

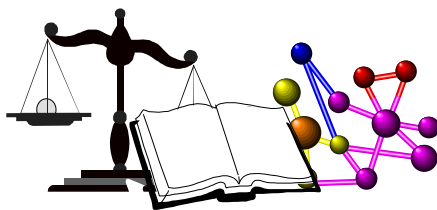
Елабужский государственный педагогический университет

Ф. М. САБИРОВА

ФИЗИКА

Часть 1.

**Механика. Молекулярная физика
и основы термодинамики.**



Елабуга – 2008

Печатается по решению редакционно-издательского совета Елабужского государственного педагогического университета (прот. №21 от 29.11.2007 г.)

УДК 553 (075)

ББК 22.3я7

С12

Кафедра общей физики

Рецензенты:

зав.кафедрой теоретической физики, канд. физ.-мат. наук, доцент
Хвалченко И.И.,

доцент каф. анатомии и физиологии Камского государственного института физической культуры, канд. биологических наук
Чернышева Ф.А.

Сабилова Ф.М. Физика. Часть 1. Механика. Молекулярная физика и основы термодинамики /Ф.М. Сабилова/Учебно-методическое пособие для студентов биологического факультета. – Елабуга: изд-во Елабужского пед. ун-та, 2008.– 70 с.

Предисловие.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для организации самостоятельной и аудиторной работы на лекционных и практических занятиях по курсу физики со студентами биологического факультета педагогического вуза. Оно подготовлено по разделам «Механика» и «Молекулярная физика» в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования для указанной специальности.

Материал распределен по основным темам, изучаемым в данных разделах физики: 1) кинематика материальной точки и вращательного движения твердого тела; 2) динамика, законы сохранения; 3) механические колебания и волны; 4) основы молекулярно-кинетической теории газов; 5) основы термодинамики; 6) свойства жидкостей и твердых тел. По каждой теме, во-первых, достаточно подробно приведен теоретический материал, позволяющий использовать пособие в качестве конспектов для подготовки к экзаменам или зачетам, во-вторых, набор задач для самостоятельного решения, позволяющий использовать пособие для организации практических занятий, а также для проведения письменных контрольных работ.

Пособие не исключает работу с учебниками и задачками для вузов, более того, ряд вопросов в него не вошли в связи с дефицитом аудиторного времени и ограниченными возможностями данного пособия. Например, такие темы, как механика твердого тела, движение в неинерциальных системах отсчета, реальные газы и др. предполагается в учебном процессе отвести на самостоятельное изучение или обсуждение на занятиях кружка.

МЕХАНИКА

Введение.

Предмет физики. Основная задача механики.

Мир представляет собой совокупность материальных объектов, находящихся в постоянном взаимодействии и непрерывном движении. Все, что нас окружает, называется материей. Это не только вещество (в твердом, жидком, газообразном состоянии), но вообще все, что находится вне нашего сознания. Например, силовые поля – поле тяготения, электромагнитное поле, поле ядерных сил – также являются различными формами материи. *Материя* познается через наши ощущения. Иногда восприятие материи может осуществляться не только непосредственно нашими органами чувств, но и с помощью различного вида приборов.

Всякое изменение материи называется *движением*. Оно понимается не только как механическое перемещение тел в пространстве, но и как всякий происходящий в природе процесс: физический, химический, биологический, общественный. Движение является формой существования материи. Движение материи может происходить только в пространстве и во времени.

Место расположения объектов материального мира составляет содержание понятия **пространства**. Длительность и последовательность изменения окружающего нас мира составляет содержание понятия **времени**. Материя не

может находиться вне пространства и времени, пространство и время являются взаимосвязанными формами существования материи. Для измерения пространства и времени вводятся единицы и величины длины и времени (в СИ 1 м 1 с соответственно).

Каждая наука занимается изучением определенных форм движения материи. Науки, изучающие разные формы движения, называются естественными. Физика – одна из естественных наук. «Физика» – по-гречески «природа», то есть физика изучает свойства окружающего нас мира, строение и свойства материи, законы взаимодействия и движения материальных тел. **Физика** занимается изучением физической формы движения материи, под которым понимают механическое, тепловое, электромагнитное, внутриатомное, внутриядерное движения. Соответственно формам движения физика делится на разделы: механика, молекулярная физика, электродинамика, оптика, квантовая физика. В этом семестре мы будем изучать механику.

Механика – это раздел физики, в котором изучается движение тел в пространстве и во времени. То, что механические явления протекают в пространстве и во времени, находит отражение в любом механическом законе. Изучая характер движения тел, мы тем самым познаем свойства пространства и времени.

Основная задача механики состоит в изучении различных движений и обобщении полученных результатов в виде законов движения, с помощью которых может быть предсказан характер движения в каждом конкретном случае. Решение этой задачи привело к установлению законов кинематики и динамики, а также к обнаружению законов сохранения энергии, импульса, момента импульса.

Тема 1. КИНЕМАТИКА

1. Механическое движение.

Кинематика – это раздел механики, изучающий движение тел без учета взаимодействия, то есть без учета причин, вызывающих это движение.

Механическое движение – изменение положения тела относительно других тел с течением времени. *Материальная точка* – это модель тела, размерами и формой которого можно пренебречь по сравнению с масштабами движения.

Любое движение твердого тела можно представить как комбинацию поступательного и вращательного движения. *Поступательное движение* – это движение, при котором любая прямая жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению. *Вращательное движение* – это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой *осью вращения*.

Движение тел происходит в *пространстве* и во *времени*. Поэтому для описания движения материальной точки надо знать, в каких местах пространства эта точка находилась и в какие моменты времени она проходила то или иное положение.

Тела отсчета – тела, относительно которых определяется или изучается положение данного движущегося тела. *Система отсчета* – это тело отсчета, связанная с ним система координат и способ измерения времени (часы). *Траектория* – линия, которую описывает материальная точка в пространстве при движении. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным и криволинейным. Расстояние, пройденное телом, с момента начала отсчета времени, называется *длиной пути*. Это длина траектории. Обозначения: $L, S, \Delta S$. Вектор, соединяющий начальное положение с последующим положением, называют *перемещением*. Обозначения: $\vec{S}, \vec{r}, \Delta \vec{r}$. Вектор, соединяющий некоторую фиксированную точку пространства с данной движущейся точкой, называется *радиус-вектором*.

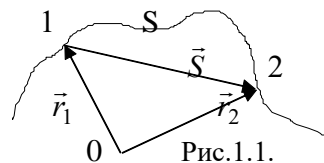


Рис.1.1.

$$\vec{r}_1 + \vec{S} = \vec{r}_2 \Rightarrow \boxed{\vec{S} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \Delta \vec{r}}$$

перемещение равно изменению радиуса-вектора. Если точку 0 совместить с точкой 1, то $\vec{r}_1 = 0, \vec{r}_2 = \vec{r} \Rightarrow \boxed{\vec{S} = \vec{r}}$

перемещение равно радиусу-вектору.

В декартовой системе координат, используемой наиболее часто, положение точки в данный момент времени по отношению к этой системе характеризуется тремя координатами x, y, z или радиусом-вектором. При этом проекции радиуса-вектора на оси системы отсчета эквивалентны координатам материальной точки x, y, z :

$$\boxed{\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)}$$

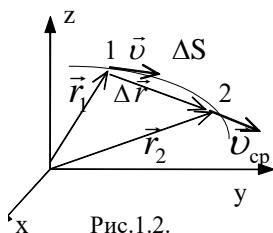


Рис.1.2.

При движении материальной точки ее координаты с течением времени изменяются. Уравнение движения материальной точки может быть задано 3-мя способами: а) координатный $x = x(t); y = y(t); z = z(t)$, б) векторный: $\vec{r} = \vec{r}(t)$ (эквивалентен координатному); в) траекторный (естественный) $S = S(t)$.

2. Скорость и ускорение

Введем понятие **скорости** материальной точки. Пусть за промежуток времени Δt материальная точка переместилась из точки 1 в точку 2 (см. рис. 1.2). *Средняя скорость* определяет путь, пройденный в единицу времени. Вектор перемещения $\Delta \vec{r}$ материальной точки представляет собой приращение радиуса-вектора \vec{r} за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$: $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$. Вектор средней скорости $\boxed{\vec{v}_{cp} = \Delta \vec{r} / \Delta t}$ совпадает по направлению с вектором $\Delta \vec{r}$.

Определим **вектор мгновенной скорости** (или вектор скорости) материальной точки как предел отношения $\Delta \vec{r} / \Delta t$ при $\Delta t \rightarrow 0$, то есть

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \text{ Это значит, что вектор скорости материальной точки в}$$

данный момент времени равен производной от радиуса-вектора \vec{r} по времени и направлен по касательной к траектории в данной точке в сторону движения материальной точки. Модуль вектора $|\vec{v}| = |d\vec{r} / dt|$.

Другим понятием, характеризующим движение точки, является **ускорение**. Ускорение – это физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости.

Среднее ускорение – это отношения изменения скорости ко времени, за которое это изменение произошло. Вектор среднего ускорения:

$$\vec{a}_{\text{cp}} = \Delta \vec{v} / \Delta t, \text{ где } \Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 - \text{вектор изменения скорости за промежуток времени } \Delta t. \text{ Переходя к пределу, получим вектор мгновенного ускорения:}$$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \text{ т.е. вектор ускорения материальной точки равен производной от скорости по времени. Направление вектора ускорения совпадает с}$$

направлением вектора $d\vec{v}$ (приращением вектора \vec{v} за время dt).

При использовании для описания движения прямоугольной декартовой системы координат положение материальной точки задается тремя координатами x , y , z . При движении точки эти координаты изменяются во времени и, следовательно ее движение описывается тремя уравнениями $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. В этом случае вектор скорости может быть разложен на три взаимно перпендикулярные компоненты: $\vec{v}_x = dx / dt$; $\vec{v}_y = dy / dt$; $\vec{v}_z = dz / dt$, причем

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \text{ а вектор ускорения – на компоненты:}$$

$$\vec{a}_x = d\vec{v}_x / dt; \vec{a}_y = d\vec{v}_y / dt; \vec{a}_z = d\vec{v}_z / dt, \text{ причем } a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

3. Кинематика материальной точки при прямолинейном движении.

Движение, при котором траектория – прямая линия, называется *прямолинейным* движением. При прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории и модуль перемещения равен пройденному пути, если направление движения не изменяется.

1) В случае прямолинейного *равномерного* движения тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения, то есть имеет постоянную скорость:

$$\bar{v} = \frac{\bar{s}}{t} = const; \quad \bar{s} = \bar{v}t; \quad \bar{a} = 0.$$

В проекции на ось OX:

$$v_x = \frac{x - x_0}{t} = const; \quad x = x_0 + v_x t; \quad a_x = 0$$

Графически равномерное движение может быть представлено на рис. 3.1. В случае, когда $v_x > 0$, направление движения совпадает с выбранным направлением оси x . Если $v_x < 0$, то скорость направлена в сторону, противоположную оси x .

2) Движение, при котором тело за равные промежутки времени совершает неодинаковые перемещения, называют неравномерным или переменным.

3) В случае прямолинейного равнопеременного движения скорость за любые равные промежутки времени изменяется одинаково:

$$\bar{a} = const; \quad \bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{a}t, \quad \bar{s} = \bar{v}_0 t + \frac{\bar{a}t^2}{2}.$$

В проекции на ось OX:

$$a_x = const; \quad v_x = v_{x0} \pm a_x t; \quad x = x_0 + v_{x0} t \pm \frac{a_x t^2}{2}$$

На рис. 3.2 изображены графики зависимостей $a(t)$, $v(t)$, $s(t)$ при равноускоренном ($a > 0$, случай a), равномерном ($a = 0$, случай b) и равнозамедленном ($a < 0$, случай $в$) движении.

Любое равномерное движение, происходящее с постоянной скоростью \vec{v} вдоль произвольной прямой АВ (рис.3.3), можно разложить на два независимых равномерных и прямолинейных движения вдоль осей OX и OY со скоростями v_x и v_y : $x = \pm x_0 \pm v_x t$, $y = \pm y_0 \pm v_y t$, где $v_x = v \cos \alpha$, $v_y = v \sin \alpha$.

Скорость тела в любой точке траектории $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ и направлена вдоль траектории движения.

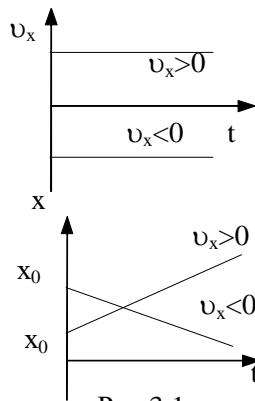


Рис.3.1

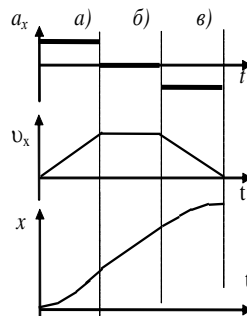


Рис.3.2.

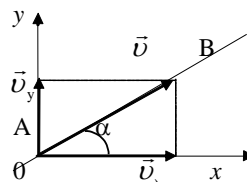


Рис.3.3.

4. Кинематика материальной точки при криволинейном движении. Вращательное движение.

Криволинейное движение – движение, при котором траектория – кривая линия. Если материальная точка движется по произвольной кривой, то эту кривую надо разбить на малые дуги и каждую из них совместить с дугой некоторой окружности. Каждая такая окружность называется окружностью кривизны, а радиус называется радиусом кривизны траектории в данной точке.

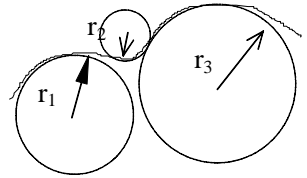


Рис.4.1.

Рассмотрим один из видов криволинейного движения – движение материальной точки по окружности.

1 случай: равномерное движение по окружности, когда скорость по величине является постоянной $|\vec{v}| = \text{const}$, но изменяется по направлению (см. рис.4.2). *Изменение скорости по направлению* характеризует нормальное

(центростремительное) ускорение:

$$a_n = \frac{v^2}{R}.$$

Вектор нормального ускорения направлен по радиусу к центру окружности.

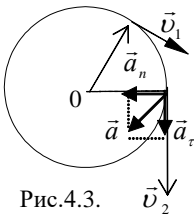


Рис.4.3.

2 случай. Скорость движущейся по окружности материальной точки изменяется по величине и направлению: $\vec{v}_1 \neq \vec{v}_2$. В этом случае ускорение определяется из соотношения: \Rightarrow

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau.$$

Первое слагаемое является нормальным ускорением,

второе $\vec{a}_\tau = \frac{d\vec{v}}{dt}$ – тангенциальное ускорение,

направленное по касательной к траектории. $\vec{a}_\tau \uparrow \vec{v}$ – если движение ускоренное; $\vec{a}_\tau \downarrow \vec{v}$ – если движение замедленное.

Таким образом, при криволинейном движении полное ускорение состоит из двух составляющих: нормальное ускорение \vec{a}_n – характеризуется изменением скорости по направлению; тангенциальное ускорение \vec{a}_τ характеризуется изменением скорости по величине.

Равномерное вращательное движение описывается углом поворота, угловой скоростью. Углом поворота называется угол φ , на который пово-

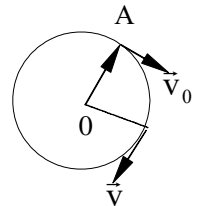


Рис.4.2.

рачивается радиус, соединяющий центр окружности с телом, движущимся по окружности.

Отношение угла φ поворота к промежутку времени, в течение которого совершается этот поворот при равномерном движении точки по окружности, называется угловой скоростью: $\omega = \frac{\varphi}{t}$

Отношение длины дуги окружности l , пройденной точкой, к промежутку времени, называют линейной скоростью v .

Связь угловой скорости с линейной скоростью:

$$l = R\varphi; \quad v = \frac{l}{t} = \frac{R\varphi}{t} = R\omega \Rightarrow \quad v = R\omega \quad \text{или} \quad \omega = \frac{v}{R}$$

Тогда центростремительное ускорение тела, равномерно движущегося по окружности: $a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R$.

Вращательное движение характеризуется периодом T и частотой обращения n . Промежуток времени, за который тело совершает один полный оборот, называется *периодом*.

$T = \frac{t}{N}$, где N – число оборотов, совершаемых телом за время t .

$$T = \frac{2\pi}{\omega}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad v = \frac{2\pi R}{T}; \quad a_n = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Число оборотов, совершаемых телом за единицу времени, называется *частотой обращения*.

$$n = \frac{N}{t}, \quad \text{или} \quad n = \frac{1}{T}. \quad \omega = 2\pi n; \quad v = 2\pi R n; \quad a = 4\pi^2 n^2 R.$$

ВОПРОСЫ

для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 1.

1. В чем заключается основная задача механики?
2. Что называют механическим движением?
3. Что изучает кинематика?
4. Какое движение называется поступательным?
5. Что такое материальная точка?
6. Что такое система отсчета?
7. Чем траектория отличается от перемещения?
8. Как движется точка при прямолинейном и равномерном движении?
9. Как называется движение, при котором тело за равные промежутки времени скорость меняется на одну и ту же величину?
10. Что характеризует ускорение?

10

11. Каковы единицы скорости и ускорения в СИ?
12. Как выглядит уравнение для координаты и вектора перемещения тела при равномерном прямолинейном движении?
13. Нарисовать график зависимости координаты от времени при равномерном прямолинейном движении.
14. Как выглядит уравнение равноускоренного прямолинейного движения тела в общем и координатном виде?
15. Нарисовать графики зависимости скорости от времени при равноускоренном и равнозамедленном прямолинейном движении.
16. Как направлен вектор мгновенной скорости при криволинейном движении и движении по окружности?
17. Что характеризует центростремительное ускорение?
18. Что характеризует тангенциальное ускорение?
19. Как меняется скорость при неравномерном криволинейном движении?
20. Что называют угловой скоростью и в каких единицах она выражается?
21. Как связаны линейная и угловая скорости при движении по окружности?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ 1.

Порядок решения задач по кинематике.

1. Прочитать условие задачи и выяснить характер движения.
2. Записать краткое условие задачи, выразив все величины в единицах СИ.
3. Сделать чертеж (при необходимости). На чертеже указать систему и начало координат, вектор скорости и ускорения.
4. Используя основные формулы кинематики, подобрать формулы, необходимые для решения данной задачи. Уравнения записать в проекциях на оси координат.
5. Найти искомую величину в общем виде и проверить размерность.
6. Вычислить искомую величину и проанализировать ответ.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 1

1.1. Автомобиль проехал по улице 400 м, затем свернул вправо и проехал еще 300 м по переулку. Считая движение автомобиля по улице и переулку прямолинейным, найдите путь автомобиля и его перемещение.

