментальных дисциплин – физикой. Твердо усвоить принципы и подходы к изучению естественных наук, обеспечивающие невиданный технический прогресс и резкое сокращение сроков между научными открытиями и их внедрением в жизнь.

Все это влечет к повышению требований, которые предъявляются к современному курсу физики в вузе. Эти требования находят свое выражение в обновлении материала по сравнению с традиционными курсами, в повышении научно-технического уровня и в использовании инновационных технологий.

Задача общей физики, не вдаваясь глубоко в подробности рассматриваемых теорий и не увлекаясь математикой, дать общее представление о физической картине мира, установить действующие в нем законы, изучить основные методы физических исследований и обозначить области применения этих законов и методов.

Цель сборника – помочь студентам освоить материал программы, научиться активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи и приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Учебное пособие представляет систематическое изложение основ классической механики на макроскопическом уровне, молекулярной физики и термодинамики. В конце каждой темы представлены качественные тесты, которые целесообразно использовать для текущего и итогового контроля знаний, а также для организации самостоятельной работы и самоконтроля студентов.

Задачи, предложенные в данном сборнике, можно разделить условно на две группы:

1) задания с выбором одного правильного ответа. В данных заданиях студент должен применить теоретические знания, по данной теме применив аналитическое и критическое мышление для решения описанного явления;

2) качественные задачи для решения, которых нужно предложить какие-то общие приемы или методы.

# РАЗДЕЛ I. МЕХАНИКА

## Тема 1. Кинематика и динамика поступательного движения

### Краткий теоретический материал

Механическое движение – это изменение положения тела в пространстве со временем. В рамках современной физики механическое движение изучается в рамках трёх физических теорий:

- а) классическая механика (И. Ньютон);
- б) теория относительности (А. Эйнштейн);
- в) квантовая механика (Э. Шредингер).

В рамках классической механики вводят удобные модели:

1) модель материальной точки – обладающее массой тело, размерами, формой, вращением и внутренней структурой которого можно пренебречь в условиях исследуемой задачи;

2) модель абсолютно-твёрдого тела – модельное понятие классической механики, обозначающее совокупность точек, расстояния между текущими положениями которых не изменяются, каким бы воздействием данное тело в процессе взаимодействия с другими твёрдыми объектами ни подвергалось (поэтому абсолютно твёрдое тело не изменяет свою форму и сохраняет неизменным распределение масс).

Механическое движение материальной точки рассматривается относительно системы отсчёта, которая включает в себя:

- тело отсчёта;
- декартовую систему координат;
- прибор для измерения времени.

Существует два способа описания механического движения:

а) координатный:  $x = f_1(t)$ ;  $y = f_2(t)$ ;  $z = f_3(t)$

б) векторный:  $\vec{r} = f(t)$

Радиус-вектор  $\vec{r}(t)$  связан с функциями изменения координат следующим образом:

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}, \quad (1)$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – единичные вектора вдоль осей  $ox$ ,  $oy$ ,  $oz$ .

Кинематические параметры, описывающие механическое движение материальной точки:

– путь ( $S$ ) – это длина траектории, которую описывает в пространстве материальная точка при своём движении.

– перемещение ( $\Delta\vec{r}$ ) – это вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории.

Для характеристики быстроты изменения пространственного положения движущегося тела вводят понятие линейной скорости.

$V_{cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$  – средняя скорость по пути;

$\vec{V}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$  – средняя скорость по перемещению.

$$\vec{V}_{мгн} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

$\vec{V}_{мгн}$  – мгновенная скорость, направлена по касательной в данной точке траектории

$$\vec{V}_{мгн} = V_x\vec{i} + V_y\vec{j} + V_z\vec{k} \quad (2)$$

Быстрота измерения линейной скорости с течением времени характеризуется ускорением.

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} - \text{среднее ускорение}$$

Мгновенное ускорение:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}, \quad (3)$$

где  $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}; \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}; \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}.$

Вектор ускорения характеризует изменение величины (тангенциальное ускорение)  $\vec{a}_\tau$  и направления (нормальное ускорение)  $\vec{a}_n$  ускорения.

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \quad (4)$$

Классификация механического движения:

- 1) прямолинейное равномерное движение  $a_\tau = 0, a_n = 0$
- 2) прямолинейное равнопеременное движение  $a_\tau = a, a_n = 0$
- 3) прямолинейное движение с переменным ускорением

$$a_\tau = f(t), a_n = 0$$

- 4) равномерное движение по окружности радиусом  $r$

$$a_\tau = 0, a_n = \frac{v^2}{r} = const$$

- 5) равномерное криволинейное движение  $a_\tau = 0, a_n \neq const$
- 6) равномерное криволинейное движение

$$a_\tau = const, \quad a_n \neq const$$

- 7) криволинейное движение с переменным ускорением

$$a_\tau = f(t), \quad a_n \neq const$$

Инерция – явление сохранения скорости тела при отсутствии действия на него других тел (т. е. покой или прямолинейное равномерное движение).

Инерциальные системы отсчёта – системы отсчёта, относительно которых тело движется равномерно прямолинейно или покоится, если на него не действуют другие тела.

Инертность – свойство тел, характеризующее их способность сопротивляться изменению их скорости под воздействием силы.

Динамические параметры поступательного движения:

– масса ( $m$ ) – скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертности тела, движущегося поступательно;

– импульс тела ( $\vec{p}$ ) – векторная физическая величина, определяющая запас механического движения.  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ ;

– сила ( $\vec{F}$ ) – мера воздействия одного тела на другое или действие одного поля на другое.

Сила характеризуется:

1. модулем;
2. направлением;
3. точкой приложения.

Сила может быть внутренней или внешней, консервативной или неконсервативной, динамической или статической.

Наиболее известные силы в механике:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}; \quad \vec{F}_{\text{сп}} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{r};$$

$$F_y = kx; \quad F_{\text{мп}} = \mu \cdot N;$$

$$F_{\text{арх}} = \rho \cdot g \cdot V \text{ и т. д.}$$

В 1687 г. в фундаментальной работе «Математические начала натуральной философии» И. Ньютон сформулировал 3 закона, которые являются ядром классической механики.

**Первый закон Ньютона.**

Существуют такие системы отсчёта (инерциальные), относительно которых тело покоится или движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.

В этом законе содержится постулат о существовании инерциальных систем отсчёта.

**Второй закон Ньютона** характеризует движение тела, на которое действуют другие тела (поля) и действие этих тел не скомпенсировано.

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}, \quad (5)$$

где  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n.$

Так как  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ ,  $m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$ ;  $\frac{d}{dt}(m \cdot \vec{v}) = \vec{F}$  или

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (6)$$

Если  $\vec{F} = f(t)$ , то

$$\vec{p} - \vec{p}_0 = \int_0^t \vec{F}(t) dt. \quad (7)$$

Формулы 5, 6, 7 представляют собой вариант записи второго закона Ньютона.

**Третий закон Ньютона** связывает силы, возникающие при взаимодействии 2-х тел.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (8)$$

Динамику движения тела переменной массы рассмотрим на примере движения ракеты при её запуске.

В момент времени  $t_0$  ракета имеет массу  $m$  и скорость  $\vec{v}$ , то есть  $\vec{p}_0 = m \cdot \vec{v}$ .

Через некоторое время  $dt$  масса ракеты будет  $m - dm$ , а скорость  $\vec{v} + d\vec{v}$ .

Образовавшийся при работе двигателя газ, имея массу  $dm$ , будет иметь скорость  $\vec{v} + \vec{u}$ , где  $\vec{u}$  – скорость истечения газов относительно ракеты.

Согласно второму закону Ньютона

$$d\vec{p} = \vec{F} \cdot dt, \quad (9)$$

где  $\vec{F}$  – равнодействующая внешних сил.

$$(m - dm) \cdot (\vec{v} + d\vec{v}) + dm(\vec{v} + \vec{u}) - m \cdot \vec{v} = \vec{F} \cdot dt$$

или

$$m \cdot d\vec{v} + \vec{u} \cdot dm = \vec{F} \cdot dt, \quad (10)$$

где учтено, что  $dm \cdot d\vec{v} \rightarrow 0$ .

Разделив правую и левую часть уравнения (10) на  $dt$ :

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{u} \frac{dm}{dt} = \vec{F} \quad \text{или} \quad m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \vec{u} \frac{dm}{dt}; \quad -\vec{u} \frac{dm}{dt} = \vec{F}_p,$$

$\vec{F}_p$  – реактивная сила

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \vec{F}_p. \quad (11)$$

Выражение (11) – уравнение В.И. Мещерского.

Если ракета движется прямолинейно и равномерно  $|\vec{V}| = \text{const}$ , а внешние силы  $F = 0$ ; то уравнение В.И. Мещерского переписывается:

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} &= -\vec{U} \frac{dm}{dt}, \\ m \cdot d\vec{V} &= -\vec{U} \cdot dm, \\ d\vec{V} &= -\vec{U} \frac{dm}{m} \quad \text{или} \quad \vec{V} = -\vec{U} \int_{m_0}^m \frac{dm}{m}, \\ \vec{V} &= \vec{U} \cdot \ln \frac{m_0}{m}. \end{aligned} \quad (12)$$

(12) – формула К.Э. Циолковского.

