Домашняя работа по физике за 10 класс

к учебнику
«Физика. 10 кл.: Учебник для общеобразоват. учеб. заведений
Касьянов В.А.
М.: Дрофа, 2003 г.»

учебно-методическое пособие

ВВЕДЕНИЕ

1 Физика в познании вещества, поля, пространства и времени

§ 1. Что изучает физика

ВОПРОСЫ

1. Можно считать, что физика как наука экспериментальная возникла из астрономии. Движения небесных тел, солнечные и лунные затмения, повторяемость астрономических событий, смена дня и ночи, смена времен года и т.п. позволило ученым получить данные для количественного анализ и объяснения многих законов природы.

2. Физика изучает основные закономерности природных явлений.

3. Он первым поставил физические эксперименты и попытался дать им теоретическое обоснование.

§ 2. Органы чувств как источник информации об окружающем мире

ВОПРОСЫ

1. Потому что органы чувств человека формировались так, чтобы обеспечить ему необходимый уровень адаптации к окружающему миру.

2. Органы чувств человека имеют довольно узкий диапазон, поэтому человек не может получить достаточно полную информацию об окружающем мире. Так для открытия многих явлений ученым приходилось пользоваться специальными приборами.

3. Органы осязания не позволяют человеку различать малую шероховатость предметов или близкие температуры.

Вкусовые рецепторы, а также органы обоняния, реагируют только на определенные вещества и соединения.

Слуховые органы человека воспринимают сигналы только в диапазоне от 16 Гц до 20 кГц.

4. От $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ до $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ м.

5. Человек получает информацию об окружающем мире не только напрямую через органы чувств, но и с помощью приборов, способных значительно увеличить диапазон восприятия органов чувств.

§ 3. Эксперимент. Закон. Теория

ВОПРОСЫ

1. Физический закон — соотношение между природными явлениями, условиями при которых они проявляются, установленное, как правило, путем имперических наблюдений.

2. Ценность фундаментальных законов в том, что с их помощью можно описать физические явления различной природы.

3. Физическая теория включает в себя постулаты, определения физических понятий, гипотезы, законы.

4. Преемственность фундаментальной теории заключается в том, что более общая теория включает в себя некую частную теорию, определяя границы ее применимости.

5. Эксперимент может опровергнуть теорию. Если результат эксперимента не противоречит теории, то можно считать, что он ее подтверждает.

§ 4. Физические модели

ВОПРОСЫ

1. Любая теория разрабатывается для физической модели, а значит, границы применимости теории определяются пределами, в которых может быть использована данная модель.

2. Физическая модель — упрощенное абстрактное описание физической системы, включающее в себя то главное, что необходимо учитывать в теории.

3. Материальная точка, идеальный газ, абсолютно твердое тело.

4. Если результат эксперимента в пределах погрешности совпадает с предсказанием теории, то можно считать, что модель правильно описывает физическое явление.

5. Теория описывает только физические модели, а не реальное поведение тел, так как учесть все факторы, влияющие на систему невозможно. В этом и заключается связь модели и теории.

§ 5. Симметрия и физические законы

ВОПРОСЫ

1. Инварианты — величины остающиеся постоянными в результате тех или иных преобразований или с течением времени.

2. Время, масса, электрический заряд.

3. Непрерывной симметрией обладает вращающийся вокруг любого своего диаметра диск или шар. Дискретной симметрией обладает снежинка, любой правильный многоугольник, любой симметричное тело.

4. Если в результате каких-то преобразований некоторая величина, характеризующая систему, остается постоянной, то говорят, что система обладает симметрией.

5. Однородность физического пространства (все точки пространства эквивалентны), изотропность (все направления равноправны)

§ 6. Идея атомизма

ВОПРОСЫ

1. Демокрит первым выдвинул гипотезу о том, что все вещества состоят из маленьких неделимых частиц — атомов.

2. Опыты Дальтона подтвердили гипотезу Демокрита. Из них следовало, что каждому веществу соответствует свой набор атомов.

3. Около 110.

4. Планетарная модель атома потому и получила такое название, что напоминает Солнечную систему, только в центре располагается ядро, а по орбитам вокруг него вращаются электроны.

5. Лептоны (легкие частицы), адроны (тяжелые частицы) и переносчики взаимодействий между частицами.

§ 7. Фундаментальные взаимодействия

ВОПРОСЫ

1. Гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное.

2. Гравитационное для всех, слабое для всех, кроме фотона, электромагнитное только для заряженных частиц, сильное только для адронов.

3. Дальнодействующие – гравитационное и электромагнитное (проявляется на любом расстоянии). Короткодействующие – слабое (порядка 10^{-17} м) и сильное (порядка 10^{-15} м).

4. Гравитационное взаимодействие определяет движение звезд, планет, галактик, а также наличие атмосферы.

Слабое взаимодействие определяет реакции радиоактивного распада, термоядерного синтеза.

Электромагнитное взаимодействие объединяет элементарные частицы в атомы, атомы и молекулы в различные вещества. Результатом электромагнитного взаимодействия являются силы трения, упругости, вязкости и многие другие.

Сильное взаимодействие определяет связь нуклонов в ядре атома.

5. Сильное, слабое и электромагнитное.

§ 8. Единицы физических величин

ВОПРОСЫ

1. Базовыми или основными называют такие величины, через которые выражаются все остальные.

2. По мнению автора учебника, длина характеризует протяженность или расстояние в пространстве. Эталон метра – расстояние, которое проходит свет в вакууме за $\frac{1}{299\,792\,458}$ с.