1.2. Уравнение движения тела дано в виде $x = 4 - 3t$. Определить начальную координату тела, скорость движения и перемещение тела за 2 секунды.

1.3. Поезд прошел первую половину пути со скоростью 72 км/ч, вторую половину пути – со скоростью 36 км/ч. Определите среднюю скорость поезда на всем пути.

1.4. Поезд шел первую половину времени движения со скоростью 36 км/ч, а вторую половину времени со скоростью 54 км/ч. Определите среднюю скорость движения поезда.

1.5. Уравнение движения материальной точки имеет вид $x = -0,2 t^2$. Какое это движение? Найти координату точки через 5 с и путь, пройденный ею за это время.

1.6. Уравнение скорости движущегося тела $v = 5 + 4t$. Написать уравнение перемещения $S(t)$ и описать характер движения, определить начальные условия.

1.7. Самолет для взлета должен иметь скорость 100 м/с. Определить время разбега и ускорение, если длина разбега 600 м; движение самолета считать при этом равноускоренным.

1.8. Тело, двигаясь горизонтально прямолинейно с ускорением 5 м/с, достигло скорости 30 м/с, а затем, двигаясь равнозамедленно, остановилось через 10 с. Определить путь, пройденный телом за все время движения.

1.9. Найти время падения и конечную скорость тела, свободно падающего с высоты 45 м.

1.10. Мальчик бросил мяч вертикально вверх с балкона дома. Определить координаты мяча через 1 с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с. Начальная скорость мяча 20 м/с. Систему отсчета связать с балконом. Определить скорость в конце каждой секунды.

1.11. Мальчик бросил горизонтально мяч из окна, расположенного на высоте 15 м. Сколько времени летел мяч до земли и с какой скоростью он был брошен, если мяч упал на расстоянии 5,3 м от основания дома?

1.12. Струя воды в гидромониторе вылетает из ствола со скоростью 50 м/с под углом 30° к горизонту. Найти дальность полета и наибольшую высоту подъема струи.

1.13. Определите модуль скорости и центростремительного ускорения точек земной поверхности на экваторе. Радиус Земли принять равным 6400 км.

1.14. Шкив делает 100 оборотов за 1 мин. Каковы частота вращения шкива и период вращения?

1.15. Каков радиус кривизны закругления дороги, если по ней автомобиль движется с центростремительным ускорением 2 м/с^2 при скорости 72 км/ч?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 1

1. Модели в механике.
2. Уравнение движения тел, движущихся в поле силы тяжести (брошенных горизонтально и под углом к горизонту)
3. Уравнение движения ускоренного вращательного движения. Связь между угловым ускорением и линейными величинами.

Тема 2. ДИНАМИКА. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ.

5. Законы Ньютона.

Динамика – раздел механики, в котором изучается механическое движение с учетом причин, вызывающих движение.

Основные понятия динамики – масса и сила.

Масса – физическая величина, характеризующая инертность тел. *Инертность* – это свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. В классической механике инертная масса считается постоянной и не зависящей от скорости движения. За единицу массы принят эталон – сплав платины и иридия, хранящийся в палате мер и весов в Париже:

$[m]=\text{кг}$. Масса – величина аддитивная $m_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n m_i$ и скалярная.

Сила – физическая величина, характеризующая действие одного тела на другое, в результате чего у тела изменяется скорость, то есть *появляется ускорение*, или происходит *деформация* тела, либо имеет место и то, и другое. В том случае, когда тело при взаимодействии получает ускорение, говорят о *динамическом* проявлении сил. В том случае, когда тело при взаимодействии деформируется, говорят о *статическом* проявлении сил. \vec{F} – векторная величина. $[F]=\text{Н}$ (Ньютон).

Первый закон Ньютона гласит: *существуют такие системы отсчета, относительно которых тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела или действие этих тел компенсировано.*

Система отсчета, которая может покоиться или двигаться только равномерно и прямолинейно (по инерции), называется *инерциальной*, а закон называют законом инерции.

Второй закон Ньютона – основной закон динамики поступательного движения – отвечает на вопрос, как изменяется механическое движение материальной точки (тела) под действием приложенных к ней сил.

Под действием некоторой силы тело приобретает ускорение. Если материальная точка (тело) испытывает действие нескольких сил, то оказывается, что ускорение, приобретенное телом, всегда прямо пропорционально равнодействующей или результирующей приложенных сил, при условии, что $m=\text{const}$, т.е. $\vec{a} \sim \vec{F}$ при $m=\text{const}$. (1)

где $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ – результирующая сила

При действии одной и той же силы на тела с разными массами их ускорения оказываются различными: $\vec{a} \sim 1/m$ при $\vec{F}=\text{const}$. (2).

Используя (1) и (2) и учитывая, что сила и ускорение – векторные величины, можно записать: $\vec{a} = K(\vec{F} / m)$, где K – коэффициент пропорциональ-

ности. В системе СИ $K=1$. Тогда:
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (3).$$

Это соотношение и выражает *второй закон Ньютона*: ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела).

Из второго закона получим размерность силы: $1H = 1кг \cdot 1(м / с^2)$.

Третий закон Ньютона определяет взаимодействие между материальными точками (телами). *Две материальные точки действуют друг на друга с силами, равными по модулю и направленными в противоположные стороны вдоль соединяющей эти точки прямой*: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, где \vec{F}_{12} – сила, действующая на первую материальную точку со стороны второй; \vec{F}_{21} – сила, действующая на вторую материальную точку со стороны первой.

Законы Ньютона в классической механике **применимы** для описания движения: а) макротел; б) для тел постоянной массы; в) при скоростях, значительно меньших скорости света.

6. Преобразования Галилея.

Механический принцип относительности.

В механике Ньютона все законы выполняются в инерциальных системах отсчета. Пусть имеем две инерциальные системы отсчета, одну из которых мы будем условно считать неподвижной (система K с осями декартовых координат x, y, z). Другая же система (система K' с осями декартовых координат x', y', z') пусть равномерно и прямолинейно движется со скоростью \vec{u} относительно первой (см. рис.6.1.).

Примем для простоты, что оси x и x' совпадают, а скорость относительного движения \vec{u} направлена вдоль оси x или x' . Пусть по часам наблюдателя в системе K прошло некоторое время t . В классической физике аксиоматически принимается, что такое же время регистрирует и наблюдатель в системе K' , т.е. $t = t'$ (1)

Если в момент времени, равный $t=0$, начало координат обеих систем совпадали, то за время t система K' переместится на расстояние, равное $\vec{u}t$. Пусть теперь в момент t' в системе K' в точке с координатами x', y', z' произошло событие – включение электрической лампочки. Координаты лампочки, измеренные в момент $t = t'$ наблюдателем в системе K , имеют значение x, y, z . Видно, что между координатами в системах K и K' легко устанавливается связь:

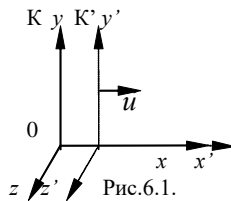


Рис.6.1.

$$x' = x - ut \quad (2)$$

$$y' = y \quad (3)$$

$$z' = z \quad (4)$$

Соотношения (1)-(4) называются преобразованиями Галилея Преобразования Галилея связывают координаты и время события в указанных двух инерциальных системах отсчета. В векторной форме:

$$t = t' \\ \vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по времени, получим классический закон сложения скоростей: $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$ или $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}$

Проидифференцируем его по времени и учтем, что $\vec{u} = \text{const}$. Получим:

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (6)$$

В классической механике считается, что масса тела не зависит от системы отсчета, то есть $m = m'$. Умножим обе части равенства (6) на m :

$$m\vec{a} = m\vec{a}' \quad \text{или} \quad \vec{F} = \vec{F}'$$

Таким образом, закон Ньютона не изменяется при переходе от системы К в систему К'.

На этом основании можно сформулировать **механический принцип относительности Галилея**: во всех инерциальных системах отсчета одни и те же механические явления протекают одинаковым образом, и никакими механическими опытами, проводимыми внутри данной инерциальной системы отсчета, невозможно установить, покоится система отсчета или движется равномерно и прямолинейно.

Физические величины и физические законы, не изменяющиеся при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, называются **инвариантами** (не изменяющимися) к преобразованиям Галилея.

7. Силы в природе.

В природе существует много разных видов сил: тяготения, тяжести, Лоренца, Ампера, взаимодействия неподвижных зарядов и т.д., но все они в конечном счете сводятся к небольшому числу фундаментальных (основных) взаимодействий. Современная физика считает, что существует в природе лишь четыре вида сил или четыре вида взаимодействий:

- 1) гравитационное взаимодействие (осуществляется через гравитационные поля);
- 2) электромагнитное взаимодействие (осуществляется через электромагнитные поля);
- 3) ядерное (или сильное) (обеспечивает связь частиц в ядре);
- 4) слабое (отвечает за процессы распада элементарных частиц).

В рамках классической механики имеют дело с гравитационными и электромагнитными силами, а также с упругими силами и силами трения.

Гравитационные силы (силы тяготения) – это силы притяжения, которые подчиняются закону всемирного тяготения. Любые два тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравитационная постоянная.

Сила тяжести – сила, с которой тело притягивается Землей. Под действием силы притяжения к Земле все тела падают с одинаковым относительно поверхности Земли ускорением \vec{g} , называемым ускорением свободного падения. По второму закону Ньютона, на всякое тело действует сила: $\vec{F} = m\vec{g}$, называемая силой тяжести. Она приложена к центру тяжести.

Вес – сила, с которой тело, притягиваясь к Земле, действует на подвес или опору. В отличие от силы тяжести, являющейся гравитационной силой, приложенной к телу, вес – это упругая сила, приложенная к опоре или подвесу. Сила тяжести $m\vec{g}$ равна весу только в том случае, когда опора или подвес неподвижны относительно Земли. По модулю вес \vec{P} может быть как больше, так и меньше силы тяжести \vec{F} . В случае ускоренного движения опоры (например, лифта, везущего груз) уравнение движения (с учетом того, что сила реакции опоры равна по величине весу, но имеет противоположный знак $\vec{P} = -\vec{N}$): $m\vec{g} - \vec{P} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$. Если движение происходит вверх $P = m(g + a)$, вниз: $P = m(g - a)$.

При свободном падении тела его вес равен нулю, т.е. оно находится в состоянии *невесомости*.

Силы упругости возникают в результате взаимодействия тел, сопровождающегося их деформацией. Упругая (квазиупругая) сила пропорциональна смещению частицы из положения равновесия и направлена к положению равновесия: $\vec{F} = -k\vec{r}$.

Силы трения возникают благодаря существованию сил взаимодействия между молекулами и атомами соприкасающихся тел. Силы трения: а) возникают при соприкосновении двух движущихся тел; б) действуют параллельно поверхности соприкосновения; г) направлены против движения тела.

Трение между поверхностями твердых тел при отсутствии какой-либо прослойки или смазки называется *сухим*. Трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой, а также между слоями такой среды называется *вязким* или *жидким*. Различают три вида сухого трения: трение покоя, трение скольжения и трение качения.

Сила трения покоя – это сила, действующая между соприкасающимися телами, находящимися в состоянии покоя. Она равна по величине и противо-

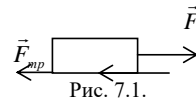
положно направлена силе, понуждающей тело к движению: $\vec{F}_{тр.п.} = -\vec{F}$; $(F_{тр.п.})_{\max} = \mu N$, где μ – коэффициент трения.

Сила трения скольжения возникает при скольжении одного тела по поверхности другого:

$F_{тр.ск} = \mu_{ск} N$ и направлена по касательной к трущимся поверхностям в сторону, противоположную движению данного тела относительно другого. Коэффициент трения скольжения $\mu_{ск}$ зависит от материала тел, состояния поверхностей и от относительной скорости движения тел.

При качении тела по поверхности другого возникает *сила трения качения*, которая препятствует качению тела. Сила трения качения при тех же материалах соприкасаемых тел всегда меньше силы трения скольжения. Этим пользуются на практике, заменяя подшипники скольжения шариковыми или роликовыми подшипниками.

Упругие силы и силы трения определяются характером взаимодействия между молекулами вещества, которое имеет электромагнитное происхождение, следовательно, они по своей природе имеют электромагнитные происхождения. Гравитационные и электромагнитные силы являются фундаментальными – их нельзя свести к другим, более простым силам. Упругие силы и силы трения не являются фундаментальными. Фундаментальные взаимодействия отличаются простотой и точностью законов.



8. Импульс тела. Закон сохранения импульса.

Соотношению для второго закона Ньютона можно придать другой вид, представив его в виде:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Пусть масса тела постоянна, поэтому можно внести ее под знак производной:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}). \quad (1)$$

Векторная величина численно равная произведению массы материальной точки на ее скорость и имеющая направление скорости, называется **импульсом** этой материальной точки: $\vec{p} = m\vec{v}$. Подставляя это выражение в (1), полу-

чим:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \quad (2)$$

Это выражение – более общая формулировка второго закона Ньютона: скорость изменения импульса материальной точки равно действующей на нее силе. Выражение (2) называется уравнением движения материальной точки.

В общем случае сила, действующая на тело, изменяется со временем и по величине, и по направлению. Но в течение элементарного промежутка времени

dt мы можем считать, что $\vec{F} = const$. Векторная величина, равная $d\vec{p} = \vec{F}dt$, называется *элементарным импульсом (силы)*. Следовательно:

$$\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \vec{F}\Delta t$$

Отсюда еще одна формулировка второго закона Ньютона: ***Изменение импульса тела равно импульсу действующей на него силы.***

Рассмотрим замкнутую систему тел, т.е. такую совокупность тел, которые взаимодействуют только между собой, но не взаимодействуют с телами, не входящими в состав этой системы. Пусть данная замкнутая система состоит только из двух взаимодействующих между собой тел, первоначально имевших скорости v_1 и v_2 соответственно. По третьему закону Ньютона силы, действующие на эти тела, будут равны по величине и противоположны по направлению, а время их взаимодействия t одинаково для обоих тел. Тогда изменение импульсов рассматриваемых тел за время t в результате их взаимодействия можно записать в виде:

$$m_1\vec{v}_1' - m_1\vec{v}_1 = \vec{F}t \quad m_2\vec{v}_2' - m_2\vec{v}_2 = -\vec{F}t$$

где штрихами обозначены скорости тел после взаимодействия. Складывая и преобразовывая оба равенства, получаем:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'$$

в системе из многих тел:

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$$

т.е. суммарный импульс рассматриваемой замкнутой системы тел до и после взаимодействия оказывается одним и тем же. Этот вывод, справедливый для любой замкнутой системы тел, называется **законом сохранения импульса: *при любом характере взаимодействия тел, образующих замкнутую систему, вектор полного импульса этой системы все время остается постоянным.*** Таким образом, импульс тела или системы тел может изменяться только под действием *внешних* сил.

Закон сохранения полного импульса изолированной системы – это универсальный закон природы. В более общем случае, когда система незамкнута, из формулы закона следует, что полный импульс незамкнутой системы не остается постоянным. Его изменение за единицу времени равно геометрической сумме всех внешних сил. Однако в некоторых случаях импульс незамкнутой системы также может сохраняться: а) Если система не замкнута, но $\vec{F}^{внеш} = 0$, то по закону сохранения импульса импульс системы не изменяется с течением времени: $\vec{p} = const$; б) Может оказаться, $\vec{F}^{внеш} \neq 0$, и $\vec{p} \neq const$, но $F_x^{внеш} = 0$ или $F_y^{внеш} = 0$. Тогда $p_x = const$ или $p_y = const$. Например, на систему действуют внешние силы, направленные вертикально, тогда $p_x = const$.

9. Работа и мощность.

Понятие механической работы было введено в практику в начале XIXв. в связи со все более широким использованием машин.

Под механической работой понимают работу, совершаемую силой \vec{F} , действующей на движущееся тело. Если тело, двигаясь прямолинейно, совершило перемещение \vec{s} , а действующая на тело сила \vec{F} оставалась при этом неизменной, то *механическая работа этой силы равна произведению модулей вектора силы и вектора перемещения на косинус угла между этими векторами*:

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

Единицей работы в СИ является **джоуль**: $[A]=\text{Дж}=\text{Н}\cdot\text{м}$. 1 Дж – работа, совершаемая силой 1 Н на 1 м пути. Работа является скалярной величиной и может иметь положительное или отрицательное значение в зависимости от знака косинуса угла α . Работа, совершаемая силой \vec{F} , положительна, если $\alpha < 90^\circ$. Если $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$, работа силы отрицательна. Если $\vec{F} \perp \vec{s}$, то $\cos \alpha = 0$, следовательно, и работа силы \vec{F} равна нулю.

Если тело движется не прямолинейно (изменяется направление вектора \vec{s}) или в процессе перемещения сила $\vec{F} \neq \text{const}$, тогда весь путь разбивается на бесконечно малые участки, где во всех точках каждого данного участка можно считать силу постоянной и по величине, и по направлению. *Работа силы* на таком участке:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F dr \cos \alpha,$$

где α – угол между направлениями элементарного перемещения $d\vec{r}$ и силы \vec{F} . В зависимости от значения α A может быть отрицательной, положительной или равной 0. Так как $|d\vec{r}| = ds$, то формулу для элементарной работы можно записать и в таком виде: $dA = F ds \cos \alpha = F_s ds$.

Суммируя элементарные работы, можно найти работу на любом протяжении траектории.

$$A = \int F_s ds.$$

Работа является аддитивной величиной. Если на тело действует несколько сил, то их полная работа равна работе, совершаемой равнодействующих этих сил.

При сравнении различных механизмов, совершающих работу, имеет смысл говорить не только о величине работы, но и величине времени, в течение которого работа совершается (то есть о скорости выполнения работы).

Мощностью называется физическая величина, равная работе, совершаемой в единицу времени. Это определение средней мощности: $N_{cp} = \frac{A}{t}$.

Перейдя к пределу, получим выражение для мощности:

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt} \Rightarrow \boxed{N = \frac{dA}{dt}}$$

$$dA = F dS \cos \alpha = F_s dS \Rightarrow N = \frac{d(F_s S)}{dt}$$

$$\text{Если } F_s = \text{const, то } N = F_s \frac{dS}{dt} = F_s v \Rightarrow \boxed{N = F_s v}$$

Мощность в данный момент времени равна произведению проекции силы на перемещение на скорость движения в этот момент. $[N]=\text{Дж}\cdot\text{с}=\text{Вт}$.

10. Механическая энергия и закон ее сохранения.