Из формулы 12 следует:

- 1) Чем больше конечная масса ракеты  $m$ , тем больше должна быть стартовая масса  $m_0$ .
- 2) Чем больше скорость истечения газов  $\vec{U}$ , тем больше скорость  $\vec{V}$  ракеты.

### Задания для самоконтроля

1. Если  $\vec{a}_r$  и  $\vec{a}_n$  – тангенциальная и нормальная составляющие ускорения, то соотношения:  $a_r = 0, a_n = 0$  справедливы для...

- 1) прямолинейного равномерного движения;
- 2) равномерного криволинейного движения;
- 3) равномерного движения по окружности;
- 4) прямолинейного равноускоренного движения.

2. Скорость прямолинейного движения материальной точки подчиняется закону  $v = 1 + 2t^2$  м/с. Кинематическое уравнение движения  $x(t)$  имеет вид:

- 1)  $x(t) = t + 2\frac{t^3}{3}$ ;
- 2)  $x(t) = 2t + 2t^2$ ;
- 3)  $x(t) = 4t$ ;
- 4)  $x(t) = 1 + 2t^2$ .

3. Скорость материальной точки изменяется по закону:  $v = 2 - 2t$  м/с. Путь, пройденный за 4 сек. от начала движения, равен...

- 1) 8 м;
- 2) 16 м;
- 3) 10 м;
- 4) 4 м.

4. По какой из нижеприведенных формул определяется ускорение свободного падения на некоторой высоте  $h$  от поверхности планеты? ( $R$  – радиус планеты;  $g_0$  – ускорение свободного падения на поверхности планеты).

- 1)  $g_0 \left( \frac{R}{R+h} \right)$ ;
- 2)  $g_0 \left( \frac{R}{R+h} \right)^2$ ;
- 3)  $g_0 \left( \frac{R+h}{R} \right)$ ;
- 4)  $g_0 \left( \frac{R+h}{R} \right)^2$ .



5. Камень бросили под углом к горизонту со скоростью  $V_0$ . При подъёме камня вверх по параболической траектории модуль тангенциального ускорения...

- 1)увеличивается;
- 2)уменьшается;
- 3)не изменяется.

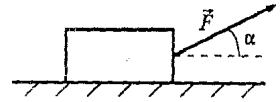
6. Камень бросили под углом к горизонту со скоростью  $V_0$ . При подъёме камня вверх по параболической траектории модуль нормального ускорения...

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

7. Закон движения материальной точки имеет вид:  $\vec{r} = 2t\vec{i} + (2 + 3t^2)\vec{j}$  Найти радиус-вектор  $r_0$  и его модуль-вектор  $|r_0|$  в момент времени  $t_0 = 0$  сек.

8. Закон движения частицы имеет вид  $\vec{r} = R\sin\omega t \cdot \vec{i} + R\cos\omega t \cdot \vec{j}$ , где  $R$  и  $\omega$  – некоторые положительные; постоянные. Найти уравнение траектории частицы.

9. Тело движется по горизонтальной плоскости под действием  $\vec{F}$  силы, направленной под углом  $\alpha$  к горизонту (см. рис.). Найти ускорение тела  $a$ , если его масса  $m$ , а коэффициент трения между телом и плоскостью равен  $\mu$ . При какой величине  $F_1$  силы движение будет равномерным?



10. Тело массой  $m$  движется под действием некоторой силы так, что зависимость пройденного им пути от времени описывается уравнением  $S = A\cos\omega t$ , где  $A$  и  $\omega$  – постоянные. Записать закон изменения силы от времени  $F(t)$ .

## Тема 2. Кинематика и динамика вращательного движения

### Краткий теоретический материал

Если твёрдое тело вращается относительно неподвижной оси, то любая точка вращающегося тела описывает в пространстве окружность с определённым радиусом  $r$ .

Поворот тела на некоторый угол  $\varphi$  можно задать в виде угла, величина которого равна  $\varphi$ , а направление совпадает с осью, вокруг которой производится поворот.  $\varphi$  образовано осью  $ox$  и радиусом, направленным в точку, в которой находится вращающееся тело.

Быстроту вращения определяет угловая скорость

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \quad (1)$$

Если  $\omega = const$ , то движение называется равномерным.

$$\omega = \frac{\varphi}{t}. \quad (2)$$

Для равномерного вращения вводят период ( $T$ ) и частоту ( $\nu$ ) вращения.  $T$  – время, в течение которого тело делает один полный оборот [с].  $\nu$  – число оборотов за 1 сек [Гц].

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu. \quad (3)$$

Связь между линейной скоростью  $V$  и  $\omega$ :

$$V = \omega \cdot r. \quad (4)$$

Вектор  $\vec{\omega}$  может изменяться как за счёт изменения скорости вращения тела вокруг оси, так и за счёт поворота оси в пространстве.

Быстроту изменения угловой скорости определяет угловое ускорение

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2 \vec{\varphi}}{dt^2} \quad (5)$$

В общем случае:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \\ a_\tau &= \varepsilon \cdot r \\ a_n &= \omega^2 \cdot r \end{aligned}$$

Динамическими параметрами вращательного движения являются:

$I$  – момент инерции;

$\vec{L}$  – момент импульса;

$\vec{M}$  – момент силы;

$I$  – это скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертности вращающегося тела. Зависит от распределения массы относительно оси вращения. Рассчитывается по формуле:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}. \quad (6)$$

При симметричном распределении массы относительно оси вращения суммирование заменяют интегрированием:

$$I = \int r^2 \cdot dm. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет получить выражения для определения момента инерции разных тел.

№п/п	Тело с симметричным распределением массы $m$ относительно оси симметрии	Момент инерции
1	Тонкое кольцо радиусом $R$ и тонкостенный цилиндр радиусом $R$	$I = m \cdot R^2$
2	Однородный сплошной цилиндр или диск радиусом $R$	$I = \frac{m \cdot R^2}{2}$
3	Сплошной шар радиусом $R$	$I = \frac{2}{5} m \cdot R^2$
4	Тонкий стержень длиной $l$ относительно оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно длине	$I = \frac{1}{12} m \cdot l^2$
5	Цилиндрическое кольцо или муфта с внешним радиусом $R$ и внутренним радиусом $r$	$I = \frac{1}{2} m \cdot (R^2 + r^2)$
6	Полый шар с внешним $R$ и внутренним $r$ радиусами	$I = \frac{2}{5} m \cdot \frac{(R^5 - r^5)}{R^3 - r^3}$

Для определения момента инерции  $I$  относительно оси, параллельной оси симметрии и находящейся на расстоянии  $a$ , используется теорема Гюйгенса-Штейнера:

$$I = I_0 + m \cdot a^2, \quad (8)$$

где

$I_0$  – момент инерции относительно оси симметрии,

$m$  – масса тел,

$a$  – расстояние между осями.

Момент импульса  $\vec{L}$  – это векторная физическая величина, определяющая запас механического движения при вращательном движении

$$\vec{L} = [\vec{p} \cdot \vec{r}] = I \cdot \vec{\omega}. \quad (9)$$

Момент силы

$$\vec{M} = [\vec{F} \cdot \vec{r}]. \quad (10)$$

Направление момента силы определяется правилом буравчика: вектор  $\vec{M}$  направлен по оси вращения в сторону поступательного движения буравчика, ручка которого вращается в направлении действия силы.

Уравнение динамики вращательного движения:

$$\vec{M} = I \cdot \vec{\epsilon}. \quad (11)$$

### Задания для самоконтроля

1. Две материальные точки одинаковой массы движутся с одинаковой угловой скоростью по окружностям радиусами  $R_1 = 2R_2$ . При этом отношение моментов импульса точек  $L_1/L_2$  равно:

- 1) 4;
- 2) 2;
- 3)  $1/4$ .

2. Диск и цилиндр имеют одинаковые массы и радиусы. Для их моментов инерции справедливы соотношения:

- 1)  $I_{\text{ц}} < I_{\text{д}}$ ;
- 2)  $I_{\text{ц}} = I_{\text{д}}$ ;
- 3)  $I_{\text{ц}} > I_{\text{д}}$ .

3. Диск и шар имеют одинаковые массы и радиусы. Для их моментов инерции справедливы соотношения:

- 1)  $I_{\text{ш}} < I_{\text{д}}$ ;
- 2)  $I_{\text{ш}} = I_{\text{д}}$ ;
- 3)  $I_{\text{ш}} > I_{\text{д}}$ .

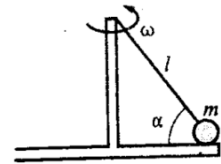
4. Диск и тонкостенный цилиндр имеют одинаковые массы и радиусы. Для их моментов инерции справедливы соотношения:

- 1)  $I_{\text{ц}} < I_{\text{д}}$ ;
- 2)  $I_{\text{ц}} = I_{\text{д}}$ ;
- 3)  $I_{\text{ц}} > I_{\text{д}}$ .

5. На экваторе некоторой планеты тело весит вдвое меньше, чем на полюсе. Плотность вещества этой планеты  $\rho = 3 \text{ г/см}^3$ . Определить период вращения  $T$  планеты вокруг своей оси.

6. Сплошной шар массой  $m$  и радиусом  $r$  вращается под действием некоторой силы так, что зависимость угла поворота от времени описывается уравнением  $\varphi = A \cos(\omega t)$ , где  $A$ ,  $\omega$  – постоянные. Записать закон изменения момента силы от времени  $M(t)$ .

7. Круглая платформа вращается вокруг вертикальной оси с угловой скоростью  $\omega$ . На платформе находится шарик массой  $m$ , прикрепленный с оси платформы нерастяжимой нитью. Угол наклона нити равен  $\alpha$ , длина нити равна  $l$ . Найти натяжение  $T$  нити и силу давления  $F_D$  шарика на платформу (рис.). Трением пренебречь.



8. Сплошной цилиндр массой  $m$  и радиусом  $r$  катится под действием некоторой силы так, что зависимость угла поворота от времени описывается уравнением  $\varphi = 8t + t^3$ . Записать закон изменения момента силы от времени  $M(t)$ .

9. Найти момент импульса сплошного шара радиусом  $r = 0,5$  м и массой  $m = 1$  кг в момент времени  $t = 2$  сек, если угол поворота  $\varphi = 2 + 4t^2$ .

10. Найти момент инерции стержня длиной  $l = 1$  м и массой  $m = 200$  г относительно оси, проходящей через конец стержня.

### Тема 3. Работа. Энергия. Мощность

#### Краткий теоретический материал

Причиной изменения механического движения являются силы, действующие со стороны других тел или полей. В этом случае говорят, что эти силы совершают работу:

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r}),$$

$$dA = |\vec{F}| \cdot |d\vec{r}| \cdot \cos\alpha, \text{ где } \alpha(\vec{F}, d\vec{r}),$$

$$|d\vec{r}| = ds,$$

$$F \cdot \cos\alpha = F_s$$

$$dA = F_s \cdot ds = F \cdot ds \cdot \cos\alpha$$

$$A = \int F_s \cdot ds, A[\text{Дж}]$$

Если  $F = \text{const}$  и  $\alpha = \text{const}$ , то  $A = F \cdot S \cdot \cos\alpha$ .

а)  $\alpha < \frac{\pi}{2}$        $A > 0$  – работа положительная;

б)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$        $A = 0$  – работа равна 0;

в)  $\alpha > \frac{\pi}{2}$        $A < 0$  – работа отрицательная.

Мощность характеризует быстроту совершения работы:

$$N = \frac{dA}{dt} [\text{Вт}]$$

Так как  $dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r})$ ,

$$N = \left( \vec{F} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = (\vec{F} \cdot \vec{V})$$

В механике встречается 2 вида механической энергии:

- 1) кинетическая;
- 2) потенциальная.

Кинетическая энергия – это энергия движущегося тела. При поступательном движении тела массой  $m$ :

$$T = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

При вращательном движении тела  $T_{\text{вп}} = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$ .

Рассмотрим теорему о кинетической энергии при поступательном движении.

Сила  $\vec{F}$  действует на тело массы  $m$  и совершает работу:

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r}) = \left( m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\vec{r} \right) = m \cdot (\vec{V} \cdot d\vec{V}); \text{ т. к. } \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V};$$

$$\cos 0 = 1, \text{ т.к. } \vec{V} \parallel d\vec{V};$$

$$dA = m \cdot V \cdot dV;$$

$$\int_0^A dA = \int_{V_1}^{V_2} m \cdot V \cdot dV; \quad A = \frac{m \cdot V_2^2}{2} - \frac{m \cdot V_1^2}{2}.$$

$A = \Delta T$  – Теорема о кинетической энергии при поступательном движении.

Рассмотрим теорему кинетической энергии при вращательном движении.

Для вращательного движения:

$$\vec{F} \sim \vec{M};$$

$$d\vec{r} \sim d\vec{\varphi};$$

Если вращение происходит относительно оси  $OZ$ , работа, совершаемая силой  $\vec{F}$ , будет определяться по формуле:

$$dA = M_z \cdot d\varphi; \quad M_z = I_z \cdot \varepsilon; \quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$$

$$dA = I_z \cdot \frac{d\omega}{dt} d\varphi = I_z \cdot \omega \cdot d\omega, \text{ т.к. } \frac{d\varphi}{dt} = \omega$$

$$\int_0^A dA = \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_z \cdot \omega \cdot d\omega = I_z \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega \cdot d\omega$$

$$A = \frac{I \cdot \omega_2^2}{2} - \frac{I \omega_1^2}{2} = T_2^{\text{вп}} - T_1^{\text{вп}}$$

$A = \Delta T_{\text{вп}}$  – Теорема о кинетической энергии для вращательного движения.

Потенциальная энергия ( $\Pi$ ) – это энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия. Пусть взаимодействие осуществляется посредством силовых полей, отличительной особенностью которых является то, что их работа не зависит от формы траектории, а определяется положением начальной и конечной точек траектории. В этом случае поле называется потенциальным, а силы консервативными.

$$dA = -d\Pi$$

$$(\vec{F} \cdot d\vec{r}) = -d\Pi$$

$$\vec{F} = F_x \cdot \vec{i} + F_y \cdot \vec{j} + F_z \cdot \vec{k}$$

$$d\vec{r} = dx \cdot \vec{i} + dy \cdot \vec{j} + dz \cdot \vec{k}$$

Тогда:

$$F_x = -\frac{\partial \Pi}{\partial x}; \quad F_y = -\frac{\partial \Pi}{\partial y}; \quad F_z = -\frac{\partial \Pi}{\partial z}$$

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}\Pi$$

$$\overrightarrow{\text{grad}}\Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \Pi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \Pi}{\partial z} \vec{k}$$

В таблице отразим связь между консервативной силой, соответствующей ей потенциальной энергией.

№ п/п	Сила $F$	Потенциальная энергия
1	$F = mg$	$\Pi = -m(\vec{g} \cdot \vec{r})$
2	$F = -kr$	$\Pi = \frac{k \cdot r^2}{2}$
3	$F \equiv G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	$\Pi = -G \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$

### Задания для самоконтроля

1. В потенциальном поле сила  $\vec{F}$  пропорциональна градиенту потенциальной энергии  $W_p$ . Если график зависимости потенциальной энергии  $W_p$  от координаты  $x$  имеет вид  $W_p = k \cdot x^2$ , где  $k$  – некоторая постоянная. Как выглядит зависимость  $F_x$  от  $x$ ?

- 1) прямая, параллельная оси  $x$  (выше оси  $x$ );
- 2) прямая, параллельная оси  $x$  (ниже оси  $x$ );
- 3) график  $F_x = k \cdot x$ ;
- 4) график  $F_x = -k \cdot x$ .

2. В потенциальном поле сила  $\vec{F}$  пропорциональна градиенту потенциальной энергии  $W_p$ . Если график зависимости потенциальной энергии  $W_p$  от координаты  $x$  имеет вид  $W_p = k \cdot x$ , где  $k$  – некоторая постоянная. Как выглядит зависимость  $F_x$  от  $x$ ?

- 1) прямая, параллельная оси  $x$  (выше оси  $x$ );
- 2) прямая, параллельная оси  $x$  (ниже оси  $x$ );
- 3) график  $F_x = k \cdot x$ ;
- 4) график  $F_x = -k \cdot x$ .

3. Сравнить кинетические энергии вращения сплошного шара и цилиндра, имеющие одинаковые массы, радиусы и вращающиеся с одинаковой угловой скоростью.

- 1)  $W_{\text{ц}} = W_{\text{ш}}$ ;
- 2)  $W_{\text{ц}} > W_{\text{ш}}$ ;
- 3)  $W_{\text{ц}} < W_{\text{ш}}$ .

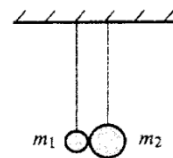
4. Во сколько раз отличаются кинетические энергии вращения сплошного цилиндрического тонкостенного шара, имеющие одинаковые массы, радиусы и вращающиеся с одинаковой угловой скоростью?

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 4;
- 3) 5.

5. Найти импульс и кинетическую энергию метеорита массой  $m = 1$  г, движущегося со скоростью  $v = 200$  м/с.

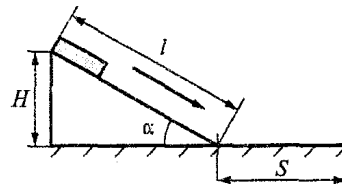
6. Какую работу совершает сила  $F = 100$  Н, направленная под углом  $\alpha = 60^\circ$  за 10 с, если скорость тела зависит от времени  $v = 2 + 2t^2$ ?

7. Два шарика, массы которых  $m_1 = 100$  г, подвешены на одинаковых нерастяжимых нитях длиной  $l = 50$  см (см. рис.). Первый шарик отклонили от положения равновесия на угол  $\alpha = 90^\circ$  и отпустили. На какую высоту  $h$  поднимутся шарик после удара, если удар абсолютно неупругий?



8. Ящик с песком, имеющий массу  $M$ , подвешен на нерастяжимом тросе длиной  $l$ . Длина троса значительно больше линейных размеров ящика. Пуля, масса которой  $m$ , летит в горизонтальном направлении, попадает в ящик и застревает в нем. Трос после падения пули отклоняется на угол  $\alpha$  от вертикали. Определить скорость  $V$  пули.

9. Брусок скользит сначала по наклонной плоскости длиной  $l = 42$  см и высотой  $H = 7$  см, а потом, пройдя по горизонтальной плоскости расстояние  $S = 142$  см, останавливается (см. рис.). Определить коэффициент трения  $\mu$ , считая его везде одинаковым.