Энергией называется скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных видов движения материи, а также мерой перехода движения из одних форм в другие. Механическая энергия есть мера изменения энергии в различных процессах: $A = \Delta E$. Она характеризует способность тел совершать работу. В механике различают два вида энергии: потенциальную и кинетическую.

Кинетической энергией называют энергию, зависящую от скорости движения тела.

Пусть в начальной точке пути скорость стала равной v_1 , а в конечной точке пути v_2 . Выражение для второго закона Ньютона $m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$ умножим

$$\text{скалярно на } d\vec{r} = \vec{v} dt : \quad m \frac{d\vec{v}}{dt} \vec{v} dt = \vec{F} d\vec{r}.$$

Получим в правой части $\vec{F} d\vec{r} = dA$ – элементарно малая работа на малом участке dr . В левой части векторы \vec{v} и $d\vec{v}$ сонаправлены, то $d\vec{v} \cdot \vec{v} = dv \cdot v$. Тогда: $dA = mv \cdot dv$. После интегрирования получим работу A_{12} :

$$A = \int_{v_1}^{v_2} mv \cdot dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = E_{K2} - E_{K1}. \quad (1)$$

Работа, совершаемая силой при изменении скорости тела, равна изменению кинетической энергии этого тела. Отсюда вытекает формула, определяющая кинетическую энергию тела: $E_K = mv^2/2 + C$, где C – произвольная

постоянная. В классической механике принято $C=0$. Тогда:
$$\boxed{E_K = \frac{mv^2}{2}}$$

Энергия тела может быть связана не только с его движением. **Потенциальной** называется **энергия, зависящая от взаимного расположения тел или взаимодействия частей одного и того же тела.**

Потенциальной энергией обладают, в частности, тела, взаимодействующие между собой посредством **потенциальных** (или, по-иному, **консервативных**) сил, то есть таких сил, работа которых не зависит от вида траектории движения тела, а определяется только положением начальной и конечной точек траектории. *Работа в потенциальном поле, совершаемая по замкнутому пути, равна нулю.*

Например, работа в поле силы тяжести не зависит от траектории движения тела и равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в начальном и конечном положениях. $A = mg(h_1 - h_2)$

При движении вниз работа силы тяжести положительная. при движении вверх – отрицательна. Работа силы тяжести по замкнутой траектории равна нулю. Перепишем и преобразуем:

$$A = -mg(h_2 - h_1) = -(E_{p2} - E_{p1}), \text{ где } E_p = mgh.$$

Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком.

$$\text{Потенциальная энергия упруго деформированного тела: } E_p = kx^2 / 2.$$

Таким образом, *потенциальная энергия – это физическая величина, элементарное изменение которой равно (взятой со знаком минус) элементарной работе, совершаемой силами поля.* $A = E_{p1} - E_{p2} = -(E_{p2} - E_{p1})$ (2)

Отсюда вытекает, что физический смысл имеет лишь разность потенциальных энергий. Условимся считать, что когда тело находится на бесконечности ($r = \infty$), то его потенциальная энергия равна нулю. *Тогда под потенциальной энергией $E_p(r)$ следует понимать работу, совершаемую силами поля при перемещении тела из данной точки поля в бесконечность.*

Приравнявая правые части в соотношениях (1) и (2):

$$-(E_{p2} - E_{p1}) = E_{k2} - E_{k1},$$

приходим к результату:

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} = const \quad (3)$$

Назовем *полной механической энергией* величину: $E = E_p + E_k$.

Из (3) вытекает, что *полная механическая энергия тела при его перемещении вдоль любой траектории в потенциальном поле остается постоянной.*

Можно показать также, что изменение полной механической энергии в незамкнутой консервативной системе равно работе внешних сил.

$$\boxed{E_2 - E_1 = A_{\text{вн}}}$$

Если консервативная система замкнута, то внешние силы отсутствуют:
 $A_{\text{внеш}} = 0 \Rightarrow E_2 - E_1 = 0 \Rightarrow E_2 = E_1 \quad E = const.$

$$\boxed{E_p + E_k = const}$$

закон сохранения энергии замкнутой консервативной системы:

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих между собой посредством потенциальных сил, остается неизменной при любом движении этих тел.

Если система подвергается действию неконсервативных (диссипативных) сил, механическая энергия убывает, переходя в другие виды энергии (например, тепловую при действии сил трения). Но в целом энергия остается постоянной.

Согласно всеобщему закону сохранения и превращения энергии уменьшение или увеличение полной механической энергии системы в точности компенсируется увеличением или уменьшением какого-либо другого вида энергии. Энергия никуда не исчезает и не появляется вновь, а лишь переходит от одного тела к другому или превращается из одного вида в другой.

11. Механика твердого тела

Теперь мы будем рассматривать движение такого тела, при котором существенную роль играют его размеры и форма, и поэтому тело нельзя рассматривать как материальную точку.

Введем основные величины применительно к простому случаю вращения твердого тела вокруг неподвижной оси. Пусть внешние силы, приложенные к разным точкам тела, лежат в плоскостях, перпендикулярных оси вращения. Будем считать, что при вращении трение пренебрежимо мало. Разобьем тело на столь малые элементы, чтобы их можно было бы считать материальными точками. Пусть на i -ю материальную точку массой m_i и радиуса-вектора \vec{r} , действует внешняя сила \vec{F}_i под углом α_i к направлению радиуса вектора. Величина, равная векторному произведению радиуса-вектора материальной точки на вектор силы, называется **моментом силы** относительно заданной оси вращения:

$$\vec{M}_i = [\vec{r}_i \vec{F}_i] \quad (1).$$

Вектор \vec{M}_i направлен вдоль оси вращения. С помощью правила буравчика определяют, в какую именно сторону вдоль оси он направлен. Размерность $[M]=\text{Н}\cdot\text{м}$.

Из (1) вытекает, что $M_i = F_i r_i \sin \alpha_i$. Продолжим линию силы и найдем плечо силы $l = r_i \sin \alpha_i$, тогда модуль момента силы: $M_i = l \cdot F_i$. определяется как произведение силы на плечо.

Если внешние силы приложены к нескольким точкам тела, то результирующий или полный момент относительно оси вращения равен алгебраической сумме моментов каждой из сил относительно той же оси.

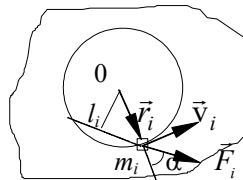


Рис.11.1

$M = \sum_k M_k$. Например, на рис.11.2. результирующий момент: $M = M_1 - M_2 + M_3$.

Введем определение момента инерции тела относительно данной оси вращения. **Момент инерции** тела относительно оси вращения определяется как сумма моментов инерции материальных точек, составляющих тело.

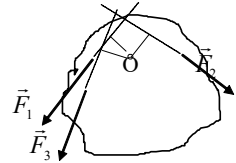


Рис.11.2.

Момент инерции материальной точки m_i определяется как величина, численно равная произведению массы на квадрат расстояния точки до оси вращения: $I_i = m_i r_i^2$. Тогда момент инерции тела: $I = \sum m_i r_i^2$.

В общем случае, если тело сплошное, оно представляет собой множество точек с бесконечно малыми массам dm , и момент инерции тела определяется интегралом. Пределы интегрирования определяются размерами и формой тела: $I = \int_0^m r^2 dm$. Момент инерции зависит от формы тела,

относительно какой оси вращается тело, от распределения массы по объему тела. В таблице приведены моменты инерции некоторых тел правильной геометрической формы:

Тело	Ось, относительно которой определяется момент инерции	Формула момента инерции
Однородный тонкий стержень массой m и длиной l	Проходит через центр тяжести стержня перпендикулярно стержню	$\frac{1}{12} ml^2$
	Проходит через конец стержня перпендикулярно стержню	$\frac{1}{3} ml^2$
Тонкие кольцо, обруч, труба радиусом R и массой m , распределенной по ободу	Проходит через центр перпендикулярно плоскости основания	mR^2
Круглый однородный диск (цилиндр) радиусом R и массой m	Проходит через центр диска перпендикулярно. Проходит через центр плоскости основания	$\frac{1}{2} mR^2$
Однородный шар массой m и радиусом R	Проходит через центр шара	$0,4mR^2$

Если ось вращения перенести на другое расстояние, то момент инерции изменяется и определяется с помощью **теоремы Штейнера**: момент инерции тела I относительно произвольной оси равен моменту инерции I_0 относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс тела, сложенному с произведением массы тела на квадрат расстояния d между осями: $I = I_0 + md^2$.

Основной закон динамики вращательного движения твердого тела устанавливает связь между полным моментом внешних сил и угловым ускорением тела.

$$\boxed{\vec{M} = I \vec{\varepsilon}} \text{ или } \vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{I} :$$

угловое ускорение твердого тела прямо пропорционально полному моменту внешних сил и обратно пропорционально моменту инерции тела.

Кинетическая энергия вращающегося тела определяется:
$$\boxed{E_K = \frac{I\omega^2}{2}} .$$

Если тело катится по поверхности другого тела, то центр масс движется поступательно, а само тело вращается, поэтому энергия движения складывается из энергии поступательного движения и энергии вращения:

$$E_K = \frac{m v_c^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} ,$$

где v_c – скорость центра масс тела; I – момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс, ω – угловая скорость вращения тела.

Введем определение еще одной величины, характеризующей вращение твердого тела – момента импульса или момента количества движения тела относительно оси вращения.

Для i -й материальной точки, имеющей линейную скорость \vec{v}_i **Момент импульса** или **момент количества движения** относительно оси вращения определяется как: $\vec{L}_i = [\vec{r}_i m_i \vec{v}_i]$. $[L] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$.

Этот вектор является также направленным вдоль оси вращения и также в сторону, определяемую правилом буравчика. Так как $\vec{r}_i \perp \vec{v}_i$, то модуль вектора \vec{L}_i равен $L_i = r_i m_i v_i$. Величина полного момента импульса твердого тела равна арифметической сумме моментов импульса всех его точек, так как при вращении тела все его точки вращаются в одном и том же направлении: $\vec{L} = \vec{\omega} \sum m_i r_i^2 = \vec{\omega} I$.

Момент импульса определяется формулой $\vec{L} = I\vec{\omega}$ и является вектором, совпадающим по направлению с вектором угловой скорости.

Будем считать, что момент инерции I остается все время постоянным, а угловая скорость изменяется со временем, так что $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$. Продифференци-

руем $\vec{L} = I\vec{\omega}$ по времени:
$$\frac{d\vec{L}}{dt} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt}, \Rightarrow \frac{d\vec{L}}{dt} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \Rightarrow \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} .$$

Сопоставляя полученное выражение с основным законом динамики вращательного движения, можно его записать в виде: $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$.

В замкнутой системе момент внешних сил $\vec{M} = 0$ и $\Rightarrow \frac{d\vec{L}}{dt} = 0$, откуда:

$$\boxed{\vec{L} = \text{const}}$$

где \vec{L} – векторная сумма моментов тел, входящих в эту систему.

Данное выражение представляет собой закон сохранения момента импульса: *сумма моментов импульса всех тел замкнутой системы сохраняется, то есть не изменяется с течением времени.*

$$I\vec{\omega} = \text{const}.$$

Закон сохранения момента импульса проявляется как в технике (например, в устройстве вертолета – для изменения ориентации), так и в природе (вращение Земли вокруг своей оси происходит с постоянной угловой скоростью, поскольку не изменяется ее момент инерции).

12. Элементы гидроаэромеханики.

Гидроаэромеханика – раздел механики, изучающий равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами.

Свойства жидкостей в газовой среде во многом отличаются, однако в ряде механических явлений их поведение определяется одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Поэтому гидроаэромеханика использует единый подход к изучению жидкостей и газов. В механике жидкости и газы рассматриваются как сплошные, непрерывно распределенные тела в занятой ими части пространства.

Физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади, называется *давлением* p жидкости:

$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}$. Единица давления — паскаль (Па): 1 Па равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м² (1 Па=1 Н/м²).

Давление, обусловленное весом P' столба жидкости, называется гидростатическим давлением и равно:

$$p = \frac{P'}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh. \quad (1)$$

Давление при равновесии жидкостей (газов) подчиняется **закону Паскаля**: давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одина-

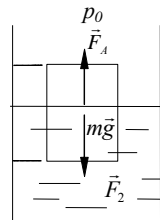


Рис.12.1.

ково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью. Закон гидростатического давления:

$$p = p_0 + \rho gh.$$

Давление, оказываемое жидкостью на дно и стенки сосуда, определяется плотностью жидкости, высотой ее вертикального столба относительно рассматриваемой точки и внешним давлением.

Согласно (1) сила давления на нижние слои жидкости будет больше, чем на верхние, поэтому на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, определяемая **законом Архимеда**: на тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны жидкости (газа) направленная вверх выталкивающая сила равная весу вытесненной телом жидкости (газа),

$$F_A = \rho g V,$$

где ρ – плотность жидкости, V – объем погруженного в жидкость тела.

Условия плавания тел: $mg > F_A$ – тело тонет; $mg < F_A$ – тело всплывает до тех пор, пока не начнет плавать; $mg = F_A$ – тело плавает.

Движение жидкости называется **течением**, а совокупность частиц движущейся жидкости – **потоком**.

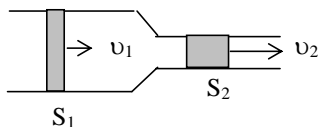


Рис.11.2.

Течение называют установившимся или **стационарным**, если в каждой точке пространства, занимаемого жидкостью, ее скорость со временем не изменяются. Если скорость меняется со временем, то течение нестационарное.

Рассмотрим движение жидкости по трубе с меняющимся сечением. Если за время t через сечение S_1 в трубу входит объем жидкости V_1 , то через сечение S_2 за этот промежуток времени выходит такой же объем жидкости: $V_1 = V_2$.

$$V_1 = S_1 v_1 t, \quad V_2 = S_2 v_2 t.$$

Из равенства объемов следует: $S_1 v_1 = S_2 v_2$. Это уравнение неразрывности.

Его следствие: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$.

При стационарном течении жидкости скорости движения ее частиц через разные поперечные сечения трубы обратно пропорциональны площадям этих сечений.

Если жидкость покоится, то давление зависит только от ее плотности глубины погружения. Однако в текущей жидкости оно зависит также от скорости потока. Если применить закон сохранения энергии к установившемуся течению жидкости, то получим

$$\boxed{\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2}.$$

Это уравнение Бернулли. Величина p называется статическим давлением (давление на поверхность обтекаемого ею тела), величина $\rho v^2 / 2$ – динамическим давлением. Величина ρgh – это гидростатическое давление.

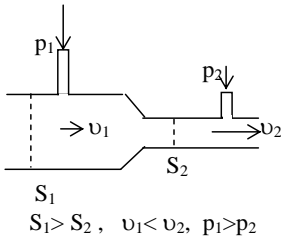


Рис. 11.3

Из этого уравнения следует, в частности, что в горизонтальном потоке ($h_1=h_2$) при стационарном течении жидкости (газа) в тех местах, где скорость течения меньше, давление в жидкости больше и, наоборот, там, где течение больше, давление в жидкости меньше.

Вязкость (внутреннее трение) – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно

другой.

Существует два режима течения жидкостей. Течение называется **ламинарным** (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними.

Течение называется **турбулентным** (вихревым) если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости.

ВОПРОСЫ

для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 2.

1. В чем измеряется сила?
2. Какие системы отсчета называются инерциальными?
3. Сформулировать первый закон Ньютона?
4. Сформулировать второй закон Ньютона.
5. Сформулировать третий закон Ньютона.
6. Каковы границы применимости законов Ньютона?
7. Кто впервые сформулировал принцип относительности?
8. Дать формулировку принципа относительности.
9. Записать закон всемирного тяготения.
10. Чем вес тела отличается от силы тяжести?
11. Записать закон Гука.
12. По какой формуле рассчитывается сила трения скольжения?
13. Что такое импульс?
14. Если импульс первой материальной точки равен \vec{p}_1 , вторая материальная точка имеет импульс \vec{p}_2 , то чему равен полный импульс системы двух материальных точек?
15. Сформулировать закон сохранения импульса.
16. Для каких систем выполняется закон сохранения импульса?
17. По какой формуле рассчитывается механическая работа?
18. Что такое кинетическая энергия и по какой формуле она вычисляется?
19. Какие силы называются потенциальными?

20. Что называется потенциальной энергией?
21. Сформулировать закон сохранения механической энергии.
22. Какая энергия для замкнутой системы тел в любой инерциальной системе отсчета является одинаковой?
23. Сформулировать закон сохранения и превращения энергии.
24. В чем измеряется энергия в СИ?
25. Какие величины сохраняются в замкнутой системе, в которой действуют потенциальные силы?
26. Что называется моментом силы?
27. По какой формуле определяется момент инерции материальной точки?
28. Сформулировать теорему Штейнера.
29. Что устанавливает основной закон динамики вращательного движения?
30. Как рассчитать энергию вращающегося и катящегося тела?
31. Сформулировать закон сохранения момента импульса.
32. По какой формуле рассчитывается гидростатическое давление?
33. Какова размерность давления в СИ?
34. Сформулировать закон гидростатического давления Паскаля.
35. Сформулировать закон Архимеда.
36. Чем ламинарное течение отличается от турбулентного?
37. Записать закон неразрывности струи.
38. Как зависит давление от скорости течения?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ 2

Порядок решения задач по динамике.

1. Внимательно прочитайте условие задачи и выясните характер движения.
2. Запишите условие задачи, выразив все величины в единицах СИ.
3. Сделайте чертеж с указанием всех сил, действующих на тело, вектора ускорения и системы координат. Запишите уравнение второго закона Ньютона в векторном виде.
4. Запишите основное уравнение динамики (уравнение второго закона Ньютона) в проекциях на оси координат с учетом направления осей координат.
5. Найдите все величины, входящие в эти уравнения. Подставьте их в уравнения.
6. Решите задачу в общем виде, то есть решите уравнение или систему уравнений относительно неизвестной величины.
7. Проверьте размерность.
8. Получите численный результат и соотнесите его с реальными значениями величин.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 2

- 2.1. Шарик массой 1 кг движется с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Определить силу, действующую на шарик.
- 2.2. Максимальная сила тяги локомотива 400 кН. Какой массы состав он может привести в движение с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$?

2.3. Тело массой 300 кг лежит на полу кабины грузового подъемника, поднимающегося вверх. Ускорение кабины 3 м/с^2 . Определить силу давления тела на пол кабины.