10. Найти изменение импульса материальной точки массой  $m=1$  кг и скоростью  $v = 2$  м/с, вращающейся по окружности радиусом  $r=0,1$  м за четверть периода вращения.

## Тема 4. Законы сохранения в механике

### Краткий теоретический материал

Пусть механическая система, состоит из  $n$  тел. Изменение скорости движения каждого тела системы определяется действием внутренних  $\vec{F}'_i$  и внешних сил  $\vec{F}_i$ .

2-й закон Ньютона для каждого из тел. Для первого тела

$$\frac{d}{dt}(m_1 \vec{V}_1) = \vec{F}'_1 + \vec{F}_1,$$

где  $\vec{F}'_1$  – равнодействующая внутренних сил, действующих на первое тело,

$\vec{F}_1$  – равнодействующая внешних сил, действующих на первое тело.

Аналогично для других тел системы:

$$\frac{d}{dt}(m_2 \vec{V}_2) = \vec{F}'_2 + \vec{F}_2 \quad \frac{d}{dt}(m_n \vec{V}_n) = \vec{F}'_n + \vec{F}_n$$

После сложения левых и правых частей написанных выше уравнения получим:

$$\frac{d}{dt}(m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 + \dots + m_n \vec{V}_n) = \vec{F}'_1 + \vec{F}'_2 + \dots + \vec{F}'_n + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n \quad (1)$$

Согласно 3-му закону Ньютона:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}'_i = 0$$

Тогда (1) переписывается:

$$\frac{d}{dt}(m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 + \dots + m_n \vec{V}_n) = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i \quad \frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i,$$

$$d\vec{P} = \vec{F} \cdot dt, \quad (2)$$





Просуммируем левые и правые части уравнения (8):

$$\sum_{i=1}^n m_i (\vec{V}_i \cdot d\vec{V}_i) = \sum_{i=1}^n (\vec{F}_i' + \vec{F}_i) \cdot d\vec{r}_i = \sum_{i=1}^n \vec{f}_i \cdot d\vec{r}_i, \quad (9)$$

где  $\sum_{i=1}^n d\left(\frac{m_i V_i^2}{2}\right) = dT$ ,  $-\sum_{i=1}^n (\vec{F}_i' + \vec{F}_i) \cdot d\vec{r}_i = d\Pi$ ,  $\sum_{i=1}^n \vec{f}_i \cdot d\vec{r}_i = dA$ ;

где  $dA$  – работа неконсервативных сил.

$$d(T + \Pi) = dA,$$

$$\int_1^2 d(T + \Pi) = A_{12}$$

Для консервативных систем:

$$A_{12} = 0$$

$T + \Pi = E = \text{const}$  – закон сохранения механической энергии.

Примером применения законов сохранения импульса и энергии при решении реальной физической задачи является удар абсолютно упругих и неупругих тел.

Удар (или соударение) – столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время.

При ударе в телах возникают настолько значительные внутренние силы, что внешними силами можно пренебречь.

Т. о. возможно рассматривать соударение тела как замкнутую систему и применять к ней законы сохранения.

При ударе кинетическая энергия движения при соударении тел преобразуется в энергию упругой деформации. Происходит перераспределение энергии между соударяющимися телами.

Можно ввести величину  $\varepsilon$  – коэффициент восстановления.

$\varepsilon = \frac{V_n'}{V_n}$ , где  $V_n'$  – нормальная составляющая скорости после удара;

$V_n$  – нормальная составляющая скорости до удара.

$\varepsilon = 0$  соответствует абсолютно неупругому удару, а  $\varepsilon = 1$  – абсолютно упругому удару.

В качестве примера  $\varepsilon = 0,5$  соударение стальных шаров;

$\varepsilon = 0,89$  при соударении шаров, изготовленных из слоновой кости.

Удар центральный – тела движутся вдоль прямой, проходящей через центр масс.

Абсолютно упругий удар – во взаимодействующих телах не остается никаких деформаций.

При абсолютно упругом ударе выполняются законы сохранения импульса и механической энергии:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \vec{V}_1 + m_2 \cdot \vec{V}_2 &= m_1 \cdot \vec{U}_1 + m_2 \cdot \vec{U}_2, \\ \frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot V_2^2}{2} &= \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot U_2^2}{2}. \end{aligned}$$

При абсолютно неупругом ударе тела после соударения движутся вместе. Тогда закон сохранения импульса запишется:

$$m_1 \cdot \vec{V}_1 + m_2 \cdot \vec{V}_2 = (m_1 + m_2) \cdot \vec{V}$$

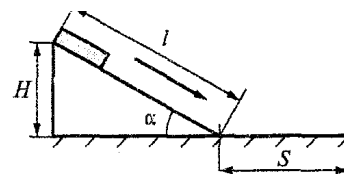
А изменения механической энергии можно рассчитать по формуле:

$$\Delta T = \left( \frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot V_2^2}{2} \right) - \frac{(m_1 + m_2)}{2} \cdot V^2$$

### Задания для самоконтроля

1. Для увеличения частоты вращения «волчком» фигурист прижимает руки к телу. Почему?
2. Тело массой 2 кг поднято над Землёй. Его потенциальная энергия 400 Дж. Если на поверхности Земли потенциальная энергия тела равна нулю и силами сопротивления воздуха можно пренебречь, скорость, с которой оно упадёт на Землю, составит...
  - 1) 20 м/с;
  - 2) 10 м/с;
  - 3) 40 м/с;
  - 4) 14 м/с.
3. Сплошной и полый цилиндры, имеющие одинаковые массы  $m$  радиусы, выкатываются без проскальзывания на горку. Если начальные скорости тел одинаковы, то...
  - 1) оба тела поднимутся на одну и ту же высоту;
  - 2) выше поднимется сплошной цилиндр;
  - 3) выше поднимется полый цилиндр.
4. Сплошной шар и полый цилиндр, имеющие одинаковые массы  $m$  радиусы, выкатываются без проскальзывания на горку. Если начальные скорости тел одинаковы, то...
  - 1) оба тела поднимутся на одну и ту же высоту;
  - 2) выше поднимется сплошной шар;
  - 3) выше поднимется полый цилиндр.
5. Пуля, летевшая горизонтально со скоростью  $V = 400$  м/с, попадает в брусок, подвешенный на нерастяжимой нити длиной  $l = 4$  м, и застревает в нем. Определить угол  $\alpha$ , на который отклонится нить с бруском, если масса пули  $m_1 = 20$  г и масса бруска  $m_2 = 5$  кг.
6. На бросание тела массой  $m$  под углом  $\alpha$  к горизонту затрачена энергия  $W$ . Определить, на каком расстоянии  $S$  и через какое время  $t$  тело упадет на землю.
7. Неупругие шары массами  $m_1 = 1$  кг и  $m_2 = 2$  кг движутся навстречу друг другу со скоростями соответственно  $V_1 = 1$  м/с и  $V_2 = 2$  м/с. Найти изменение кинетической энергии  $\Delta W_k$  системы после удара.

8. Брусок скользит сначала по наклонной плоскости длиной  $l = 42$  см и высотой  $H = 7$  см, а потом, пройдя по горизонтальной плоскости расстояние  $S = 142$  см, останавливается (см. рис.). Определить работу силы трения  $\mu$ , считая его везде одинаковым.



9. Тело массой  $m = 0.4$  кг соскальзывает без трения вниз по наклонному скату, переходящему в «мертвую петлю» радиусом  $R = 0.6$  м. Определить наименьшую высоту  $H$ , с которой тело должно начать движение, чтобы оно, не выпадая, сделало полный оборот.

10. Определить период  $T$  колебаний шарика, скользящего вниз и вверх по двум наклонным плоскостям (см. рис.). Начальная высота, на которой находится шарик,  $h$ ; углы наклона плоскостей  $\alpha$  и  $\beta$ . Трением и потерями скорости пренебречь.



## РАЗДЕЛ II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

### Тема 5. Молекулярная физика

#### Краткий теоретический материал

В основе статистической физики лежит молекулярно-кинетическая теория строения вещества, предполагающая следующие положения:

- газообразные, жидкие и твердые вещества состоят из большого числа атомов или молекул;
- атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотичном движении;
- все частицы взаимодействуют друг с другом.

Дадим понятия атомного и молекулярного веса.

**Атомным весом** химического элемента называется отношение массы атома этого элемента к  $1/12$  массы изотопа  $C^{12}$ .

**Молекулярным весом** ( $M_r$ ) называется отношение массы молекулы вещества к  $1/12$  массы изотопа  $C^{12}$ .

**Число Авогадро** – число атомов или молекул в моле любого вещества ( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ ).

**Молярная масса** ( $M$ ) – масса вещества, взятого в количестве одного моля.

$$M = m_0 \cdot N_A,$$

где  $m_0$  – масса молекулы вещества. Молярная масса имеет разное значение для каждого вещества, но всегда содержит одинаковое число молекул.

**Моль** ( $\nu$ ) – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (атомов, молекул, ионов, электронов и других частиц или специфицированных групп частиц), сколько содержится атомов в изотопе (нуклиде) углерода  $C^{12}$  массой 0,012 кг.

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M},$$

где  $N$  – число атомов вещества,  $m$  – масса вещества,  $M$  – молярная масса,  $N_A$  – число Авогадро.

**Концентрация вещества** ( $n$ ) – число молекул в единице объёма.

$$n = \frac{N}{V},$$

где  $V$  – объём, занимаемый веществом.

Для описания свойств газа в молекулярно-кинетической теории используют модель идеального газа. Под идеальным газом подразумевают следующее:

- молекулы газа имеют пренебрежимо малый объём;
- взаимодействие между молекулами пренебрежимо мало;
- столкновения молекул между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

**Термодинамическая система** – это ограниченная область пространства, занятая ее элементами. Элементы системы (подсистемы) считаются однородными. Граница системы может быть и физической (стенки сосуда), и мысленной. Все, что вне системы – окружающая среда.

**Равновесное состояние системы** – такое состояние системы, при котором в отсутствие внешних воздействий, т. е. в изолированной системе, все параметры системы приобретают определенные значения.

Состояния систем характеризуются функциями состояния.

**Параметры состояния системы** – это свойства, характеризующие однородные части системы. Для идеального газа параметрами являются четыре свойства: давление  $P$ , объём  $V$ , температура  $T$  и количества молей  $\nu$ , которые связаны между собой уравнением состояния идеального газа (Клапейрона-Менделеева):

$$pV = \nu RT,$$

где  $R = N_A \cdot k = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная.

Давление смеси идеальных газов подчиняется закону Дальтона, в соответствии с которым это давление равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i.$$

**Парциальное давление** – давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал этот объём при той же температуре.

Основное уравнение кинетической теории газов является важнейшим в молекулярно-кинетической теории, из которого можно вывести все газовые законы, получить соотношения между энергией молекул и температурой и т. д.:

$$p = \frac{1}{3} \cdot m_0 \cdot n \cdot \langle v \rangle^2,$$

где  $\langle v \rangle^2$  – средняя квадратичная скорость молекул.

**Термодинамический процесс** (или просто процесс) — это изменение состояния газа с течением времени. В ходе термодинамического процесса меняются значения макроскопических параметров – давления, объёма и температуры.

Интерес представляют **изопроцессы** — термодинамические процессы, в которых значение одного из макроскопических параметров остаётся неизменным.

При изотермическом процессе температура газа постоянна. В ходе процесса меняются только давление газа и его объём.

$$pV = \text{const}$$

Данное утверждение называется законом Бойля–Мариотта. График изотермического процесса называется изотермой. Изотермический процесс представлен на рис. 1 в различных диаграммах состояний.

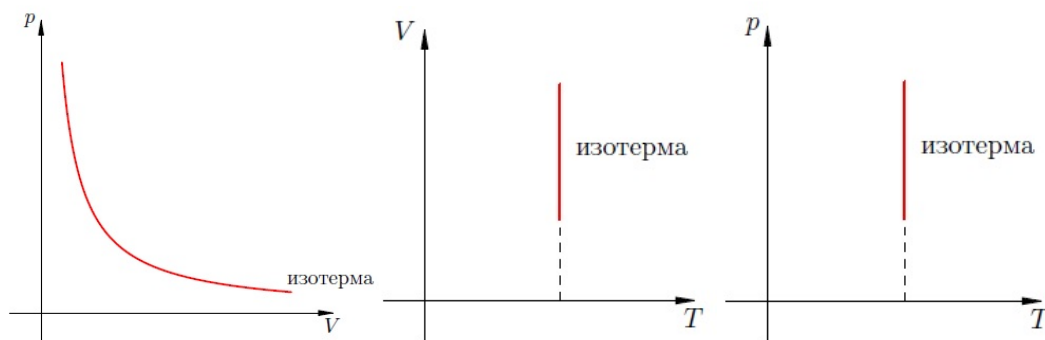


Рис. 1. Изотермы на  $pV$ ,  $VT$  и  $pT$ -диаграммах

**Изобарический** или **изобарный процесс** – термодинамический изопроцесс, происходящий в системе при постоянных давлении и массе газа. Согласно закону Гей-Люссака, при постоянном давлении отношение объема к температуре постоянно:

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

График изобарного процесса называется изобара. Изобарический процесс представлен на рис. 2 в различных диаграммах состояний.

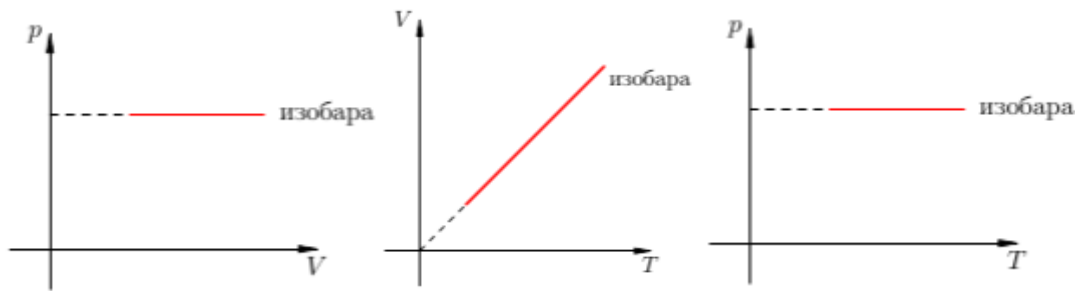


Рис. 2. Изобары на  $pV$ ,  $VT$  и  $pT$ -диаграммах

**Изохорическим процессом** называется процесс, происходящий при постоянном объеме. «Для данной массы газа при постоянном объеме отношение давления к абсолютной температуре остается величиной постоянной» – отображает закон Шарля:

$$\frac{p}{T} = const$$

Графически в различных системах координат процесс изображается изохорой (рис.3).

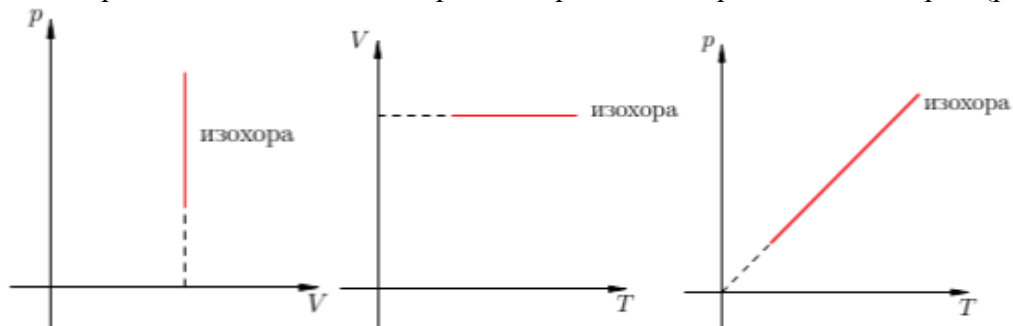


Рис. 3. Изохора на  $pV$ ,  $VT$  и  $pT$ -диаграммах

В решаемых задачах нормальными условиями принимаем температуру  $T=0^\circ\text{C}$ , давление  $P = 1 \cdot 10^5 \text{Па}$ .

Выражение для средней энергии молекулы газа учитывает только её среднюю энергию поступательного движения:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$$

Наряду с поступательным движением, молекула может вращаться и совершать колебания. Эти виды движения так же связаны с некоторым запасом энергии, которая определяется, пользуясь понятием статистической физики о равном распределении энергии по степеням свободы. Число независимых координат, необходимых для полного описания положения системы в пространстве, называется **числом степеней свободы** ( $i$ ).

Общее число степеней свободы в этом случае будет равно

$$i = i_n + i_{вр} + i_k$$

где  $i_n$  – число степеней свободы поступательного движения точки,

$i_{вр}$  – число степеней свободы вращательного движения точки,

$i_k$  – число степеней свободы колебательного движения точки.

Так, одноатомная молекула газа имеет только три степени свободы поступательного движения ( $i = 3$ ); двухатомная при упругой связи – шесть степеней свободы ( $i = 6$ ), а при жёсткой связи – пять степеней свободы ( $i = 5$ ); трёхатомная молекула при жёсткой связи между атомами имеет шесть степеней свободы ( $i = 6$ ).

«На любую степень свободы приходится в среднем одинаковая энергия, а молекула, обладающая  $i$  степенями свободы, будет обладать энергией  $\langle E_k \rangle = \frac{i}{2} kT$ ». Данное утверждение называют теоремой о равномерном распределении энергии по степеням свободы (**теорема Больцмана**).

**Эффективным диаметром молекулы** ( $d$ ) называется минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул. Эффективный диаметр несколько уменьшается при увеличении скорости молекул, т. е. с повышением температуры.

Величина  $\sigma = \pi \cdot d^2$  называется **эффективным сечением молекулы**.

**Средней длиной свободного пробега** ( $\lambda$ ) называется средний путь, проходимый молекулой между двумя последовательными столкновениями:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot n}$$

Средняя длина свободного пробега  $\lambda$  определяет такие свойства газов, как вязкость, теплопроводность и диффузия.

Явление диффузии состоит в самопроизвольном проникновении и перемешивании молекул соприкасающихся газов, жидкостей и даже твёрдых тел. В химически однородном газе перенос массы вещества происходит при наличии градиента плотности и подчиняется закону Фика:

$$M = -D \frac{d\rho}{dx} St$$

где  $M$  – масса вещества, диффундирующего за время  $t$  через площадку  $S$ , расположенную перпендикулярно градиенту плотности  $d\rho/dx$ ;  $D$  – коэффициент диффузии. Знак «минус» показывает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности. Коэффициент диффузии численно равен массе молекул, переносимых через единичную площадку за единицу времени при градиенте плотности молекул, равном единице.