2.4. На покоящееся в начальный момент тело массой 0,2 кг действует в течение 5 с сила 1 Н. Какую скорость приобретет тело и какой путь пройдет оно за указанное время? (25 м/с, 62,5 м/с)

2.5. Автомобиль массой 1 т останавливается при торможении за 5 с, пройдя при этом равнозамедленно расстояние в 25 м. Найти начальную скорость автомобиля; силу торможения. (10 м/с, 2040 Н).

2.6. Найти величину тормозящей силы, действующей на автомобиль массой 3 т, если при скорости движения 20 м/с тормозной путь был равен 40 м. (15 кН)

2.7. Какой массы груз нужно подвесить к пружине, жесткость которой 1000 Н/м, чтобы растянуть ее на 10 см?

2.8. С какой силой притягиваются два тела массами по 1000 т каждый на расстоянии 100 м друг от друга? (6,67 мН).

2.9. Тело скользит равномерно по наклонной плоскости с углом наклона 30° . Определите коэффициент трения тела о плоскость.

2.10. Автомобиль массой 5 т трогается с места с ускорением $0,6 \text{ м/с}^2$. Найти силу тяги, если коэффициент сопротивления движению равен 0,04.

2.11. Определить скорость движения автомобиля массой 2 т по вогнутому мосту радиусом 100 м, если он давит на середину моста с силой 25 кН.

2.12. С какой силой давит автомобиль массой 1 т на середину выпуклого моста, радиус которого 200 м, если он едет по нему со скоростью 54 км/ч.

2.13. Снаряд массой 100 кг летящий горизонтально вдоль железнодорожного пути со скоростью 500 м/с, попадает в вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. Какую скорость получит вагон, если: 1) вагон стоял неподвижно, 2) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в том же направлении, что и снаряд, 3) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в направлении, противоположном движению снаряда?

2.14. Вагонетку массой 2 т по горизонтальному пути равномерно перемещает рабочий. Какую работу он совершит на пути 100 м и какую работу совершает сила трения, если коэффициент трения равен 0,01?

2.15. При вертикальном подъеме тела массой 2 кг на высоту 10 м совершена работа 240 Дж. С каким ускорением поднимали груз?

2.16. Пуля, летящая со скоростью 400 м/с, попадает в вал и проходит до остановки 0,5 м. Определить силу сопротивления вала движению пули, если ее масса 24 г.

2.17. Резиновый шнур длиной 1 м под действием груза 10 Н удлинился на 10 см. Найти работу силы упругости.

2.18. Определить мощность тепловоза, зная, что при скорости движения 43,2 км/ч сила тяги равна 105 кН.

2.19. Тело массой 10 кг свободно падает с высоты 20 м из состояния покоя. Чему равна кинетическая энергия в момент удара о Землю? Сопротивлением воздуха пренебречь.

2.20. Импульс тела равен $8 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$, а кинетическая энергия 16 Дж . Найти массу и скорость тела.

2.21. В цилиндр, площадь основания которого $0,005 \text{ м}^2$, налита ртуть, высота столба которой $0,12 \text{ м}$. Определить давление на дно сосуда, если плотность ртути $13,6 \text{ т/м}^3$.

2.22. Вес тела в воздухе равен 26 кН , а в воде – 16 кН . Каков объем тела?

2.23. В трубе переменного сечения в сечении с площадью 15 см^2 скорость потока воды 2 м/с . Определить скорость в сечении с площадью 10 см^2 .

2.30. По горизонтальной трубе в широкой ее части вода течет под давлением $1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и со скоростью 8 см/с . Какова скорость ее течения в узкой части трубы, где давление $1,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 2

1. Законы Ньютона для системы материальных точек.
2. Движение тела в поле силы тяжести: свободное падение, брошенного вертикально вверх, горизонтально, под углом к горизонту.
3. Вычисление моментов инерции тел правильной геометрической формы.
4. Условия равновесия твердого тела. Виды равновесия.
5. Рычаг в технике и природе. Равновесие в механике.
6. *Вестибулярный аппарат как инерциальная система ориентации.*
7. Закон сохранения импульса в технике и природе.
8. Реактивное движение самостоятельно
9. *Закон сохранения энергии в живых организмах.*
10. Силы инерции. Центробежная сила. Сила Кориолиса. Влияние вращения Земли на движение тел.
11. Движение искусственных спутников и планет. 1-я, 2-я и 3-я космические скорости.
12. Абсолютно упругий и неупругий удар.
13. Деформации твердого тела.
14. *Механическая работа человека.*
15. Вывод уравнения Бернулли. Формула Торричелли.
16. Лобовое сопротивление. Эффект Магнуса. Подъемная сила крыла самолета.
17. Физика полета живых организмов.
18. *Напряжения, возникающие под действием веса. Механические свойства биологических тканей. Биомеханика мышцы.*
19. *Физические вопросы гемодинамики. Работа и мощность сердца.*
20. *Физика метода определения давления крови.*

Тема 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

13. Колебательное движение. Гармонические колебания. Динамика колебательного движения.

Движения, обладающие той или иной степенью повторяемости, называются *колебаниями*.

Если значения физических величин, изменяющихся в процессе движения, повторяются через равные промежутки времени, то такое движение называется *периодическим*. В зависимости от физической природы колебательного процесса различают механические и электромагнитные колебания. По способу возбуждения колебания делят на: *свободные* (собственные), происходящие в представленной самой себе системе около положения равновесия после какого-либо первоначального воздействия; *вынужденные* – происходящие при периодическом внешнем воздействии.

Условия возникновения свободных колебаний: а) при выведении тела из положения равновесия в системе должна возникнуть сила, стремящаяся вернуть его в положение равновесия; б) силы трения в системе должны быть достаточно малы.

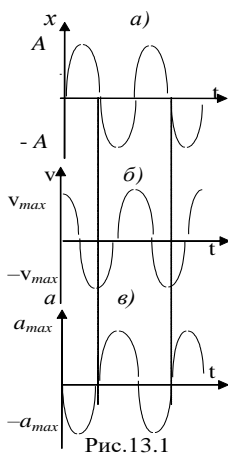


Рис. 13.1

Амплитуда A – модуль максимального отклонения колеблющейся точки от положения равновесия.

Колебания точки, происходящие с постоянной амплитудой, называют *незатухающими*, а колебания с постепенно уменьшающейся амплитудой – *затухающими*.

Время, в течение которого совершается полное колебание, называют *периодом (T)*.

Частотой ν периодических колебаний называют число полных колебаний, совершаемых за единицу времени:

Единица частоты колебаний — *герц (Гц)*. Герц – это частота колебаний, период которых равен 1 с: 1 Гц = 1 с⁻¹.

Циклической или круговой частотой периодических колебаний называется число полных колебаний, совершаемых за время 2π с:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

$[\omega] = \text{рад/с}$.

Гармонические – это такие колебания, которые описываются периодическим законом:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ или } x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

где $x(t)$ – периодически изменяющаяся величина (смещение, скорость, сила и т.д.), A – амплитуда.

Система, закон движения которой имеет вид (1), называется *гармоническим осциллятором*. Аргумент синуса или косинуса $(\omega t + \varphi_0)$ называется *фазой колебаний*. Фаза колебания определяет смещение в момент времени t . Начальная фаза φ_0 определяет смещение тела в момент начала отсчета времени.

Рассмотрим смещение x колеблющегося тела относительно положения равновесия. Уравнение гармонического колебания:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Первая производная от x по времени дает выражение для скорости движения

тела:
$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0); \quad (2)$$

Скорость достигает своего максимального значения в момент времени, когда $\cos(\omega t + \varphi_0) = 1$: $v_{\max} = A\omega$. Смещение же точки в этот момент равно нулю $x = 0$ (рис. 13.1, б).

Ускорение изменяется со временем также по гармоническому закону:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x, \quad (3)$$

где $A\omega^2$ – максимальное значение ускорения. Знак минус означает, что ускорение направлено в сторону, противоположную смещению, т.е. ускорение и смещение изменяются в противофазе (рис. 13.1 в). Видно, что скорость достигает максимального значения, когда колеблющаяся точка проходит положение равновесия. В этот момент смещение и ускорение равны нулю.

Для того чтобы тело совершало гармоническое колебательное движение, на него должна действовать сила, всегда направленная к положению равновесия, а по величине – прямо пропорциональная смещению от этого положения. Силы, направленные к положению равновесия, называются *возвращающими*.

Рассмотрим свободные колебания, происходящие в системе с одной степенью свободы. Пусть тело массой m укреплено на пружине, упругость которой k (пружинный маятник, рис.13.2). В отсутствие сил трения на тело, выведенное из положения равновесия, действует упругая сила пружины $F = -kx$. Тогда по второму закону динамики

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} \text{ имеем: } m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \text{ или } m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0. \quad (1)$$

Если ввести обозначение $\omega = \sqrt{k/m}$, то уравнение (1) можно

переписать в следующем виде:
$$\boxed{\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0} \quad (2)$$

Это и есть дифференциальное уравнение свободных колебаний с одной степенью свободы. Его решением является функция вида $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$. Величина $\omega = \sqrt{k/m}$ является циклической частотой

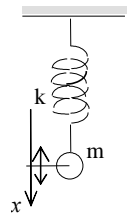


Рис.13.2

той колебаний. Период колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi / \omega = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (3).$$

Математический маятник. Это модель, в которой вся масса сосредоточена в материальной точке, колеблющейся на невесомой и недеформируемой нити (рис.13.3). При отклонении материальной точки от положения равновесия на малый угол α , такой, чтобы выполнялось условие $\sin \alpha \approx \alpha$, на тело будет

действовать возвращающая сила $F = -mg \sin \alpha = mg\alpha$. Знак минус указывает, что сила направлена в сторону, противоположную смещению. Так как $\sin \alpha \approx \alpha = x/l$, то сила

равна $F = -\frac{mg}{l}x$. Сила пропорциональна смещению, следовательно, под действием этой силы материальная точка будет совершать гармонические колебания. Обозначим

$\frac{mg}{l} = k$, где $k = \omega^2 x$, имеем: $\omega^2 = g/l$ или $\omega = \sqrt{g/l}$.

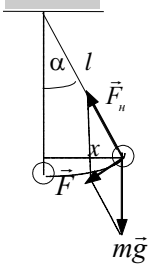


Рис.13.3.

Отсюда период колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}.$$

14. Энергия гармонических колебаний. Затухающие колебания. Вынужденные колебания.

Характерной чертой гармонического осциллятора является то, что средние значения кинетической и потенциальной энергии осциллятора равны друг другу и каждое из них составляет половину полной энергии. Покажем это.

Кинетическую энергию колеблющегося тела можно определить, если в выражение для кинетической энергии подставить скорость $v = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)$:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t \quad (1).$$

Потенциальная энергия, обусловленная упругой силой, определяется как эквивалент работы, необходимой для смещения тела на расстояние x от положения равновесия, и равна: $E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 \sin^2 \omega t$.

Учитывая, что $k = \omega^2 x$, получим:

$$E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2 \omega t. \quad (2).$$

Полная механическая энергия осциллятора равна: $E = E_k + E_p$.

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t + \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t =$$

$$= \frac{m \omega^2 A^2}{2} (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = \frac{m \omega^2 A^2}{2}$$



Из выражений (1) и (2) видно, что кинетическая и потенциальная энергии изменяются со временем, причем, когда кинетическая энергия максимальна, потенциальная энергия обращается в нуль, и наоборот (рис.14.1). Период колебания кинетической и потенциальной энергий вдвое меньше периода колебаний системы. Полная механическая энергия гармонического колебания постоянна и пропорциональна квадрату амплитуды и квадрату частоты. Постоянство полной механической энергии обусловлено отсутствием потерь энергии на совершение работы против сил сопротивления.

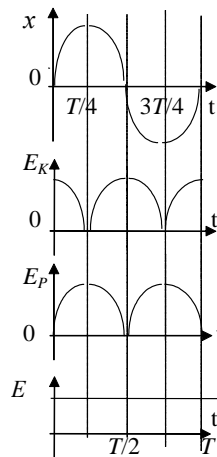


Рис.14.1.

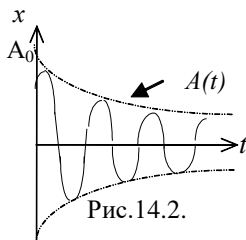


Рис.14.2.

Колебания, энергия которых уменьшается с течением времени, называются затухающими. Свободные колебания под действием сил сопротивления всегда затухают. Уравнение затухающего колебательного движения:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

где β – коэффициент затухания, ω_0 – собственная частота колебания (рис.14.2).

Колебания системы, которые совершаются за счет работы периодически меняющейся внешней силы, называются *вынужденными*. Вынуждающая сила раскачивает систему, сообщая ей запас энергии, и пополняет расходуемую энергию, поддерживая колебательное движение. Уравнения при установившемся движении имеет вид:

$$x_{\text{вын}}(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к частоте ω_0 , называется *резонансом*. На рисунке 15.3 даны зависимости амплитуды колебаний от частоты вынуждающей силы. Отдельные кривые соответствуют различным значениям коэффициента затухания β . Эти кривые называются резонансными. Чем меньше коэффициент затухания, тем резче изменяется амплитуда вынужденных колебаний. При коэффициенте затухания $\beta=0$, когда

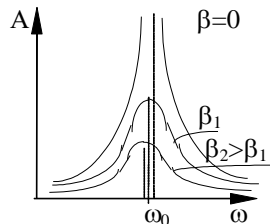


Рис. 15.3.

отсутствуют силы сопротивления, $\omega_{рез} = \omega_0$, а $A_{рез}$ становится бесконечно большой.

Явление резонанса учитывается при периодически изменяющихся нагрузках в машинах и различного вида сооружениях.

15. Механические волны.

Процесс распространения колебаний в среде называется **волновым** процессом (или **волной**). Все разнообразие волн в природе и технике подразделяют на два типа: волны механические (упругие) и электромагнитные.

Упругими (или **механическими**) волнами называются механические возмущения, распространяющимися в упругой среде.

Упругие волны бывают продольные и поперечные. В **продольных** волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в **поперечных** – в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения. Поперечные волны возникают при деформациях сдвига. Поэтому в жидкой и газообразной средах возникают только продольные волны.

При распространении колебаний в среде частицы не перемешаются вместе с волной, а лишь колеблются около своих положений равновесия. Поступательно перемещаются лишь фаза и энергия колебаний.

Графически волну изображают так же, как и колебания (рис.15.1).

Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковых фазах, называется **волновой поверхностью**. В зависимости от формы волновой поверхности различают сферические, плоские, цилиндрические волны. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания с одинаковой фазой к некоторому моменту времени t , называется **фронтом волны**. Фронт волны является частным случаем волновой поверхности.

Расстояние, на которое определенная фаза распространяется за один период колебания, называется **длиной волны** λ . Из рисунка видно, что λ – это наименьшее расстояние между точками, колеблющимися в одинаковых фазах.

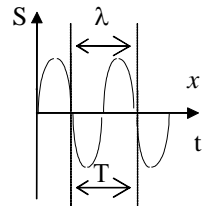


Рис.15.1.

Скорость распространения волны (фазовая скорость). **Фазовая скорость** – равна скорости перемещения в пространстве точек поверхности, соответствующей любому фиксированному значению фазы.

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\lambda}{T}.$$

Волна, распространяющаяся в пространстве от какого-либо источника называется **бегущей волной**. Уравнение **бегущей волны**

$$s = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (1)$$

Для характеристики волн используется волновое число k , характеризующее скорость изменения фазы в пространстве

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}. \quad (3)$$

Учитывая (3), уравнение (2) примет вид:

$$s = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0) \quad (4)$$

Уравнение волны, распространяющейся вдоль отрицательного направления оси Ox отличается от (4) знаком члена kx .

Из условия $\omega t - kx + \varphi_0 = const$ получаем выражение для фазовой скорости: $v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}$.

ВОПРОСЫ

для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 3

1. Что называется амплитудой колебания?
2. Что называется периодом колебания?
3. Что называется частотой колебания?
4. Какие колебания называются гармоническими?
5. Что называется фазой колебания?
6. Какая сила является возвращающей в случае пружинного маятника? математического маятника?
7. В каком случае скорость колебательного движения максимальна? минимальна?
8. В каком случае потенциальная энергия гармонического колебания максимальна?
9. Как меняется кинетическая энергия гармонического колебания?
10. Как меняется полная механическая энергия гармонического колебания со временем?
11. Под действием каких сил затухают свободные колебания?
12. Как называются колебания системы, которые совершаются за счет работы периодически меняющейся внешней силы?
13. Назовите условие возникновения резонанса.
14. Что называется механической волной?
15. Что такое волновая поверхность?
16. Что такое фронт волны?
17. Что такое длина волны?
18. Как колеблются частицы в продольных волнах? в поперечных волнах?
19. По какой формуле вычисляют скорость распространения волны?
20. Как называется волна, распространяющаяся в пространстве от какого-либо источника?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 3

3.1. Маятник совершил 20 колебаний за 1 мин. 20 с. Найти период и частоту колебаний.

3.2. Координата колеблющегося тела изменяется по закону: $x = 5 \cos \pi t$ м. Чему равна амплитуда, период и частота колебаний?

3.3. Уравнение движения гармонического колебания имеет вид $x = 0,02 \cos \frac{\pi}{2} t$ м. Найти координаты тела через 2 с.

3.4. Написать уравнение гармонического колебательного движения с амплитудой в 5 см, если в 1 мин совершается 150 колебаний и начальная фаза колебаний равна 45° .

3.5. Точка совершает колебания по закону $x = A \sin \omega t$. В некоторый момент времени смещение точки x_1 оказалось равным 5 см. Когда фаза колебаний увеличилась вдвое, смещение x_2 стало равным 8 см. Найти амплитуду A колебаний.

3.6. Грузик массой 250 г, подвешенный к пружине, колеблется по вертикали с периодом $T=1$ с. Определить жесткость пружины.

3.7. Математический маятник длиной 2,45 м совершает 100 колебаний за 314 с. Определить ускорение свободного падения для данной местности.

3.8. Гири, подвешенная к пружине, колеблется по вертикали с амплитудой 4 см. Определить полную энергию колебаний гири, если жесткость пружины равна 1 кН/м.

3.9. Расстояние между ближайшими гребнями волны в море 20 м. С какой скоростью распространяется волна, если период колебаний частиц в волне 10 с?

3.10. Какова длина волны на воде, если при скорости распространения волны 2,4 м/с плавающее на воде тело совершает 20 колебаний за 10 с?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 3

1. Дифференциальное уравнение свободных, свободных затухающих и вынужденных колебаний.

2. Период колебаний физического маятника.

3. Физические характеристики звука. Акустика.

4. *Характеристики слухового ощущения. Физика слуха.*

5. *Колебательные процессы в природе и технике.*

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Введение. Статистический и термодинамический методы исследования вещества.