Явление теплопроводности состоит в переносе количества теплоты в сторону убывания температуры. Этот процесс подчиняется закону Фурье:

$$Q = -k \frac{dT}{dx} St$$

где  $Q$  – количество теплоты, переносимое через площадку  $S$  за время  $t$  при градиенте температуры  $dT/dx$  в направлении нормали к этой площади;  $k$  – коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, переносимой через единицу площади за единицу времени при температурном градиенте, равном единице.

Вязкость (внутреннее трение) обусловлена возникновением сил трения между слоями газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными скоростями. Механизм возникновения внутреннего трения между слоями газа связан с обменом молекул между слоями, в результате которого происходит перенос импульса упорядоченного движения молекул из одного слоя в другой, что в свою очередь приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее.

Внутреннее трение подчиняется закону Ньютона:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $dv/dx$  – градиент скорости в направлении, перпендикулярном площадке  $S$ .

Скорости молекул группируются в основном вблизи некоторого наиболее вероятного значения. Впервые функцию распределения молекул по скоростям получил Максвелл в 1860 г.

Пусть  $N$  – общее число молекул, заполняющих сосуд,  $dN$  – число молекул, скорости которых заключены в интервале от  $v$  до  $v+dv$ , то функция распределения молекул по скоростям будет иметь вид:

$$f(v) = N \cdot 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \cdot v^2$$

Атмосферное давление на какой-либо высоте обусловлено весом вышележащих слоев газа, которое описывает барометрической формулой или распределением Больцмана:

$$p = p_0 \exp(-Mgh/RT),$$

где  $p_0$  – давление на высоте  $h_0$ ,  $p$  – давление на высоте  $h$ .

### Задания для самоконтроля

1. Газ считается идеальным, если можно пренебречь:
  - 1) взаимодействием молекул;
  - 2) размерами молекул;
  - 3) столкновением молекул;
  - 4) массой молекул.
  
2. При броуновском движении движение каждой частицы:
  - 1) является дискретным и зависит от яркости направленного на него света;
  - 2) вызвано не внешними воздействиями, а определяется только внутренними движениями, присущими самой жидкости;
  - 3) является следствием температурных разностей в жидкости и возникающих вследствие этого вихревых потоков.
  
3. Движение пылинок в солнечном луче:
  - 1) обусловлено броуновским движением;
  - 2) вызвано вихревыми потоками воздуха;
  - 3) обусловлено совместным действием беспорядочных ударов молекул среды и вихревыми потоками воздуха.
  
4. Распределение Больцмана можно записать в виде  $n = n_0 \cdot \exp(-U/kT)$ . Здесь  $n_0$  – концентрация молекул газа...
  - 1) в той точке, где потенциальная энергия молекулы принята равной нулю;
  - 2) при  $T=0$ ;
  - 3) в начальной точке системы координат.
  
5. Сливки на молоке быстрее отстаиваются в холодном помещении, так как при этом...
  - 1) меньше коэффициент взаимной диффузии молекул молока и масла;
  - 2) меньше интенсивность броуновского движения частичек масла;
  - 3) уменьшается обмен тепловой энергией между молекулами молока и масла, и более легкие молекулы масла легче попадают на поверхность.
  
6. Равновесный идеальный газ находится в однородном поле тяжести:  $p = p_0 \cdot \exp(-mgh/kT)$ . При этом давление  $p_0$  на «нулевом уровне» ( $h_0=0$ )...
  - 1) при повышении температуры увеличивается, так как энергия молекул увеличивается;
  - 2) при повышении температуры уменьшается, так как молекулы газа более равномерно распределяются по высоте;
  - 3) не меняется при изменении температуры, так как определяется весом всего газа.

7. Вещество находится в газообразном состоянии, если...

- 1) суммарная кинетическая энергия атомов и молекул много больше суммарной потенциальной энергии их взаимного притяжения;
- 2) суммарная кинетическая энергия атомов и молекул много меньше суммарной потенциальной энергии их взаимного притяжения;
- 3) суммарная кинетическая энергия атомов и молекул примерно равна суммарной потенциальной энергии их взаимного притяжения.

8. Идеальный газ совершает круговой процесс, изображенный на рис. 1:

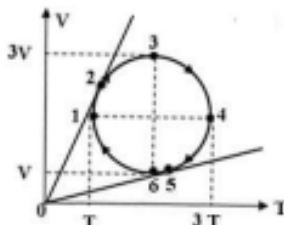


Рис. 1

При этом давление газа...

- 1) на участке 2-5 повышается, а на участке 5-2 – понижается;
- 2) на участке 2-5 понижается, а на участке 5-2 – повышается;
- 3) на участке 1-4 понижается, а на участке 4-1 – повышается.

9. Идеальный газ совершает процесс, изображённый на рис. 2 в координатах  $p(V)$ .

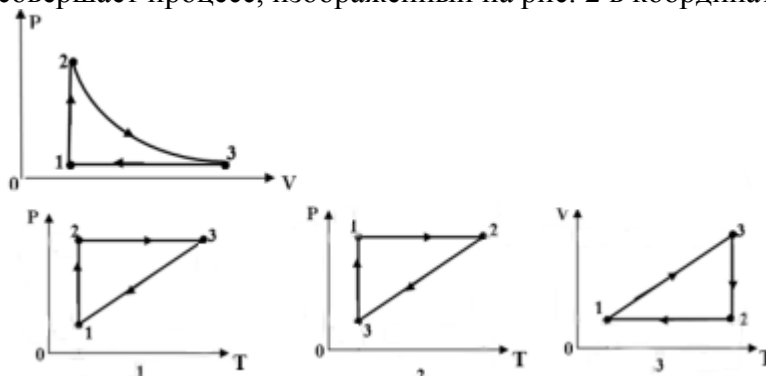


Рис. 2

В координатах  $p(T)$  или  $V(T)$  ему соответствует...

- 1) график 1;
- 2) график 2;
- 3) график 3.

10. Сила, выталкивающая из воды пузырёк воздуха, ...

- 1) увеличивается по мере его подъёма со дна на поверхность;
- 2) уменьшается по мере его подъёма со дна на поверхность;
- 3) при его подъёме со дна на поверхность не изменяется.

11. Идеальный газ расширяется по закону  $p = \alpha V^{n-1}$ , где  $\alpha$  и  $n$  – постоянные. При этом...

- 1) газ нагревается, если  $n > 0$ , и охлаждается, если  $n < 0$ ;
- 2) газ нагревается, если  $n > 1$ , и охлаждается, если  $n < 1$ ;
- 3) газ охлаждается при любом значении  $n$ , так как при расширении газ всегда охлаждается.



12. Температура идеального газа изменяется по закону  $T = \alpha V^n$ , где  $\alpha$  – постоянная. При расширении газа...
- 1) его давление увеличивается, если  $n > 0$ , и уменьшается, если  $n < 0$ ;
  - 2) его давление увеличивается, если  $n > 1$ , и уменьшается, если  $n < 1$ ;
  - 3) его давление уменьшается при любых значениях  $n$ .
13. Земная атмосфера существует...
- 1) только потому, что на молекулы воздуха действует сила тяжести;
  - 2) только потому, что на молекулы, находящиеся в непрерывном хаотичном движении, действуют межмолекулярные силы;
  - 3) только благодаря одновременному действию силы тяжести и межмолекулярных сил.
14. Среди приведенных формул к изотермическому процессу имеют отношение следующие:
- 1)  $0 = dU + \delta A$ ;
  - 2)  $A = RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$ ;
  - 3)  $A = \frac{m}{M} C_{MV}(T_1 - T_2)$ ;
  - 4)  $pV^\gamma = const$ .
15. Газ при температуре  $T=309$  К и давлении  $p=0,7$  МПа имеет плотность  $\rho=12$  кг/м<sup>3</sup>. Определить молярную массу газа.
16. В баллоне находится газ при температуре  $T_1=137$  °С. До какой температуры  $T_2$  следует нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 1,5 раза?
17. Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул кислорода ( $M=32$  г/моль) отличается от средней квадратичной скорости молекул водорода ( $M= 2$  г/моль) при одинаковой температуре?
18. Вычислить плотность воздуха ( $M=29$  г/моль) при температуре  $t=17$  °С и нормальном атмосферном давлении ( $p=100$  кПа).
19. Найдите число степеней свободы молекул идеального газа, если  $3/5$  энергии его теплового движения приходится на поступательное движение молекул.
20. Давление некоторой массы идеального газа изохорно уменьшилось в 2 раза. Как изменилась средняя энергия поступательного движения одной молекулы газа?
21. Сколько молекул воздуха находится в сосуде объемом  $V=480$  см<sup>3</sup> при температуре  $t=17$ °С и давлении  $p=25$  кПа?
22. В баллоне находится идеальный газ массой 16 г. Когда часть газа выпустили, а температуру газа в баллоне уменьшили в 2 раза, давление уменьшилось в 4 раза. Сколько газа выпустили?
23. В сосуде вместимостью  $V=0,3$  л при температуре  $T=290$  К находится некоторый газ. Насколько понизится давление газа в сосуде, если из него из-за утечки выйдет  $N=10^{19}$  молекул?
24. В сосуде находится масса  $m_1=14$  г азота ( $M=28$  г/моль) и  $m_2=9$  г водорода ( $M=2$  г/моль) при температуре  $t= 10$  °С и давлении  $p=1$  МПа. Найти объем сосуда.