Молекулярная физика и термодинамика – разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в телах атомов и молекул. Примером макроскопических систем могут служить газы, жидкости, твердые тела, плазма. Размеры атомов или молекул по сравнению с размерами макросистем очень малы. Они изменяются в диапазоне от 10^{-10} м (размер атома водорода) до 10^{-7} м (размер молекулы белка вируса). Органы чувств человека не позволяют различать размеры, форму, энергию и импульс отдельных молекул. Однако ряд экспериментов косвенно, а в отдельных случаях прямо позволяет это сделать. К **прямым методам** наблюдения молекул относятся методы современной микроскопии: электронной, ионной, голографической. **Косвенные методы** наблюдения: броуновское движение, давление газа на стенки сосудов, диффузия газов и жидкостей, вязкое трение и др.

Для исследования макроскопических процессов применяют два качественно различных и взаимно дополняющих друг друга метода: *статистический (молекулярно-кинетический)* и *термодинамический*. Первый лежит в основе молекулярной физики, второй – термодинамики.

Молекулярная физика – раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что **все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействующих между собой по определенным законам**. При этом в теории пользуются *статистическими* методом, интересуясь не движением отдельных молекул, а лишь такими средними величинами, которые характеризуют движение огромной совокупности частиц.

Термодинамика – раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями. Термодинамика не рассматривает микропроцессы, которые лежат в основе этих превращений. В основе термодинамического метода лежат два положения, являющиеся обобщением опыта многовековой деятельности человека и подтвержденные практикой. Преимущества термодинамического метода в весьма большой общности получаемых выводов. Оба метода изучения физических явлений дополняют друг друга. Нельзя, например, излагать вопросы молекулярной физики, не обращаясь к понятиям термодинамики. В то же время, нельзя понять природу тех или иных явлений, описываемых в термодинамике без использования молекулярных представлений.

Тема 4.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ**16. Идеальный газ. Основное уравнение кинетической теории газов. Закон Дальтона.**

Примером простейшей системы, изучаемой в молекулярной физике, является газ. Газы рассматриваются как системы, состоящие из очень большого числа частиц (до 10^{26}м^{-3}), находящихся в постоянном беспорядочном движении. Состояние газа характеризуется совокупностью трех параметров p , V , T , которые называются параметрами состояния. **Температура** – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. В настоящее время можно применять только две температурные шкалы, градуированные соответственно в кельвинах (К) и в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). **Давление** в системе СИ измеряется в Па (паскаль): $1 \text{Н/м}^2 = 1 \text{Па}$.

В молекулярно-кинетической теории пользуются *моделью идеального газа*, согласно которой считают, что: 1) *собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда*; 2) *между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия*; 3) *столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие*.

Модель идеального газа можно использовать при изучении реальных газов, так как в условиях, близких к нормальным, а также при низких давлениях и высоких температурах большинство газов близко по своим свойствам к идеальному газу.

Основным уравнением кинетической теории газов называется соотношение, связывающее давление (величину, измеряемую на опыте) со скоростью или кинетической энергией молекулы газа.

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} \quad (1)$$

Это уравнение как раз и устанавливает связь между давлением и среднеквадратичной скоростью. Здесь $n = N/V$ – число молекул в единице объема или *концентрация*, m_0 – масса одной молекулы газа; $\overline{v^2}$ – квадрат средней квадратичной скорости молекул ($v_{\text{кв}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}}$).

Давление газа пропорционально произведению массы молекулы, концентрации молекул и среднему квадрату скорости движения молекул.

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения одной молекулы: $\overline{\mathcal{E}} = m_0 \overline{v^2} / 2$. Тогда основное уравнение запишется в виде:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \quad \text{или} \quad p = \frac{2}{3} n \overline{\mathcal{E}} \quad (2)$$

В уравнении (2) давление связано со средней энергией поступательного движения молекул. *Давление газа численно равно 2/3 средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема.*

При переходе к равновесию от одной части газа к другой передается энергия. Выравнивается не энергия всего газа как целого, а средняя кинетическая энергия, отнесенная к одной молекуле. Температура газа пропорциональна средней кинетической энергии его молекул: $T \sim \bar{\mathcal{E}}$. Средняя кинетическая

энергия поступательного движения молекулы
$$\bar{\mathcal{E}} = \frac{3}{2} kT, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, выражающая соотношение между единицей энергии и единицей температуры. $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Все молекулы при данной температуре T имеют одну и ту же среднюю энергию независимо от их сорта. Из формулы (3) следует, что *абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного хаотического движения молекул.*

Выразим среднюю квадратичную скорость $v_{кв}$ через абсолютную температуру T . Приравнявая правые части в формулах $\bar{\mathcal{E}} = 3kT/2$ и $\bar{\mathcal{E}} = m_0 \bar{v}^2 / 2$, получим: $v_{кв} = \sqrt{3kT / m_0}$.

Подставляя в (2) выражение (3), получим, что давление идеального газа связано с температурой соотношением:
$$p = nkT$$

Это третья форма записи основного уравнения кинетической теории газов. Давление определяется только концентрацией (при постоянной температуре) и не зависит от сорта молекул.

Если имеем смесь нескольких идеальных газов, то согласно закону Дальтона

$$p = \sum_i p_i = p_1 + p_2 + \dots$$

Давления p_1, p_2, \dots, p_i называют парциальными давлениями. Парциальное давление – давление, которое оказывала бы компонента смеси газа, если бы она занимала весь объем. Таким образом, *давление, оказываемое на стенки сосуда смесью газов, равно сумме парциальных давлений отдельных компонентов смеси.*

17. Газовые законы. Уравнение Менделеева-Клапейрона.

Экспериментальное исследование свойств газов, проведенное в XVII-XVIII вв. Бойлем, Мариоттом, Гей-Люссаком, Шарлем, привело к формулировке газовых законов.

1. *Изотермический процесс* – $T = \text{const}$.

Закон Бойля-Мариотта: $pV = \text{const}$.

График зависимости p от V приведен на рис.17.1. Чем выше изотерма, тем более высокой температуре она соответствует, $T_2 > T_1$.

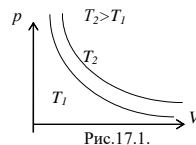


Рис.17.1.

2. *Изобарный процесс* – $p = \text{const}$.

Закон Гей-Люссака: $\frac{V}{T} = \text{const}$.

График зависимости V от T приведен на рис. 17.2. Чем ниже к оси температуры наклонена изобара, тем большему давлению она соответствует, $p_2 > p_1$.

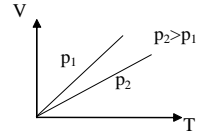


Рис.17.2.

Закон Шарля: $\frac{p}{T} = \text{const}$.

График зависимости p от T изображен на рис 17.3. Чем ниже к оси температуры наклонена изохора, тем большему объему она соответствует, $V_2 > V_1$.

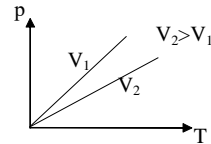


Рис.17.3.

Комбинируя выражения газовых законов, получим уравнение, связывающее p , V , T (объединенный газовый закон):

$$\frac{pV}{T} = \text{const}.$$

Постоянная в этом уравнении определяется экспериментально. Для количества вещества газа 1 моль она оказалась равной $R=8,31$ Дж/(моль·К) и была названа *универсальной газовой постоянной*.

1 моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. Число молекул (структурных единиц) в 1 моле равно числу Авогадро: $N_A=6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Для R справедливо соотношение: $R=k N_A$

Итак, для одного моля: $pV = RT$.

Для произвольного количества газа $\nu = m/\mu$, где μ – молярная масса газа. В результате получим уравнение состояния идеального газа, или уравнение

Менделеева-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT.$$

18. Барометрическая формула.

При рассмотрении основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов предполагалось, что на молекулы газа внешние силы не действуют, поэтому молекулы равномерно распределены по объему. Если газ находится в силовом поле, то существуют силы, которые сообщают хаотически движущимся молекулам направленное движение.

Молекулы газа, находящиеся в поле тяготения, участвуют в тепловом движении и испытывают действие силы тяжести. Тяготение и тепловое движение приводят к состоянию газа, при котором наблюдается убыль концентрации и давления газа с возрастом

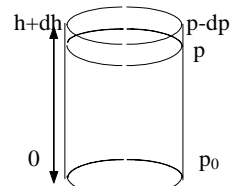


Рис.18.1.

высоты над землей. Выведем закон изменения давления с высотой, предполагая, что поле тяготения однородно, температура постоянна и масса всех молекул одинакова и равна m_0 .

Атмосферное давление на некоторую площадку S обусловлено весом столба воздуха над этой площадкой (т.е. действием силы тяжести). Пусть на высоте h – давление p , а при $h=0$ – $p=p_0$. Рассмотрим изменение давления элемента “столба” высотой dh , в пределах которого концентрацию можно считать постоянной. Убыль давления в пределах dh : $dp = -nm_0g dh$. Но

$p = nkT$, или $n = \frac{p}{kT}$, поэтому: $dp = -p \frac{m_0g}{kT} dh$. Произведя разделение переменных: $\frac{dp}{p} = -\frac{m_0g}{kT} dh$, получим $p = p_0 e^{-\frac{m_0gh}{kT}}$.

Если учесть, что $m_0/k = m_0 N_A / (k N_A) = \mu / R$, тогда $p = p_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}$.

Зависимость давления атмосферы от высоты над уровнем моря при постоянной температуре называют *барометрической формулой*.

Пользуясь барометрической формулой $p = p_0 e^{-\frac{m_0gh}{kT}}$, можно получить закон изменения концентрации с высотой. Приняв во внимание $n = p/kT$ и $n_0 = p_0/kT$, где n и n_0 – концентрация молекул на высоте h и $h_0=0$ и подставляя p и p_0 в барометрическую формулу, получим закон распределения концентраций по высоте: $n = n_0 e^{-\frac{m_0gh}{kT}}$.

Полученное распределение Больцмана справедливо для поля тяготения, для которого $U = m_0gh$ – потенциальная энергия на высоте h (на разной высоте молекула обладает различным запасом потенциальной энергии). Однако оно справедливо и для идеального газа, находящегося в любом другом потенциальном поле:

$n = n_0 e^{-\frac{U}{kT}}$

распределение Больцмана в поле с потенциальной энергией U .

При $T \rightarrow \infty$, $n \rightarrow n_0$, то есть происходит выравнивание концентрации газа по всему объему, занимаемому газом. При $T \rightarrow 0$, $n \rightarrow 0$, то есть все молекулы опустятся на поверхность Земли (если речь идет об атмосфере).

19. Распределение энергии по степеням свободы.

Средняя энергия, приходящаяся на одну молекулу $\bar{\varepsilon} = 3kT/2$. Если считать молекулу шариком (как в одноатомном газе), то средняя энергия такой частицы определяется средней кинетической энергией ее поступательного

движения. Энергию эту можно представить как сумму трех слагаемых – кинетических энергий движения молекулы по трем взаимно перпендикулярным

направлениям:
$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{m_0 \overline{v_x^2}}{2} + \frac{m_0 \overline{v_y^2}}{2} + \frac{m_0 \overline{v_z^2}}{2},$$

где v_x, v_y, v_z – составляющие скорости молекул по трем осям координат. Из-за хаотичности молекулярного движения можно считать, что средние значения кинетических энергий по трем направлениям равны друг другу:

$$\frac{m_0 \overline{v_x^2}}{2} = \frac{m_0 \overline{v_y^2}}{2} = \frac{m_0 \overline{v_z^2}}{2} = \frac{1}{3} \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \quad (1)$$

Так как $m_0 \overline{v^2} / 2 = 3kT / 2$, то каждое из трех слагаемых равенства (1) равно $kT/2$.

Разделение кинетической энергии частицы на три независимые составляющие связано с тем, что частица рассматривается как свободная материальная точка, обладающая тремя степенями свободы.

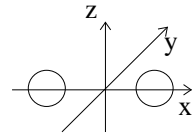
Число степеней свободы – наименьшее число линейно независимых координат, которые полностью определяют положение тела в пространстве. Значит, на *каждую степень свободы одноатомной молекулы приходится энергия, равная $kT/2$* . Естественно было предположить, что если бы молекула газа обладала еще какими-нибудь степенями свободы, то и на каждую из них пришлось бы кинетическая энергия $kT/2$.

Действительно, в классической статистической физике такая теорема доказывается (Больцман): ***в совокупности большого числа молекул, находящихся в тепловом равновесии при температуре T , средняя кинетическая энергия равномерно распределена между всеми степенями свободы и для каждой степени свободы молекулы она равна $kT/2$*** .

Эта теорема называется законом равномерного распределения кинетической энергии по степеням свободы, или, *законом равнораспределения*.

Двух- и многоатомные газы отличаются от одноатомных числом степеней свободы. Двухатомную молекулу можно представить себе в виде системы, состоящей из двух атомов, жестко закрепленных на некотором расстоянии. Здесь три степени свободы приходятся на поступательное движение центра масс, и две – на вращательное. Вращение молекулы вокруг оси Ox не вносит изменения в кинетическую энергию. Следовательно, число степеней свободы жесткой двухатомной молекулы равно 5. Трехатомный газ имеет 6 степеней свободы. Таким образом, если молекула обладает i степенями свободы, то средняя кинетическая энергия теплового движения

этой молекулы:
$$\overline{\mathcal{E}} = \frac{i}{2} kT.$$

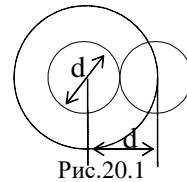


20. Явления переноса в газах.

Молекулярно-кинетическая теория имеет дело с равновесными состояниями и обратимыми процессами. Наука, изучающая процессы, возникающие при нарушениях равновесия, носит название *физической кинетики*. Нарушение равновесия сопровождается переносом массы (диффузия), импульса (внутреннее трение) или энергии (теплопроводность). Эти процессы называются *явлениями переноса*. Они возникают самопроизвольно вследствие теплового движения при отклонении вещества от равновесного состояния и являются необратимыми. В результате теплового движения молекул происходит их столкновение и взаимодействие между ними.

При столкновении молекулы сближаются до некоторого наименьшего расстояния d . *Эффективный диаметр* молекулы – минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух молекул при столкновении.

Средней длиной свободного пробега молекул $\bar{\lambda}$ называется среднее расстояние, которое молекула проходит без столкновений. По определению, она определяется из соотношения: $\bar{\lambda} = \bar{v} / \bar{z}$, где $\bar{v} = \sqrt{8kT / \pi m_0}$ –



средняя арифметическая скорость, \bar{z} – среднее число столкновений в единицу времени. Можно показать, что она определяется соотношением:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} \quad \text{или} \quad \bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}. \quad (1)$$

Перемещаясь при тепловом движении из одних точек в другие, молекулы переносят присущие им массу, импульс и кинетическую энергию. Это обуславливает совокупность явлений, называемых явлениями переноса. К ним относятся диффузия, вязкость, теплопроводность.

1. *Диффузия* есть процесс проникновения одного газа в объем, занятый другим газом, или же движение газа из области повышенной концентрации в область, где концентрация ниже (*самодиффузия*).

Задолго до появления молекулярно-кинетических представлений А.Фиком был эмпирически установлен закон диффузии:

$$dm = -D \frac{d\rho}{dx} dSdt, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии, $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности, который показывает, как изменяется концентрация в направлении x . Знак «минус» означает, что концентрация убывает в направлении x .

Физический смысл коэффициента диффузии: *это масса, переносимая в единицу времени через единичную площадку в направлении нормали к этой площадке в сторону убывания плотности компонента при градиенте плотности, равном единице.*

Коэффициент диффузии определяется из опыта по измеренной переносимой массе. Размерность $[D]=\text{м}^2/\text{с}$.

2. При движении соседних слоев газа с различными скоростями между ними возникает сопротивление перемещению, или т.н. *силы внутреннего трения*. Причиной этого явления, называемого **вязкостью**, является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями и теплового хаотического движения молекул. При этом происходит *перенос импульса* упорядоченного движения молекул из одного слоя в другой. Еще Ньютон показал, что при небольших скоростях течения сила внутреннего трения между слоями, рассчитанная для элементарной площадки S :

$$F = -\eta \frac{du}{dx} S, \quad (3)$$

где u - скорость упорядоченного движения, $\frac{du}{dx}$ – градиент скорости, η – коэффициент *внутреннего трения* (коэффициент вязкости). Коэффициент вязкости численно равен импульсу, переносимому в единицу времени через единичную площадку при единичном градиенте скорости. $[\eta]=\text{Па}\cdot\text{с}$
Коэффициент вязкости не зависит от давления, а определяется только температурой и родом газа.

Теплопроводность – это выравнивание температуры за счет переноса молекулами энергии между частями вещества, которые первоначально имели различную температуру. Хаотическое тепловое движение молекул газа, имеющих различные скорости, а, следовательно, и различные средние кинетические энергии, приводит к *направленному переносу энергии* в форме теплоты. Количество теплоты, переносимое через элементарную площадку в направлении нормали к этой площадке, выражается законом Фурье:

$$dQ = -\kappa \frac{dT}{dx} S dt, \quad (4)$$

где $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры, κ - коэффициент теплопроводности, численно равный *количеству теплоты, переносимому в единицу времени через единичную площадку при единичном градиенте температуры*. $[\kappa]=\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$

Коэффициент теплопроводности, также как и коэффициент вязкости, не зависит от давления.

Вопросы

для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 4

1. Какие существуют подходы к изучению макроскопических систем
2. Перечислить основные признаки идеального газа.
3. Запишите основное уравнение кинетической теории газов и его следствия.
4. Какова связь между шкалой Цельсия и Кельвина?