25. Какова начальная температура газа, если в изохорном процессе при нагревании на  $\Delta T=200$  К давление газа возросло в 1,5 раза?

26. Баллон емкостью  $V=30$  л содержит смесь водорода и гелия при температуре  $T=300$  К и давлении  $p=8,2$  атм. Масса смеси  $m=24$  г. Определите массу  $m_1$  водорода и массу  $m_2$  гелия.

## Тема 6. Термодинамика

### Краткий теоретический материал

Термодинамический метод основан на анализе условий и количественных соотношений при различных превращениях энергии, происходящих в системе.

**Открытой системой** называется термодинамическая система, которая может обмениваться веществом с внешней средой, закрытая не может обмениваться веществом с внешней средой.

**Изолированная система** – система, которая не может обмениваться с внешней средой ни веществом, ни энергией.

**Адиабатная система** – система, не способная обмениваться энергией с окружающей средой посредством теплообмена.

**Внутренняя энергия тела** ( $U$ ) равна сумме кинетической энергии поступательного и вращательного движения молекул этого тела и потенциальной энергии их взаимного расположения:

$$U = E_k + E_{вр} + E_n$$

Внутренняя энергия идеального газа складывается из энергии поступательно-вращательного движения отдельных молекул:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$$

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры, массы и типа газа.

**Количеством теплоты** ( $Q$ ) называют меру энергии, передаваемую системе при теплопередаче без совершения работы. Элементарное приращение количества теплоты  $dQ > 0$ , если оно передаётся системе, и  $dQ < 0$ , если система отдаёт энергию.

Теплоемкость ( $C$ ) – это физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить веществу для нагревания его на один градус.

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

**Удельной теплоёмкостью** ( $c$ ) газа называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа для нагревания её на один градус.

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}$$

Кроме удельной теплоёмкости для газов вводится понятие молярной теплоёмкости.

**Молярной теплоёмкостью** ( $C_M$ ) называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молю газа, чтобы увеличить его температуру на один градус.

$$C_M = M \cdot c = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT}$$

Для газов вводятся в рассмотрение молярные теплоемкости при постоянном объёме ( $C_{MV}$ ) и при постоянном давлении ( $C_{Mp}$ ).

Если газ в количестве один моль нагревается при постоянном объёме, то подводимое к газу тепло идёт на увеличение его внутренней энергии. Следовательно, в этом случае изменение внутренней энергии газа при нагревании его на один градус будет равно молярной теплоёмкости.

$$C_{MV} = \frac{i}{2} R, \quad c_V = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}$$

При нагревании одного моля газа в условиях постоянного давления сообщаемое ему извне тепло идёт не только на увеличение его внутренней энергии, но и на совершение работы против внешних сил.

Данное уравнение называется уравнение Майера.

$$C_{Mp} = C_{Mv} + R \quad \text{или} \quad c_p = c_v + \frac{R}{M}$$

Очень часто для характеристики газа пользуются отношением, называемым показателем адиабаты.

$$\gamma = \frac{C_{Mp}}{C_{Mv}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i + 2}{i}$$

Если под действием силы  $F$ , с которой газ действует на подвижную стенку, последняя переместится на расстояние  $dx$ , то газ совершил работу

$$\delta A = p dV$$

Элементарная работа  $\delta A$  – не полный дифференциал, так как работа зависит не только от начального и конечного состояния системы, но и от формы пути, по которому система переходит из одного состояния в другое, а значит,  $A$  не является функцией состояния. Если газ расширяется, то  $dV > 0$ , и совершаемая им работа  $\delta A > 0$ , если сжимается – газ совершает отрицательную работу,  $\delta A < 0$ .

При расширении (сжатии) газа может изменяться не только объём, но и его давление. Поэтому, чтобы найти работу при конечном изменении объёма, нужно знать зависимость  $p(V)$ . Тогда работа определяется интегралом:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

который численно равен площади фигуры, ограниченной зависимостью  $p(V)$  (рис.4).

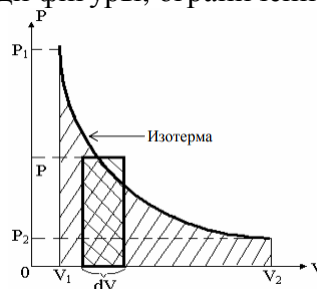


Рис. 4. Геометрическое нахождение работы

Закон сохранения энергии в области тепловых явлений называется **первым началом термодинамики**: теплота, сообщаемая системе, затрачивается на увеличение внутренней энергии системы и на работу, которую система совершает над внешней средой:

$$\delta Q = dU + \delta A$$

Применим первый закон термодинамики к различным процессам. **Изотермический процесс** – это процесс, протекающий при постоянной температуре ( $T = const$ ).

$$dQ = dA, \quad A = \nu RT \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

**Изобарический процесс** – это процесс, протекающий при постоянном давлении ( $p = const$ ).

$$dQ = dU + dA$$

**Изохорический процесс** – это процесс, протекающий при постоянном объёме ( $V = const$ ).

$$dQ = dU, \quad dU = C_{Mv} dT \quad \text{или} \quad \Delta U = C_{Mv} \Delta T$$

**Адиабатическим или адиабатным процессом** называют процесс, протекающий без теплообмена или почти без теплообмена с окружающей средой. Примером адиабатического процесса может служить быстро протекающий процесс сжатия или расширения газа.

$$pV^\gamma = \text{const}$$

Уравнения, связывающие давление и объем при адиабатическом процессе, называют уравнениями Пуассона.

**Круговым процессом** (циклом) называется такая последовательность превращений, в результате которой система, выйдя из какого-либо исходного состояния, возвращается в него вновь.

**Обратимым** называется такой процесс, который протекает так, что после его окончания систему можно вернуть в первоначальное состояние, причем никаких изменений в окружающей систему среде не произойдет.

Для характеристики эффективности цикла вводится в рассмотрение физическая величина, называемая **коэффициентом полезного действия**, равная отношению работы цикла к работе, которую можно было бы совершить при превращении в нее всего количества тепла, подведенного к системе

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

где  $Q_1$  – количество теплоты, переданное рабочему телу за цикл,  $Q_2$  – количество теплоты, переданное рабочим телом окружающей среде за цикл.

Наиболее совершенным в отношении КПД является цикл Карно, который состоит из двух изотерм и двух адиабат. КПД такого цикла определяется следующим образом:

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

где  $T_1$  – температура нагревателя,  $T_2$  – температура холодильника.

Цикл Карно обратим, что используется в холодильных машинах. В этом случае в результате совершения работы удастся перевести некоторое количество теплоты от тела более холодного к телу более нагретому. Коэффициент полезного действия холодильной машины (холодильника):

$$\eta' = \frac{1 - \eta}{\eta}$$

**Энтропия системы** – физическая величина, элементарное изменение которой при переходе системы из одного состояния в другое равно полученному или отданному количеству теплоты, деленному на температуру, при которой произошел этот процесс. Энтропия, подобно внутренней энергии, является однозначной функцией состояния системы:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \text{или} \quad \Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

Можно рассчитать изменение энтропии, если система совершает какой-либо изопроцесс:

– изотермический. Известно, что при изотермическом процессе  $T = \text{const}$ , т. е.  $T_1 = T_2$ , тогда

$$\Delta S = R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

– изобарический. Известно, что при изобарическом процессе  $p = \text{const}$ , т. е.  $V_2/V_1 = T_2/T_1$ , следовательно

$$\Delta S = C_{Mp} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = C_{Mp} \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

– изохорический. При изохорическом процессе  $V = \text{const}$ , т. е.  $V_2 = V_1$ . Таким образом,

$$\Delta S = C_{Mv} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

– адиабатический. Известно, что при адиабатическом процессе  $dQ=0$ , т. е.  $\Delta S=0$ , следовательно,  $S_1 = S_2 = const$ .

Установлено Больцманом, энтропия связана с термодинамической вероятностью системы  $W$  следующей формулой:

$$S = k \cdot \ln W$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

**Термодинамическая вероятность** ( $W$ ) – это число способов, которыми может быть реализовано данное состояние макроскопической системы. Чем больше число микросостояний, реализующих данное макросостояние, тем больше энтропия. В состоянии равновесия, т. е. наиболее вероятном состоянии, число микросостояний максимально, при этом максимальна и энтропия. Следовательно, энтропия является мерой неупорядоченности системы.

### Задания для самоконтроля

1. Два шарика одинаковой массы свинцовый и стальной. Падают с одинаковой высоты на песок. При этом:

1) больше нагреется тот шарик, теплоемкость материала которого меньше, т. е. свинцовый;

2) больше нагреется тот шарик, теплоемкость материала которого больше, т. е. стальной;

3) оба шарика нагреются одинаково, так как поскольку шарики падают с одинаковой высоты и массы их равны, то выделяются одинаковые количества теплоты.

2. Ниппель велосипедной камеры нагревается, когда мы накачиваем ее...

1) насосом;

2) от баллона со сжатым воздухом на станции техобслуживания;

3) как насосом, так и от баллона со сжатым воздухом на станции техобслуживания.

3. При постоянном давлении внутренняя энергия воздуха в комнате...

1) возрастает с повышением температуры, так как увеличивается кинетическая энергия молекул;

2) не зависит от температуры, если масса воздуха остается постоянной;

3) не зависит от температуры и объема комнаты.