5. Привести три формы записи основного уравнения кинетической теории газов имеет следующие
6. Как связаны абсолютная температура и средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы?
7. Сформулировать закон Дальтона
8. Что такое моль?
9. Что определяет число Авогадро?
10. Какова размерность в СИ постоянной Авогадро?
11. Какой формулой связаны между собой постоянная Больцмана и универсальная газовая постоянная?
12. Укажите размерности постоянной Больцмана и универсальной газовой постоянной.
13. Записать закон для изобарного (изохорного, изотермического) процесса.
14. Как на графиках $p(V)$, $V(T)$ и $p(T)$ выглядят все изопроцессы?
15. Какой процесс описывает закон Бойля-Мариотта?
16. Какой процесс описывает закон Шарля?
17. Какой процесс описывает закон Гей-Люссака?
18. Как записывается объединенный газовый закон?
19. Изобразите графически в координатах (p, T) две изохоры, соответствующие разным объемам одного и того же газа.
20. Как записывается уравнение состояния для одного моля идеального газа?
21. Как записывается уравнение состояния для любого количества идеального газа?
22. Что устанавливает и как записывается барометрическая формула?
23. В чем заключается закон равнораспределения энергии по степеням свободы?
24. Чему равна средняя кинетическая энергия теплового движения молекулы, имеющей i степеней свободы?
25. Сколько степеней свободы у одно-, двух- и трехатомной молекул?
26. Чем обусловлены явления переноса?
27. Как называется минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух молекул?
28. Что называется эффективным диаметром молекулы?
29. Что называется средней длиной свободного пробега молекул?
30. Что такое диффузия?
31. Какое явление называется вязкостью (внутренним трением)?
32. Какое явление называется теплопроводностью?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 4

- 4.1. Найти массу атома: а) водорода; б) гелия.
- 4.2. Сколько молекул газа находится в сосуде вместимостью 480 см^3 при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $2,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$?
- 4.3. Какую массу имеют $2 \cdot 10^{23}$ молекул азота?

4.4. В сосуде вместимостью 2,24 л при нормальных условиях находится кислород. Определить количество вещества и массу кислорода, а также концентрацию его молекул в сосуде.

4.5. В сосуде находится газ. Какое давление он производит на стенки сосуда, если масса газа 5 г, его объем 1 л, средняя квадратичная скорость 500 м/с?

4.6. Какой объем занимает 10 г кислорода при давлении 100 кПа и температуре 20 °С?

4.7. В сосуде вместимостью 500 см³ содержится 0,89 г водорода при температуре 17 °С. Определить давление газа.

4.8. В баллоне емкостью 25,6 л находится 1,04 кг азота при давлении 3,5 МПа. Определить температуру газа.

4.9. При нормальных условиях масса газа 738,6 мг, а объем 8,205 л. Какой это газ?

4.10. Газ, имеющий объем 0,001 м³, изотермически расширился до объема 1,9·10⁻³ м³. Под каким давлением находился газ, если после расширения оно стало 5,3·10⁴ Па?

4.11. Газ занимал объем 12,32 л. Его охладили при постоянном давлении на 45 К, и его объем стал равен 10,52 л. Какова была первоначальная температура газа?

4.12. Газ находится в баллоне при температуре 288°К и давлении 1,8 МПа. При какой температуре давление газа станет равным 1,55 МПа? Объем баллона считать неизменным.

4.13. Определить плотность и молярную массу смеси 4 г водорода и 32 г кислорода при температуре 7°С и при давлении 700 мм рт.ст.

4.15. Определить высоту горы, если давление на ее вершине равно половине давления на уровне моря. Температуру считать всюду одинаковой и равной 0°С.

4.16. Найти среднюю кинетическую энергию теплового движения одной молекулы кислорода при температуре 286 К, а также кинетическую энергию теплового движения всех молекул этого газа, если его масса 4 г.

4.17. Найти среднюю квадратичную скорость, среднюю кинетическую энергию поступательного движения и среднюю полную кинетическую энергию молекул гелия и азота при температуре 27°С. Определить полную энергию всех молекул 100 г каждого из газов.

4.18. Вычислить среднюю длину свободного пробега молекул азота при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекулы азота 0,3 нм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 4

1. Статистическое распределение. Понятие о фазовом пространстве.
2. Закон Максвелла распределения молекул по скоростям.
3. Опыт Штерна.
4. Опыты Перрена по определению числа Авогадро.
5. Свойства газов при низких давлениях.
6. Методы получения и измерения высокого вакуума.

Тема 5. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

21. Внутренняя энергия термодинамической системы.

Работа и теплота в термодинамике.

Термодинамика изучает количественные закономерности превращения энергии, обусловленные тепловым движением молекул.

Одним из основных понятий термодинамики является внутренняя энергия. Под *внутренней энергией* U в термодинамике понимают сумму кинетической энергии теплового движения частиц, образующих систему, и потенциальную энергию их взаимного положения.

Для идеального газа потенциальная энергия взаимодействия молекул считается равной нулю. Поэтому внутренняя энергия идеального газа представляет собой полную кинетическую энергию его хаотически движущихся молекул. Она равна:

$$U = \bar{\mathcal{E}}N = \bar{\mathcal{E}} \frac{m}{\mu} N_A = \frac{i}{2} kT \frac{m}{\mu} N_A = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT. \quad (1)$$

Из формулы (1) видим, что изменение внутренней энергии данной массы газа прямо пропорционально его абсолютной температуре и не зави-

сит от других макроскопических параметров: $\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$.

Это означает, что изменение внутренней энергии при переходе из одного состояния в другое не зависит от пути перехода. Величина, изменение которой не зависит от пути перехода в термодинамике называется *функцией состояния*: $\Delta U = U_2 - U_1$ не зависит от вида процесса.

Внутренняя энергия является функцией состояния.

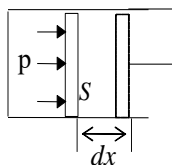


Рис. 21.1.

Еще одним важным понятием в термодинамике является *работа*. Рассмотрим процесс расширения газа. Пусть в цилиндрическом сосуде заключен газ, закрытый подвижным поршнем (рис.21.1). Предположим, что газ расширяется. Он будет перемещать поршень и совершать над ним работу. При малом смещении dx газ совершит работу: $dA = F \cdot dx$, где F – сила, с которой

газ действует на поршень, p – давление газа в начале пути dx . Следовательно, $dA = p \cdot S \cdot dx = p \cdot dV$,

где dV – малое изменение объема газа. Работа, совершаемая при конечных изменениях объема, должна вычисляться путем интегриро-

вания. Полная работа расширения:

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

На графике (p, V) работа равна площади фигуры, ограниченной двумя ординатами и функцией $p(V)$. Предполо-

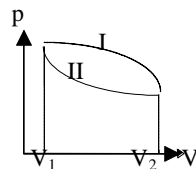


Рис.21.2

жим, система переходит из одного состояния в другое, совершая работу по расширению, но двумя различными путями I и II (рис.21.2). A_I численно равна площади фигуры, ограниченной кривой I, A_{II} – площади фигуры, ограниченной кривой II: $A_I \neq A_{II}$. Работа различна, следовательно, работа не является функцией состояния. Работу считают положительной, если ее совершает система, и отрицательной, если она совершается над системой.

Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называется *теплообменом* или *теплопередачей*. Энергия, переданная телу в результате теплообмена, называется *количеством теплоты* Q .

Величину Q считают положительной, если система получает теплоту, и отрицательной, если она ее отдает. В СИ единицей количества теплоты служит джоуль.

Удельной теплоемкостью вещества c называется скалярная величина, равная количеству теплоты, необходимого для нагревания единицы массы тела на один кельвин (т.е. отношению теплоемкости однородного

тела C к его массе):
$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}. \quad [c] = \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

Молярной теплоемкостью называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, необходимого для нагревания одного моля вещества тела на один кельвин (т.е. отношению теплоемкости системы C к

количеству вещества ν , содержащегося в ней):
$$C_m = \frac{C}{\nu} = \frac{\mu}{m} \frac{dQ}{dT}.$$

$[C_m] = \text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$

22. Первое начало термодинамики и его применение для различных процессов.

Первое начало термодинамики выражает закон сохранения энергии для тех макроскопических явлений, в которых одним из существенных параметров, определяющих состояние тел, является температура.

Теплота, сообщенная системе в процессе изменения ее состояния, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил.

$$Q = \Delta U + A \quad (1)$$

Часто приходится разбивать рассматриваемый процесс на ряд элементарных процессов, каждый из которых соответствует весьма малому изменению параметров системы. Запишем уравнение (1) для элементарного процесса в дифференциальном виде: $dQ = dU + dA$, (2)

где dU – малое изменение внутренней энергии; dQ – элементарное количество теплоты; dA – элементарная работа. Возможны и другие варианты формулировки этого закона. $\Delta U = Q - A$ (3)

Изменение внутренней энергии системы при ее переходе из одного состояния в другое равно сумме совершенной над системой работы внешних сил и теплоты, переданной системе внешними телами.

Из уравнений (1)-(3) видно, что если процесс круговой, т.е. в результате него система возвращается в исходное состояние, то $\Delta U = 0$ и, следовательно, $A=Q$. В круговом процессе все тепло, полученное системой, идет на производство внешней работы. Если $Q = 0$, то и $A = 0$. Это значит, что невозможен процесс, единственным результатом которого является, производство работы без каких бы то ни было изменений в других телах, т.е. невозможен – вечный двигатель – первого рода.

Для равновесных изопроцессов в газах уравнение первого начала термодинамики ($dQ = dU + dA$) имеет вид: $\frac{m}{\mu} C_d dT = dU + p dV$.

$$1) V=const, \quad dV=0, \quad dA=p dV=0 \Rightarrow C_v = \frac{\mu}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_v = \frac{\mu}{m} \frac{dU}{dT};$$

где C_v – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Первое начало термодинамики при изохорном процессе:

$$Q = \Delta U \quad \text{или} \quad dQ = dU$$

Тепло, передаваемое системе при изохорном процессе, идет на изменение ее внутренней энергии.

$$\text{Здесь } C_v = \frac{\mu}{m} \frac{d}{dT} \left(\frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT \right) = \frac{i}{2} R \frac{dT}{dT} = \frac{i}{2} R; \quad C_v = \frac{i}{2} R;$$

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T \quad \text{или} \quad dU = \frac{m}{\mu} C_v dT$$

$$2) p=const: \quad C_p = \frac{\mu}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \quad - \text{ молярная теплоемкость при постоянном давлении.}$$

График изобарического процесса представлен на рис.22.1. Работа изобарного расширения равна площади фигуры, заштрихованной на рис. и имеет значение $A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$.

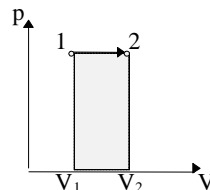


Рис.22.1

Первое начало термодинамики при изобарном процессе:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T + p \Delta V, \quad dQ = \frac{m}{\mu} C_v dT + p dV$$

Здесь же мы сможем установить связь между C_p и C_v и сформулировать физический смысл универсальной газовой постоянной. Первый закон

$$\text{термодинамики для } p=const: \quad \frac{m}{\mu} C_p dT = \frac{m}{\mu} C_v dT + p dV.$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона: $p dV = \frac{m}{\mu} R dT$. Тогда:

$$\frac{m}{\mu} C_p dT = \frac{m}{\mu} C_v dT + \frac{m}{\mu} R dT, \text{ или } \boxed{C_p = C_v + R} \text{ — уравнение Майера.}$$

Отсюда физический смысл R : *универсальная газовая постоянная* численно равна работе, которую необходимо совершить, чтобы нагреть 1 моль вещества на 1 К при постоянном давлении.

$$3) T = \text{const}: dT=0; dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT = 0 \Rightarrow C_T = \frac{\mu}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_T = \infty$$

Первое начало термодинамики при $T = \text{const}$:

$$Q = A \text{ или } dQ = dA$$

Теплота, сообщаемая системе при изотермическом процессе, идет на работу против внешних сил. Если газ изотермически расширяется ($V_2 > V_1$), то к нему подводится тепло и он совершает положительную работу, которая измеряется площадью, заштрихованной на рисунке фигуры.

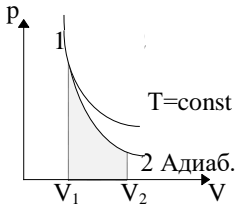


Рис.22.3

4) *Адиабатным* называется процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой: $dQ=0$, $Q=0$. Чтобы процесс был адиабатным, необходимо, чтобы система была отделена от окружающих тел теплонепроницаемой перегородкой, либо процесс должен быть очень быстро протекающим, чтобы не успел установиться теплообмен. Первый закон

термодинамики для адиабатного процесса: $A = -\Delta U$ или $dA = -dU$

Работа при адиабатическом процессе совершается за счет убыли внутренней энергии. Одно из уравнений, с помощью которых можно описать адиабатный процесс: $pV^\gamma = \text{const}$. Здесь

$$\gamma = C_p / C_v = (C_v + R) / C_v = (i + 2) / i. \text{ Величина } \gamma \text{ называется показателем адиабаты. Она всегда больше единицы } \gamma > 1. \text{ При сопоставлении адиабатного и изотермического процессов видно, что адиабата проходит более круто.}$$

Она всегда больше единицы $\gamma > 1$. При сопоставлении адиабатного и изотермического процессов видно, что адиабата проходит более круто.

23. Тепловая машина. Цикл Карно.

Первое начало термодинамики допускает возможность преобразования подведенной к системе теплоты в работу, совершаемую этой системой над внешними телами. Поэтому вполне естественен интерес к практическому созданию устройств, преобразующих тепло в механическую работу.

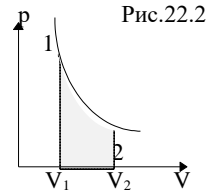


Рис.22.2

Такие устройства получили название **тепловых двигателей** (машин). Многочисленные исследования показали, что в любом реально действующем тепловом двигателе только часть полученной от внешних тел теплоты может преобразоваться в работу, остальная же теплота должна передаваться другим телам. Таким образом, тепловая машина должна состоять из трех основных составных частей: **нагревателя**, который обеспечивает поступление теплоты Q_1 в двигатель, **рабочего тела**, в котором часть полученной теплоты непосредственно превращается в механическую работу A , **холодильника**, который забирает у рабочего тела часть теплоты Q_2 (рис.23.1а)

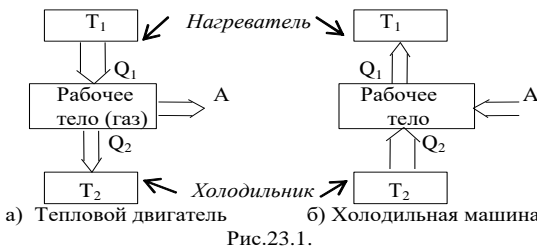


Рис.23.1.

Тепловая машина в процессе работы совершает многократный круговой процесс. *Круговой процесс (цикл)* – это совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние. На диаграммах состояния круговые процессы изображаются замкнутыми линиями (рис.23.2). *Прямым циклом* называется круговой процесс, в котором система совершает положительную работу. Прямой

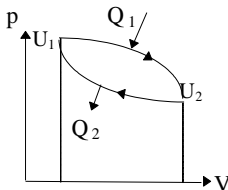


Рис.23.2.

цикл на графике $p(V)$ описывается по часовой стрелке. Для того, чтобы система совершала за цикл положительную работу, надо чтобы расширение происходило при более высоких давлениях, чем сжатие.

Полезная работа $A = Q_1 - Q_2$, совершаемая за один цикл, численно равна площади фигуры, ограниченной кривой цикла на графике $p(V)$.

Тепловая машина характеризуется коэффициентом полезного действия. *К.п.д. (η)* – это отношение совершаемой за цикл работы A к получаемой за цикл теплоте:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

Если при круговом процессе газ, расширяясь, совершает меньшую работу, чем та, которую производят внешние силы при его сжатии, то такой цикл носит название *обратного*. Машины, работающие по обратному циклу, носят название *холодильных*. В холодильных машинах процесс переноса теплоты от холодного тела к более горячему требует затраты работы

внешних сил ($A_2 - A_1$). На диаграмме обратный цикл изображается замкнутой кривой, проходимой против часовой стрелки. На рис. 23.1 б схематически представлен принцип действия холодильной машины.

Анализируя работу тепловых двигателей, Карно сделал два важных вывода.

1) КПД цикла, состоящего из обратимых процессов, всегда больше КПД цикла, основанного на необратимых процессах при тех же условиях.

Если в результате какого-либо процесса система переходит из состояния A в другое состояние B и если возможно вернуть ее в исходное состояние A и притом так, чтобы во всех остальных телах не произошло никаких изменений, то этот процесс называется *обратимым*.

2) Наиболее выгодным процессом является круговой процесс, состоящий из двух обратимых изотерм и двух обратимых адиабат, так как он характеризуется наибольшим коэффициентом полезного действия. Такой цикл получил название цикла Карно. Цикл Карно – прямой круговой процесс, при котором выполненная системой работа максимальна. Цикл состоит из двух изотермических ($1 \rightarrow 2$ и $3 \rightarrow 4$) и двух адиабатических расширений и сжатий ($2 \rightarrow 3$ и $4 \rightarrow 1$) (см. рис.23.3). Машина, совершающая цикл Карно, называется идеальной тепловой машиной. Его к.п.д.:

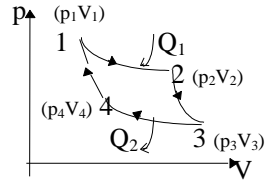


Рис. 23.3.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

Первая теорема Карно: коэффициент полезного действия цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и является функцией только абсолютных температур нагревателя и холодильника.

Вторая теорема Карно: любая тепловая машина, работающая при данных значениях температур нагревателя и холодильника, не может иметь большего КПД, чем машина, работающая по циклу Карно при тех же значениях температур нагревателя и холодильника.

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

24. Второе начало термодинамики.

Из соотношений (1) и (2) предыдущего параграфа видно, что к.п.д. тепловой машины меньше единицы. Наилучшей была бы машина с к.п.д., равным единице. Такая машина могла бы полностью превращать в работу всю полученную от некоторого тела теплоту, ничего не отдавая холодильнику. Она была названа *вечным двигателем второго рода*. Многочисленные опыты показали невозможность создания подобной машины. К такому выводу впервые пришел Сади Карно в 1824 г. В дальнейшем это детально

было изучено Р.Клаузиусом (1850 г.) и В.Кельвином (1852 г.), которые сформулировали *второе начало термодинамики*.

Формулировка Клаузиуса (1850): *Тепло не может самопроизвольно переходить от менее нагретого к более нагретому телу без каких-либо изменений в системе.*

Из этого определения не вытекает, что тепло не может передаваться от менее нагретого к более нагретому телу. Тепло передается от менее нагретого к более нагретому телу в любых холодильных установках, но передача тепла здесь не происходит самопроизвольно, так как при этом совершается работа.

Формулировка Томсона (Кельвина) (1851): *Невозможно преобразовать в работу всю теплоту, взятую от тела с однородной температурой, не производя никаких других изменений в состоянии системы.*

Здесь не вытекает, что теплота не может быть полностью обращена в работу. Например, при изотермическом процессе ($dU=0$) теплота полностью обращается в работу, но здесь еще происходит расширение газа, то есть происходят изменения в состоянии системы.

Видно, что приведенные формулировки эквивалентны.

Еще одна формулировка второго начала термодинамики: *невозможен вечный двигатель второго рода.*

Второе начало термодинамики позволяет разделить все термодинамические процессы на *обратимые* и *необратимые*. *Обратимыми* процессами являются процессы, протекающие с очень малой скоростью, в идеальном случае бесконечно медленно. В реальных условиях процессы протекают с конечной скоростью, и их можно считать обратимыми только с определенной точностью. Необратимость же является характерным свойством, вытекающим из самой природы тепловых процессов. Примером необратимых процессов являются все процессы, сопровождающиеся трением, процессы теплообмена при конечной разности температур, процессы растворения и диффузии. Эти все процессы в одном направлении протекают самопроизвольно, "сами собой", а для совершения каждого из этих процессов в обратном направлении необходимо, чтобы параллельно происходил какой-то другой, компенсирующий процесс. Следовательно, в земных условиях у событий имеется естественный ход, естественное направление.

Второе начало термодинамики определяет направление протекания термодинамических процессов и тем самым дает ответ на вопрос, какие процессы в природе могут протекать самопроизвольно. Оно указывает на необратимость процесса передачи одной формы энергии – работы в другую – теплоту. Работа – форма передачи энергии упорядоченного движения тела как целого; теплота – форма передачи энергии неупорядоченного хаотического движения. Упорядоченное движение может переходить в неупорядоченное самопроизвольно. Обратный переход возможен лишь при условии совершения работы внешними силами.

Вопросы
для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 5

1. Что понимают в термодинамике под внутренней энергией системы?
2. Как называется мера энергии, получаемой или отдаваемой телом в процессе теплоотдачи?
3. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию?
4. Сформулировать первое начало термодинамики
5. Между какими величинами устанавливается связь в первом законе термодинамики?
6. Что называют удельной теплоемкостью и какова ее размерность?
7. Что называют молярной теплоемкостью и какова ее размерность?
8. Что называют вечным двигателем первого рода?
9. Записать первый закон термодинамики для изохорного, изотермического, изобарного процесса.
10. Какие процессы называют адиабатными?
11. Что такое идеальная тепловая машина?
12. Что называют циклом Карно?
13. Какой цикл называется прямым?
14. Что определяет второе начало термодинамики?
15. Сформулировать второе начало термодинамики.
16. Что называют вечным двигателем второго рода?
17. Какой процесс называется обратимым?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 5

5.1. Удельная теплоемкость некоторого двухатомного газа $c_p = 14,7 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Найти молярную массу газа.

5.2. Вычислить удельные теплоемкости неона и водорода при постоянных объеме и давлении, принимая эти газы идеальным газом.

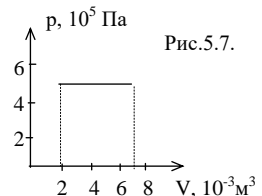
5.3. В стальном баллоне находится гелий массой $0,5 \text{ кг}$ при температуре 10°C . Как изменится внутренняя энергия гелия, если его температура повысится до 30°C ?

5.4. Какова внутренняя энергия 5 моль одноатомного газа при 10°C ?

5.5. Воздух находится под давлением $3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и занимает объем $0,6 \text{ м}^3$. Какая работа будет совершена при изобарном уменьшении его объема до $0,2 \text{ м}^3$?

5.6. Какую работу совершает идеальный газ в количестве 2 кмоль при его изобарном нагревании на 5°C ?

5.7. На рисунке приведен график зависимости давления газа от объема. Найдите работу газа при расширении.



5.8. Азот массой 12 г находится в закрытом сосуде объемом 2 л при температуре 10°C . После нагревания давление в сосуде стало равным 1,33 МПа. Какое количество теплоты сообщено газу при нагревании?

5.9. 6,5 г водорода, находящегося при температуре 27°C , расширяется вдвое при $p=\text{const}$ за счет притока тепла извне. Найти работу расширения газа, изменение внутренней энергии газа и количество теплоты, сообщенное газу.

5.10. Чему равно количество теплоты, полученное газом, если при уменьшении внутренней энергии на 100 Дж, газ совершил работу 300 Дж?

5.11. Чему равна работа, совершенная газом, если газ получил количество теплоты 300 Дж, а его внутренняя энергия увеличилась на 100 Дж?

5.11. В результате кругового процесса газ совершил работу 1 Дж и передал охладителю количество теплоты 4,2 Дж. Определить КПД цикла.

5.12. Тепловой двигатель получает от нагревателя за 1 секунду 7200 кДж теплоты и отдает холодильнику 5600 кДж. Определить КПД цикла.

5.13. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. При этом 80% количества теплоты, получаемого от нагревателя, передается холодильнику. Машина получает от нагревателя количество теплоты $Q_1=6,28$ кДж. Найти КПД цикла и работу, совершаемую за один цикл.

5.14. Оцените максимальное значение КПД, которое может иметь тепловая машина с температурой нагревателя 727°C и температурой холодильника 27°C .

5.15. Нагреватель тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, имеет температуру 200°C . Какова температура охладителя, если при получении от нагревателя количества теплоты 1 Дж машина совершает работу 0,4 Дж?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 5

1. Вывод уравнений Пуассона.
2. Политропные процессы.
3. Основные термодинамические потенциалы.
4. Энтропия. Критика теории тепловой смерти Вселенной
5. Понятие о термодинамике открытых систем.
6. *Термодинамика живых систем.*
7. *Физические процессы в биологических мембранах. Активный и пассивный транспорт.*

Тема 6. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

25. Свойства жидкого состояния вещества. Поверхностное натяжение жидкостей

Характер движения молекул в жидкостях существенно отличается от движения молекул в газах и твердых телах. С молекулярно-кинетической точки зрения газообразное состояние вещества характеризуется большими средними расстояниями между молекулами. Тепловое движение молекул газа сводится к свободному движению на длине свободного пути, в несколько раз превышающем размеры своих молекул. В твердых телах каждая частица (атом, ион) колеблется около своего положения равновесия, причем в идеальной решетке все возможные "места" для частиц заняты. В жидкостях молекулы располагаются гораздо ближе друг к другу, чем в газах, но в ней имеются свободные места - "дырки", благодаря чему молекулы могут перемещаться, покидая свое место и занимая одну из свободных "дырок". Приведенная модель жидкости предполагает проявление в жидком состоянии вещества некоторых свойств, сходных со свойствами как газов, так и твердых тел.

Жидкости, подобно твердым телам, обладают определенным объемом, подобно газам, принимают форму сосуда, в котором они находятся. Характерной особенностью жидкости является ее способность иметь свободную поверхность (не ограниченную твердыми стенками). Поверхность жидкости находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. Если мысленно выделить в жидкости какую-либо молекулу, то необходимо учесть действие на нее всех других молекул. Однако силы взаимодействия между молекулами быстро убывают с расстоянием, так что практически достаточно учесть действие лишь молекул, расположенных достаточно близко.

Рассмотрим две молекулы внутри жидкости (см. рис. 25.1). Пусть r – расстояние, при котором рассматриваемая молекула взаимодействует с соседней молекулой. Если молекула находится на расстоянии, большем чем r , то взаимодействия нет. Такой радиус называют *радиусом молекулярного взаимодействия*, а сфера этого радиуса – *сферой молекулярного действия*. Величина r имеет порядок нескольких молекулярных диаметров ($\sim 10^{-9}$ м). В жидкости в сферу молекулярного действия, проведенную вокруг данной молекулы I , попадает большое число других молекул. Силы, с которыми эти молекулы действуют на молекулу I , направлены в различные стороны и в среднем компенсируются. Таким образом, результирующая, действующая на молекулу внутри жидкости со стороны других молекул, в среднем равна нулю.

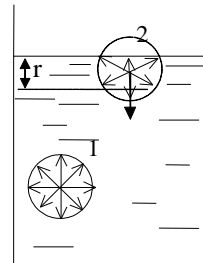
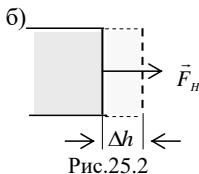
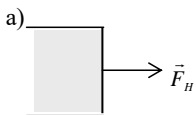


Рис.25.1.

Иначе обстоит дело с молекулами 2, расположенными от поверхности жидкости на расстоянии, меньшем радиуса молекулярного действия r . Сфера молекулярного действия лишь частично окажется внутри жидкости, часть ее будет лежать вне жидкости. Если над поверхностью жидкости будет находиться вещество в газообразном состоянии, например, пар данной жидкости, то окажется, что на молекулу 2 действует с разных сторон неодинаковое число молекул. Силы, действующие на молекулу 2, в среднем не будут компенсированы, возникнет результирующая сила F , направленная внутрь жидкости. То есть, на каждую молекулу, лежащую на поверхности жидкости, меньшем радиуса молекулярного действия r , со стороны других молекул действует сила, направленная внутрь жидкости. На весь слой, лежащий у поверхности жидкости, имеющий толщину, равную радиусу молекулярного действия, действуют силы, направленные нормально к поверхности внутрь жидкости. Его называют *поверхностным слоем*. Он оказывает на всю жидкость давление, называемое *молекулярным давлением*. Если бы на жидкость не действовали никакие другие силы, равновесным состоянием поверхности оказалось бы такое, при котором силы молекулярного давления были бы нормальными к поверхности. В этом случае масса жидкости должна принять сферическую форму. Действительно, малые капли жидкости, для которых роль силы тяжести мала, принимают вид правильных сфер.

Можно сказать, что силы молекулярного давления стремятся уменьшить поверхность жидкости. Тогда поверхностный слой жидкости можно уподобить растянутой пленке, стремящейся сжаться. Чтобы удержать пленку в равновесии, надо нормально к линии, ограничивающей ее поверхность, приложить силу, *касательную* к поверхности жидкости (рис.25.2 а). Эта сила F_H называется силой поверхностного натяжения.



Очевидно, чем больше ограничивающая линия, тем больше сила:

$$F_H = \sigma l, \quad (1)$$

где σ – коэффициент пропорциональности, зависящий от природы жидкости и получивший название коэффициента поверхностного натяжения.

Теперь предположим, что граница пленки увеличилась за счет перемещения параллельно самой себе на отрезок Δh (рис.25.2 б). Тогда совершенная работа ΔA равна: $\Delta A = F_H \Delta h$. Используя (1), получим

$$\Delta A = F_H \Delta h = \sigma \Delta h = \sigma \Delta S$$

где $\Delta S = l \Delta h$ – увеличение площади пленки. Таким

$$\sigma = \Delta A / \Delta S$$

образом,

Коэффициент поверхностного натяжения измеряется работой, необходимой для увеличения площади поверхности жидкости при постоянной температуре на единицу.

$$[\sigma] = \text{Дж/м}^2 = \text{Н/м}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения может быть определен также как величина, равная силе, действующей по касательной к поверхности жидкости, приходящейся на единицу длины линии раздела.

Большинство жидкостей при температуре 300 К имеет поверхностное натяжение порядка 10^{-2} - 10^{-1} Н/м. Поверхностное натяжение с повышением температуры уменьшается, так как увеличиваются средние расстояния между молекулами жидкости.

Поверхностное натяжение зависит от примесей, имеющихся в жидкостях. Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение жидкости, называются—*поверхностно-активными*. Наиболее известным поверхностно-активным веществом отношению к воде является мыло. Оно сильно уменьшает ее поверхностное натяжение (примерно с $7,3 \cdot 10^{-2}$ до $4,5 \cdot 10^{-2}$ Н/м). Поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение воды, являются также спирты, эфиры, нефть и др.

26. Явления на границе жидкости и твердого тела. Капиллярность.

Из опыта известно, что капля воды растекается на стекле и принимает форму, изображенную на рис.26.1, в то время как ртуть на той же поверхности превращается в несколько сплюснутую каплю. В первом случае говорят, что жидкость *смачивает* твердую поверхность, во втором – *не смачивает* ее. Смачивание зависит от характера сил, действующих между молекулами поверхностных слоев соприкасающихся сред. Для смачивающей жидкости силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем между молекулами самой жидкости, и жидкость стремится увеличить поверхность соприкосновения с твердым телом. Для несмачивающей жидкости силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела меньше, чем между молекулами жидкости, и жидкость стремится уменьшить поверхность своего соприкосновения с твердым телом.

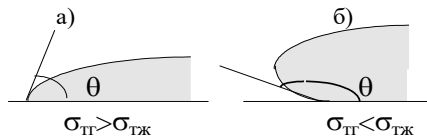


Рис.26.1.

Для определения условий смачивания введем понятие краевого угла. *Краевой угол* - это отсчитываемый внутри жидкости угол между касательными к поверхности твердого тела и к поверхности жидкости.

Если жидкость неограниченно растекается по поверхности твердого тела, имеет место *полное смачивание*. При полном смачивании краевого

угол равен нулю. Если краевой угол острый, то имеет место *частичное смачивание* (рис. 26.1а)

Если поверхность, по которой жидкость граничит с твердым телом, стягивается в точку, жидкость отделяется от твердой поверхности – имеет место *полное несмачивание*. При полном несмачивании краевой угол равен π . Если краевой угол тупой, то имеет место *частичное несмачивание* (рис. 26.1б).

Смачивание или несмачивание жидкостью твердого тела приводит к тому, что вблизи стенок сосуда наблюдается искривление поверхности жидкости. В узкой трубке (капилляре) или в узком зазоре между двумя стенками искривленной оказывается вся поверхность. Если жидкость смачивает стенки, поверхность имеет вогнутую форму, если не смачивает – выпуклую. Такого рода поверхности называют *менисками*.

Изменение высоты уровня жидкости в узких трубках или зазорах получило название *капиллярности*. (Лат. capillus означает волос. Капилляр – «трубка, тонкая, как волос»). Капиллярами также называют микроскопические кровеносные или лимфатические сосуды, стенка которых состоит из одной клетки.

Из-за искривления поверхности жидкости в капилляре появляется капиллярное давление, или давление Лапласа. Для выпуклой поверхности давление положительно, для вогнутой – отрицательно. Для сферической поверхности величина этого давления определяется по формуле:

$$p = \frac{2\sigma}{R}.$$

Если опустить капилляр в смачиваемую жидкость, то жидкость в нем поднимается. Между жидкостью в капилляре и широком сосуде устанавливается разность уровней h , при которой капиллярное (добавочное)

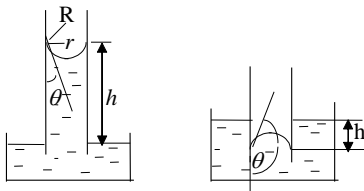


Рис. 26.2

давление уравнивается гидростатическим: $\frac{2\sigma}{R} = \rho gh$. Здесь R – радиус мениска. Выразим его через краевой угол θ и радиус капилляра r :

$$R = r / \cos \theta.$$

Тогда высота поднятия жидкости в капилляре:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}.$$

Смачивающая жидкость ($\theta < \pi/2$, $\cos \theta > 0$) поднимается по капилляру, и эта формула дает положительное значение h , а несмачивающая жидкость ($\theta > \pi/2$, $\cos \theta < 0$) опускается по капилляру, и формула дает отрицательные

значения h . Из полученного выражения видно, что высота поднятия (опускания) жидкости в капилляре обратно пропорциональна его радиусу.

Капиллярные явления имеют большое значение в природе и технике. Например, влагообмен в почве и в растениях осуществляется за счет поднятия воды по тончайшим капиллярам. В капилляре переменного сечения капля смачиваемой жидкости под воздействием разности лапласовских давлений втягивается в сторону его утончения. Этим объясняется т.н. расклинивающее действие смачивающих жидкостей: жидкости, проникая в микротрещины, увеличивают их и тем самым понижают прочность твердых тел.

27. Жидкие растворы. Осмотическое давление.

Сравнительно редко встречаются жидкости чистые, то есть содержащие частицы одного вида. Большинство жидкостей являются смесью различных веществ. Если одно из них содержится в такой смеси в количестве много большем, чем другие, то смесь называется *раствором*, а преобладающее вещество является *растворителем*. Рассмотрим *жидкие* растворы, причем ограничимся случаем *бинарных* растворов, состоящих только из двух веществ - *растворителя* и *растворенного вещества*.

В жидкостях могут растворяться твердые вещества, жидкости, газы. При образовании раствора молекулы растворенного вещества равномерно распределяются между молекулами растворителя, в результате образуется однородная по физическим свойствам система.

Количественно растворы характеризуются концентрацией. Весовая концентрация - отношение массы растворенного вещества к массе всего растворителя. Молярная концентрация - отношение числа молей растворенного вещества к общему числу молей в растворе.

Если раствор разбавленный (концентрация мала), то расстояния между молекулами растворенного вещества будут намного больше их размеров, вследствие чего поведение растворенного вещества в слабом растворе подобно поведению идеального газа. Растворенное вещество должно оказывать на стенки сосуда такое же давление, какое оказывает газ на стенки сосуда. Парциальное давление растворенного вещества называется осмотическим давлением и обозначается $p_{осм}$. Его можно определить из уравне-

ния Менделеева-Клапейрона:

$$p_{осм} = \frac{m RT}{\mu V},$$

где m – масса растворенного вещества в растворе, μ – молярная масса вещества, V – объем раствора. Величина $C = m / \mu V$ определяет количество растворенного вещества в единице объема раствора, или молярная концентрация. С использованием этого обозначения выражение для осмотического давления можно записать и в следующем виде:

$$p_{осм} = CRT \quad (1)$$

Это выражение называется законом Вант-Гоффа (1887 г.): *осмотическое давление, оказываемое растворенным веществом, равно давлению, которое производило бы это же вещество в газообразном состоянии в том же объеме и при той же температуре.*

Для того чтобы обнаружить осмотическое давление, используют полупроницаемые перегородки, которые свободно пропускают растворитель, но задерживают молекулы растворенного вещества (рис.27.1).

В сосуде а, опущенном в воду находится раствор сахара. Дном этого сосуда служит полупроницаемая перегородка П. Верхняя часть сосуда оканчивается длинной трубкой б. В начале сосуд располагают так, чтобы верхний уровень раствора в нем совпадал бы с уровнем воды сс, в которую опущен прибор. В течение нескольких часов наблюдается поднятие уровня жидкости в трубке б. Под воздействием осмотического давления уровень раствора поднимается до тех пор, пока гидростатическое давление поднявшегося столба жидкости не окажется равным осмотическому давлению раствора сахара: $p_{осм} = \rho gh$, где ρ – плотность раствора. Поднятие раствора в трубке связано с засасыванием воды в сосуд через полупроницаемую перегородку.

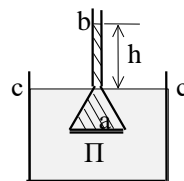


Рис.27.1

Измеряя таким образом осмотическое давление, Вант-Гофф установил, что оно в соответствии с уравнением (1) пропорционально концентрации растворенного вещества и температуре.