4. При изотермическом расширении идеального газа работа совершается...

1) за счет уменьшения внутренней энергии окружающей среды;

2) за счет изменения его потенциальной энергии;

3) за счет изменения его внутренней энергии.

5. Расширение идеального газа в пустоту – это...

1) адиабатический процесс, так как тепло в этом процессе не подводится (теплообменом за малое время расширения можно пренебречь);

2) неравновесный процесс, газ расширяется свободно, не совершая работы над стенками сосуда, которые остаются неподвижными;

3) равновесный процесс, происходящий при очень медленном расширении газа без подвода тепла.

6. Теплоемкость многоатомных газов при высоких температурах...

- 1) не отличается от теплоемкости при низких температурах;
- 2) может увеличиваться из-за диссоциации молекул на атомы или ионы;
- 3) может проходить через максимум из-за вклада в теплоемкость колебательных степеней свободы.

7. Теплоёмкость газа

- 1) всегда положительна по определению: теплоёмкостью тела  $C$  называется количество теплоты  $Q$ , необходимое для повышения температуры тела на  $1\text{K}$ ;
- 2) может быть отрицательной, если работа, совершаемая газом, больше подводимого к газу тепла;
- 3) может быть отрицательной, если газ при совершении работы охлаждается.

8. В состоянии термодинамического равновесия при температуре  $T$  на одну колебательную степень свободы в соответствии с классическим законом равнораспределения приходится средняя энергия, равная...

- 1)  $\frac{1}{2}kT$ ;
- 2) средней энергии поступательной и вращательной степени свободы;
- 3)  $kT$ .

9. На рис. 5 приведен процесс над идеальным газом:

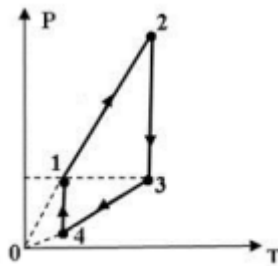


Рис. 5

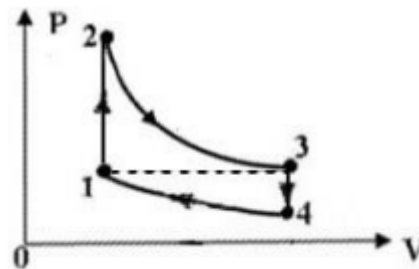


Рис. 6

В этом цикле:

- 1)  $\Delta U=0$ ;
- 2)  $Q=0$ ;
- 3)  $A=0$ .

10. На рис. 6 приведен процесс над идеальным газом, где 1-4 и 2-3 – изотермы. В этом цикле полная работа совершается...

- 1) за счет изменения внутренней энергии;
- 2) за счет полученной газом теплоты;
- 3) как за счет изменения внутренней энергии, так и за счет полученной газом теплоты.

11. На рис. 6 приведен процесс над идеальным газом, где 1-4 и 2-3 – изотермы. В этом цикле...

- 1) на участках 1-2 и 2-3 газ получает теплоту, а на участках 3-4 и 4-1 – отдает;
- 2) на участках 2-3 и 3-4 газ получает теплоту, а на участках 1-2 и 1-4 – отдает;
- 3) на участках 3-4 и 4-1 газ получает теплоту, а на участках 1-2 и 2-3 – отдает.

12. Основное термодинамическое тождество имеет вид:
- 1)  $TdS = dU + \delta A$ ;
  - 2)  $S_2 - S_1 + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} < 0$ ;
  - 3)  $\delta Q = dU + \delta A$ .
13. Неравенство Клаузиуса можно записать в виде:
- 1)  $S_2 - S_1 + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} < 0$ ;
  - 2)  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ ;
  - 3)  $\delta A < TdS - dU$ .
14. Как изменится внутренняя энергия идеального газа при повышении его температуры в 4 раза при неизменном объеме?
- 1) уменьшится в 4 раза;
  - 2) увеличится в 4 раза;
  - 3) не изменится;
  - 4) увеличится или уменьшится в зависимости от изменения давления.
15. Энтропия изолированной термодинамической системы при необратимом процессе...
- 1) не изменяется;
  - 2) возрастает;
  - 3) уменьшается.
16. Если термодинамическая система не изолирована, то энтропия...
- 1) всегда возрастает, так как отдает энергию окружающей среде;
  - 2) всегда уменьшается, так как любая система стремится к состоянию с наименьшей энергией;
  - 3) может как убывать, так и возрастая в зависимости от направления теплообмена.
17. При гашении пожаров...
- 1) кипятик гасит огонь быстрее, чем холодная вода, так как сразу отнимает от пламени теплоту парообразования и окружает огонь слоем водяного пара, затрудняющего доступ воздуха;
  - 2) холодная вода гасит огонь быстрее, так как помимо затрат тепла на парообразование она поглощает большое количество теплоты при нагревании до  $100^\circ\text{C}$ ;
  - 3) холодная вода и кипятик одинаково быстро гасят пламя.
18. Влажность воздуха в помещении летом...
- 1) выше, чем на улице, так как летом в комнате прохладнее;
  - 2) ниже, чем на улице, так как летом в комнате прохладнее;
  - 3) такая же, как и на улице.
19. Идеальный газ совершил работу, равную 200 Дж, и отдал количество теплоты, равное 200 Дж. При этом его внутренняя энергия на сколько изменилась?
20. Одному молю идеального газа сообщили 700 Дж тепла и его температура увеличилась на 50 К. Какую работу совершил газ?
21. Какую работу совершит воздух ( $M=0,029$  кг/моль) массой  $m=290$  г при изобарном нагревании на  $\Delta T=10$  К?



22. При изотермическом расширении массы  $m=0,01$  кг азота ( $M=28$  г/моль), находящегося при температуре  $t=17$  °С, была совершена работа  $A=869$  Дж. Во сколько раз изменилось давление азота при расширении?
23. Найти изменение энтропии аргона ( $M=40$  г/моль) массой  $m=8$  г при увеличении температуры в 2 раза. Процесс изохорный.
24. Объем гелия ( $M=4$  г/моль), масса которого  $m=40$  г, изотермически увеличился в четыре раза. Найти изменение энтропии.
25. Каково давление одноатомного идеального газа, занимающего объем 2 л, если его внутренняя энергия равна 300 Дж?
26. Изменение энтропии системы в результате некоторого процесса равно 3170 Дж/К. Определите логарифм отношения термодинамических вероятностей конечного и начального состояния системы.
27. Определите температуру  $T_1$  окружающей среды и количество отводимой из комнаты теплоты  $Q$ , если температура в комнате  $t_2=25$  °С, работа  $A$  холодильной установки с коэффициентом преобразования  $\eta=10$  равна 3 МДж за  $t=1$  ч.
28. КПД цикла Карно  $\eta=0,6$ , работа, совершаемая при изотермическом расширении  $A_{12}=10$  кДж. Найдите работу, совершаемую при изотермическом сжатии.
29. В стальном баллоне объемом  $V=1$  л находится азот, плотность которого  $\rho=2,8$  кг/м<sup>3</sup>. Азот нагрели на  $\Delta T=100$  К. Какое количество теплоты  $Q$  было при этом сообщено газу?
30. В цилиндре под поршнем находится воздух. На его нагревание при постоянном давлении было затрачено  $Q=5$  кДж теплоты. Найдите совершенную газом работу  $A$ . Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении равна  $c_p=10^3$  Дж/(кг К), масса 1 моля воздуха  $M=29$  г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник задач по физике: учеб. пособие для вузов / Р. Ц. Безверхняя [и др.] ; под общ. ред. Р. И. Грабовского. – Санкт - Петербург: Лань, 2002. – 126 с.
2. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики: Учеб.пособие для вузов / В.С. Волькенштейн. – 4-е изд., стер. – М.; Л.: Гос.изд-во физ.-мат.лит., 1963. – 455 с.
3. Сивухин, Д.В.Общий курс физики. В 4 т. Т. 1. Механика / Д.В. Сивухин. – 2-е изд., испр. – М.: Наука.1979. – 519с.
4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 4 т. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика / Д.В. Сивухин. – 3-е изд., испр., доп. – М.: Наука., 1990. – 591с.
5. Трофимова, Т.И. Курс физики. Задачи и решения: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. – 3-е изд., стер. – М.: Академия, 2010. – 590 с.
6. Трофимова, Т.И. Курс физики : учеб. для вузов / Т.И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – М.: Академия, 2010. – 557 с.
7. Физика. Сборник задач (с решениями). Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие / Ю.И. Тюрин [и др.]. – Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 174 с.
8. Сборник задач по физике : учеб. пособие рек. НЭС УрО РАН / Ю.А. Шихови [и др.]; ИжГТУ. – Ижевск: Удмурт. ун-т, 2005. – 164 с.

*Учебное издание*

**Составители:**

Гатауллина Ангелина Ивановна,  
Новикова Татьяна Алевтиновна,  
Романов Эдуард Аркадьевич

**Сборник материалов для подготовки к контрольным  
и экзаменационным срезам студентов по курсу  
«Механика. Молекулярная физика и термодинамика»**

*Авторская редакция  
Компьютерная верстка:*

Издательский центр «Удмуртский университет»  
426034, Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021  
Тел. : + 7 (3412) 916-364, E-mail: editorial@udsu.ru