Для слабых растворов многих веществ закон Вант-Гоффа выполняется хорошо. Однако в ряде случаев, например растворов солей, осмотическое давление оказывается значительно больше вычисленного по (1). Это объясняется электролитической диссоциацией - распадом молекул на ионы. В результате возрастает число частиц, создающих осмотическое давление, соответственно возрастает и само осмотическое давление. Оно может быть определено по следующему соотношению: $p = (1 + \alpha(k - 1))CRT$,

где k – число ионов, на которые распадается одна молекула, α – коэффициент диссоциации (отношение числа распавшихся молекул к первоначальному числу). Осмотическое давление играет большую роль в процессах, происходящих в живых организмах. Это объясняется тем, что оболочки клеток животных и растений представляют собой полупроницаемые перегородки, а жидкость – растворы различных солей.

28. Кристаллические и аморфные тела. Физические типы кристаллов.

Твердыми телами называются тела, которые обладают постоянством формы и объема. Различают кристаллические и аморфные твердые тела. Подавляющее большинство твердых тел в природе имеет кристаллическое строение (например, почти все минералы, металлы).

Рассмотрим отличительные особенности кристаллического состояния.

1. Самой характерной чертой кристаллических веществ является свойство **анизотропии**. Она заключается в зависимости ряда физических свойств (например, механических, тепловых, электрических, оптических) от направления. Тела, свойства которых одинаковы по всем направлениям, называются **изотропными**. Газы, почти все жидкости и аморфные тела изотропны. Аморфные тела ведут себя как жидкости, но только потерявшие свойство текучести. Некоторые вещества могут находиться и в кристаллическом, и в аморфном состоянии. Например, сера, которая в кристаллическом состоянии имеет минимальную энергию, поэтому кристаллическое состояние у серы устойчиво, а аморфное – нет.

Существует большая группа веществ, которые аморфными не являются, но обладают свойством изотропии. Это поликристаллические вещества. К ним относятся все металлы. Поликристалл состоит из плотно расположенных кристалликов. Изотропия объясняется беспорядком в расположении этих кристалликов. Большие одиночные кристаллы, которые получают из расплава или раствора, называются *монокристаллами*. Идеальный монокристалл можно представить себе как периодическую структуру, называемую *кристаллической решеткой*.

2. Второй характерный признак, отличающий кристаллы от аморфных тел, – это поведение при расплавлении. Пусть тело равномерно нагревается и количество подводимого тепла постоянно. Тогда графически поведение кристалла и аморфного будет выглядеть так, как изображено на рис.28.1.

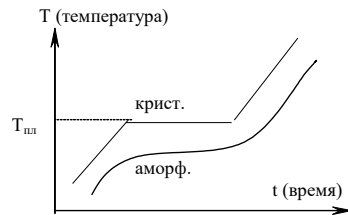


Рис.28.1.

3. Кристаллические тела имеют правильную геометрическую форму, а аморфные нет. Если же форма кристалла нарушена условиями роста и механической обработки, то принадлежность образца к кристаллам может быть определена по следующим особенностям: 1) поверхность скола есть плоскость; 2) постоянство углов между плоскостями скола.

В зависимости от рода частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки, и характера сил взаимодействия (притяжения) между ними кристаллы разделяются на четыре типа: ионные, атомные, молекулярные, металлические. Силы отталкивания обусловлены деформациями электрон-

ных оболочек ионов, атомов, молекул, то есть имеют единую природу для всех типов кристаллов.

1. *Ионными* называют кристаллы, в узлах которых находятся ионы чередующихся знаков. Силы притяжения обусловлены электростатическим притяжением зарядов. Связь, обусловленная кулоновскими силами притяжения между разноименными заряженными ионами, называется *ионной* (или *гетерополярной*). В ионной решетке нельзя выделить отдельные молекулы: кристалл представляет собой как бы одну гигантскую молекулу. Примерами ионных кристаллов являются такие соединения как $NaCl$, $CsCl$, MgO , CaO .

2. Атомными называют такие кристаллы, в узлах кристаллической решетки которых расположены *атомы*. Силы притяжения обусловлены существующими между атомами *ковалентными связями* (или *гомеополярными*). Эти связи имеют квантово-механическое происхождение (когда два электрона принадлежат двум атомам и они неразличимы). Примеры ковалентных кристаллов – алмаз и графит (два различных состояния углерода), кремний, германий, некоторые неорганические соединения (ZnS , BeO и др.)

3. Молекулярные кристаллы – в узлах кристаллической решетки расположены нейтральные *молекулы*. Силы притяжения в них обусловлены силами Ван-дер-Ваальса, то есть незначительным смещением электронов в электронных оболочках атомов. Примеры молекулярных кристаллов – кристаллы инертных газов (Ne , Ar , Kr , Xe), лед, сухой лед CO_2 , а также газы O_2 , N_2 в твердом состоянии. Ван-дер-ваальсовы силы довольно слабые, поэтому молекулярные кристаллы легко деформируются и разрушаются.

4. Решетки металлов – в узлах кристаллической решетки расположены положительные ионы металла, то есть элементы, потерявшие 2 или 3 электрона. Эти электроны находятся в движении и образуют своего рода идеальный газ электронов, которые удерживаются в электростатическом поле, создаваемом решеткой положительно заряженных ионов металлов. Это т.н. электроны проводимости. Они обуславливают электропроводность металлов. Кроме того, по структуре металлы являются поликристаллическими, этим объясняется шероховатая поверхность скола.

Кроме вышеуказанных типов связей между частицами в кристаллах возможны смешанные связи. Различные комбинации взаимодействий создают многообразие в строении кристаллов.

29. Равновесие фаз. Фазовые переходы. Диаграмма состояния.

Фазой называется часть системы, однородная по физическим и химическим свойствам. Одно и то же по химическому составу вещество может находиться в разных фазах. При определенных условиях (равенство давлений, температур, химических потенциалов) фазы могут находиться в равновесии друг с другом. Состояния равновесия двух фаз изобразятся на диа-

грамме (р,Т) линией. Три фазы одного и того же вещества могут находиться в равновесии только при единственных значениях температуры и давления, которым на диаграмме (р,Т) соответствует тройная точка. Эта точка лежит на пересечении кривых равновесия фаз, взятых попарно.

Переход из одной фазы в другую – *фазовый переход* – всегда связан с качественными изменениями свойств вещества. Примером фазового перехода могут служить изменения агрегатного состояния вещества или переходы, связанные с изменением в составе, строении и свойствах вещества (например, переход кристаллического вещества из одной модификации в другую).

Различают фазовые переходы двух родов. *Фазовый переход I рода* (например, плавление, кристаллизация, испарение, конденсация и т. д.) сопровождается поглощением или выделением теплоты и изменением плотности. Фазовые переходы I рода характеризуются постоянством температуры, изменениями энтропии. Например, при плавлении телу можно сообщить некоторое количество теплоты, чтобы вызвать разрушение кристаллической решетки. Подводимая при плавлении теплота идет не на нагрев тела, а на разрыв межатомных связей, поэтому плавление протекает при постоянной температуре. При этом система переходит из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное, поэтому энтропия возрастает. Если переход происходит в обратном направлении (кристаллизация), то система теплоту выделяет.

Фазовые переходы, не связанные с поглощением или выделением тепла и изменением объема, называются **фазовыми переходами II рода**. Эти переходы характеризуются постоянством объема и энтропии, но скачкообразным изменением теплоемкости. Примерами фазовых переходов II рода являются: превращение обыкновенного жидкого гелия (гелия I) при $T=2,9\text{K}$ в другую жидкую модификацию (гелий II), обладающую свойствами сверхтекучести.

Для наглядности изображения фазовых превращений используется **диаграмма состояния**. На рисунке 29.1. изображена примерная диаграмма состояний некоторого вещества. Линиями $AT_{\text{тр}}$ (кривая плавления), $BT_{\text{тр}}$ (кривая сублимации), $KT_{\text{тр}}$ (кривая испарения) поле диаграммы делится на три области, соответствующие условиям существования твердой, жидкой и газообразной фаз. Точка $T_{\text{тр}}$ – тройная точка. По фазовой диаграмме легко определить, в каком состоянии находится данное вещество при заданных условиях (р и Т). Точка К на кривой равновесия жидкой и газообразной фаз – критическая точка, которая соответствует *критическому состоянию* (состоянию, при котором исчезает различие между жидкостью и паром).

При испарении жидкостей и сублимации твердых тел объем вещества всегда возрастает, поэтому увеличение давления приводит к повышению температуры плавления (рис.29.1, а). Для некоторых же веществ (вода, германий, чугун, висмут и др.) объем жидкой фазы меньше объема твердой фазы, следовательно, увеличение давления сопровождается понижением температуры плавления (рис.29.1, б).

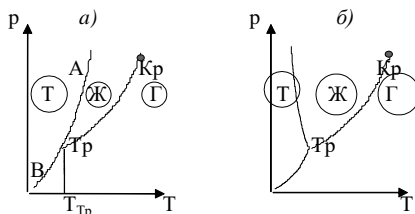


Рис. 29.1.

На диаграмме удобно изображать также процессы изменения состояния вещества. Проследим изобарическое ($p=\text{const}$) нагревание вещества, находящегося в твердом состоянии 1 (см. рис.29.2). При температуре, соответствующей точке 2, тело начинает плавиться, при температуре, соответствующей точке 3, – испаряться. При дальнейшем повышении температуры целиком переходит в газообразное состояние. Если же вещество находится в твердом состоянии, то при изобарном нагревании (штриховая прямая 5-6), кристалл превращается в газ минуя жидкую фазу. Из состояния 7 при изотермическом сжатии вещество проходит следующие три состояния: газ–жидкость–кристаллическое состояние. Возможен также непрерывный переход вещества из жидкого состояния в газообразное и обратно в обход критической точки, без пересечения кривой испарения (переход 4-8), то есть такой переход, который не сопровождается фазовыми превращениями. Это возможно благодаря тому, что различие между газом и жидкостью является чисто количественным (оба эти состояния, например, являются изотропными). Переход же кристаллического состояния (характеризуется анизотропией) в жидкое или газообразное может быть только скачкообразным (в результате фазового перехода), поэтому кривые плавления и сублимации не могут обрываться, как это имеет место для кривой испарения в критической точке. Кривая плавления уходит в бесконечность, а кривая сублимации идет в точку, где $p=0$ и $T=0$ К.

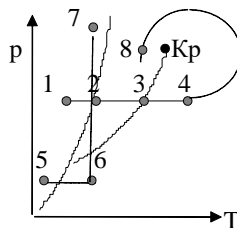


Рис.29.2

Вопросы

для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 6

1. Что называют радиусом молекулярного действия?
2. Чему равна толщина поверхностного слоя?
3. Дать определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.
4. В чем измеряется коэффициент поверхностного натяжения?
5. Как направлена сила поверхностного натяжения?
6. В каком случае жидкость смачивает твердое тело?
7. Каким должен быть краевой угол при частичном смачивании и частичном несмачивании?
8. Чему равен краевой угол при полном смачивании и полном несмачивании?
9. Какие явления называют капиллярными?
10. По какой формуле определяется высота поднятия жидкостей в капилляре?
11. Что такое осмотическое давление?
12. Закон Вант-Гоффа для недиссоциирующих растворов.
13. Что представляет собой молярная концентрация в законе Вант-Гоффа?
14. Какое явление называется диссоциацией?
15. Каковы отличия кристаллических твердых тел от аморфных?
16. Что называется анизотропией и изотропией?
17. Перечислить физические типы кристаллов.
18. Чем обусловлены силы притяжения в ионных, ковалентных, молекулярных и металлических кристаллах?
19. Дать определение фазы.
20. Что называют фазовыми переходами первого и второго рода?
21. Что такое критическое состояние?
22. Изобразить диаграмму равновесия твердой, жидкой и газообразной фаз.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ТЕМЕ 6

6.1. На нижнем конце капилляра повисла капля воды, имеющая вид шарика диаметром 4 мм. Найти диаметр капилляра.

6.2. Найти добавочное давление внутри мыльного пузыря диаметром 10 см. Определить работу, которую нужно совершить, чтобы выдуть этот пузырь.

6.3. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на высоту 20 мм. Определить поверхностное натяжение глицерина, если диаметр канала трубки равен 1 мм.

6.4. Каким должен быть внутренний диаметр капилляра, чтобы при полном смачивании вода в нем поднималась на 2 см? Задачу решить, когда капилляр находится а) на Земле; б) на Луне.

6.5. В капиллярной трубке радиусом 0,5 мм жидкость поднялась на 11 мм. Найти плотность данной жидкости, если ее коэффициент поверхностного натяжения 22 мН/м.

6.7. Деревянная палочка длиной 4 см и массой 1 г покоится на поверхности воды. По одну сторону ее осторожно налили мыльный раствор. С каким ускорением начнет двигаться палочка?

6.8. Осмотическое давление раствора при температуре 27°C равно 0,2 МПа. Сколько частиц растворенного вещества находится в растворе объемом 1 л?

6.9. Для увеличения осмотического давления раствора нужно увеличить концентрацию раствора в 1,3 раза. На сколько градусов необходимо нагреть раствор, чтобы, не изменяя его концентрации, получить такое же увеличение осмотического давления? Начальная температура раствора 0°C.

6.10. 40 г сахара ($C_{12}H_{22}O_{11}$) растворено в 0,5 л воды. Температура раствора равна 50°C. Чему равно осмотическое давление?

6.11. Осмотическое давление раствора, находящегося при температуре 87°C, 165 кПа. Какое число молекул воды приходится на одну молекулу растворенного вещества в этом растворе? Диссоциация молекул вещества отсутствует.

6.12. Поваренная соль массой 3 г растворена в воде объемом 1 л при температуре 30°C. Осмотическое давление при этих условиях оказалось 0,17 МПа. Какова степень диссоциации молекул соли?

6.13. Степень диссоциации молекул поваренной соли при растворении ее в воде 0,4. При этом осмотическое давление раствора, находящегося при температуре 27°C, 118,6 кПа. Какая масса поваренной соли растворена в 1 л воды?

6.15. Какое количество сульфата натрия (Na_2SO_4) нужно растворить в 1 л воды при 298К, чтобы осмотическое давление оказалось равным 260 кПа?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 6

1. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса.
2. Потенциальная кривая взаимодействия молекул
3. Внутренняя энергия реального газа.
4. Структура жидкостей. Типы упорядочения в жидкостях.
5. Примеры кристаллических структур различных типов.
6. Тепловые колебания атомов в кристаллах, понятие о фононах.
7. Механизм теплопроводности кристаллов.
8. Теория теплоемкости твердых тел. Формула Дюлонга–Пти, понятие о теории Эйнштейна–Дебая.
9. Типы дефектов твердого тела: точечные дефекты, дислокации.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ***а) основная литература:***

1. Бордовский Г.А. Физические основы естествознания. – М.: Дрофа, 2004.
2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.1–Т.3–М.: Наука, 1974.
3. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. – М.: Дрофа, 2002.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2000.
5. Волькенштейн В.С. Сборник задач по физике. – М.: Наука, 1985.
6. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2006.

б) дополнительная литература:

1. Дмитриева В.Ф., Прокофьев В.Л. Основы физики. – М.: Высшая школа, 2001.
2. Кибец И.Н., Кибец В.И. Физика: Справочник. – Харьков: Фолио; Ростов-на-Дону:Феникс, 1997.
3. Макаренко Г.М. Физика. Т.1.–Мн.: ДизайнПРО, 1997.
4. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики. –М.: Высшая школа, 1999.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Физика. – М.: Дрофа, 1999.
6. Гельфгат И.М., Генденштейн Л. Э., Кирик Л. А. 1001 задача по физике. – М.: «Илекса», 2001.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.	3
МЕХАНИКА	
Введение. Предмет физики. Основная задача механики.	3
Тема 1. КИНЕМАТИКА	
1. Механическое движение.	4
2. Скорость и ускорение.	5
3. Кинематика материальной точки при прямолинейном движении.	6
4. Кинематика материальной точки при криволинейном движении.	8
Вращательное движение.	8
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 1</i>	9
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 1.</i>	10
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 1.</i>	11
Тема 2. ДИНАМИКА. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ.	
5. Законы Ньютона.	12
6. Преобразования Галилея. Механический принцип относительности.	13
7. Силы в природе.	14
8. Импульс тела. Закон сохранения импульса.	16
9. Работа и мощность.	18
10. Механическая энергия и закон ее сохранения.	19
11. Механика твердого тела	21
12. Элементы гидроаэромеханики.	24
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 2</i>	26
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 2.</i>	27
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 2.</i>	29
Тема 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	
13. Колебательное движение. Гармонические колебания. Динамика колебательного движения.	30
14. Энергия гармонических колебаний. Затухающие колебания. Вынужденные колебания.	32
15. Механические волны.	34
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 3</i>	35
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 3.</i>	36
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 3.</i>	36
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	
<i>Введение. Статистический и термодинамический методы исследования вещества.</i>	37

Тема 4. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

16. Идеальный газ. Основное уравнение кинетической теории газов. Закон Дальтона.	38
17. Газовые законы. Уравнение Менделеева-Клапейрона.	39
18. Барометрическая формула.	40
19. Распределение энергии по степеням свободы.	41
20. Явления переноса в газах.	43
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 4</i>	44
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 4.</i>	45
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 4.</i>	46

Тема 5. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

21. Внутренняя энергия термодинамической системы. Работа и теплота в термодинамике.	47
22. Первое начало термодинамики и его применение для различных процессов.	48
23. Тепловая машина. Цикл Карно.	50
24. Второе начало термодинамики.	52
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 5</i>	54
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 5.</i>	55
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 5.</i>	56

Тема 6. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

25. Свойства жидкого состояния вещества. Поверхностное натяжение жидкостей.	56
26. Явления на границе жидкости и твердого тела. Капиллярность.	58
27. Жидкие растворы. Осмотическое давление.	60
28. Кристаллические и аморфные тела. Физические типы кристаллов.	62
29. Равновесие фаз. Фазовые переходы. Диаграмма состояния.	63
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 6</i>	66
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 6.</i>	66
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 6.</i>	67
<i>Список рекомендованной литературы.</i>	68

Сабилова Файруза Мусовна

Механика. Молекулярная физика и термодинамика.

Учебно-методическое пособие по физике для студентов биологического факультета.

Технический редактор Сабилова Ф.М.

Сдано в печать 28.08.2008 г. Формат 84x108/82. Объем 4,5 п.л. Тираж 500 экз. Отпечатано 10.12.2007 г. Типография ЕГПУ.

Издательство ЕГПУ.

423630, г.Елабуга, ул.Казанская, 89.