Размеры окружающих нас бытовых предметов можно измерять с помощью прикладывания линейки, методом триангуляции или локации можно измерить расстояния до звезд или Луны. Для измерения очень маленьких расстояний используют микроскопы (для еще меньших расстояний – ионные микроскопы).

3. Время есть мера скорости развития событий. Но само понятие скорости вводится через время. Поэтому такую формулировку нельзя считать определением.

4. Во многих учебниках сказано, что время — это одна из форм существования материи.

Масса — это мера количества вещества, мера инертности, мера гравитационных свойств тела. Эталоном килограмма является платиново-иридиевый цилиндр.

5. Кратные: 1 мега метр: 1 Мм = 10^6 м
1 килограмм: 1 кг = 10^3 г
Дольные: миллисекунда: 1 мс = 10^{-6} с
Нанометр: 1 нм – 10^{-9} м.

МЕХАНИКА

2 Кинематика материальной точки

§ 9. Траектория. Закон движения

ВОПРОСЫ

1. Механическое движение — изменение положение тела относительно других тел или частей тел в пространстве с течением времени.

2. Тело, обладающее некоторой массой, формой и размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

3. Система отсчета включает в себя тело отсчета, связанную с ним систему координат и часы.

4. Не обязательно, они могут находиться в точке пересечения траекторий в разные моменты времени. Но если они окажутся в этой точке в один и тот же момент, то они столкнутся.

5. Совокупность координат в указанный момент времени.

§ 10. Перемещение

ВОПРОСЫ

1. Вектор перемещения — направленный отрезок, проведенный из начального положения материальной точки в ее конечное положение. Перемещением характеризуется изменение радиус-вектора точки.

2. Вектора перемещений складываются по правилу треугольника или параллелограмма.

3. При прямолинейном движении в одном направлении.

4. Нет. Путь будет больше перемещения.

5. Длина стрелки задает радиус окружности, по которой движется ее конец. Длина окружности равна пути: $l = 2\pi R = 62{,}8$ см. Перемещение равно нулю, так как стрелка вернулась в исходное положение.

§ 11. Скорость

ВОПРОСЫ

1. Средняя скорость — скалярная величина, численно равная отношению пути ко времени, в течение которого тело двигалось.

2. Как предел средней скорости при $\Delta t \to 0$. Модуль мгновенной скорости равен расстоянию, которое проходит тело за бесконечно малый промежуток времени.

3. Может быть как больше, так и меньше.

4. Вектор мгновенной скорости $\vec{v} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$, направлен по касательной к траектории в данной точке.

5. Относительная скорость – скорость первого тела в системе отсчета, связанной со вторым телом.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
v_1; v_2	Обозначим AB через l. Тогда $v_{cp} = \dfrac{2l}{t_1 + t_2}$,
$v_{cp} \le \dfrac{v_1 + v_2}{2}$	где $t_1 = \dfrac{l}{v_1}$, $t_2 = \dfrac{l}{v_2}$, следовательно

$v_{cp} = \dfrac{2l}{\dfrac{l}{v_1} + \dfrac{l}{v_2}} = \dfrac{2v_1v_2}{v_1 + v_2}$. Сравним v_{cp} и $\dfrac{v_1 + v_2}{2}$.

$$\frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2} - \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{4v_1v_2 - (v_1 + v_2)^2}{2(v_1 + v_2)} =$$
$$= \frac{4v_1v_2 - (v_1^2 + 2v_1v_2 + v_2^2)}{2(v_1 + v_2)} = \frac{-(v_1 - v_2)^2}{2(v_1 + v_2)}.$$

Разность этих двух величин всегда меньше или равна нулю, следовательно $v_{cp} \le \dfrac{v_1 + v_2}{2}$, что и требовалось доказать.

№ 2

Дано:	Решение:
$v_1 = 110$ м/с $v_2 = 800$ м/с	Пусть весь путь, проделанный самолетом, составляет l. Первую треть пути он пролетел за время t_1, а оставшуюся часть пути за t_2.
$v_{ср}$ – ?	

$v_{cp} = \dfrac{l}{t_1 + t_2}$, где $t_1 = \dfrac{l/3}{v_1}$, $t_2 = \dfrac{2l/3}{v_2}$, следовательно

$$v_{\text{ср}} = \frac{l}{\dfrac{l/3}{v_1} + \dfrac{2l/3}{v_2}} = \frac{v_1 v_2}{v_2/3 + 2v_1/3} = 880 \text{ м/с}$$

Ответ: $v_{\text{ср}} = \dfrac{v_1 v_2}{v_2/3 + 2v_1/3} = 880$ м/с.

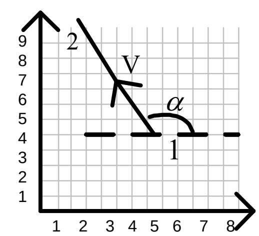
№ 3

Дано:	Решение:
$x_1 = 6 \cdot 10^{-2}$ м $y_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ м $x_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ м $y_2 = 9 \cdot 10^{-2}$ м $t = 2c$	Тангенс угла между вектором скорости (см. рисунок) и положительным направлением оси OX $tg\alpha = \dfrac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = -1 \Rightarrow \alpha = 135°$. Скорость на данном участке найдем по формуле: $v = \dfrac{S}{t}$
$\alpha - ?; v - ?$	

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$\Rightarrow v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{t} =$$

$$= 2\sqrt{2} \cdot 10^{-2} м \approx 2{,}8 \cdot 10^{-2} м.$$



Ответ: $\alpha = arctg \dfrac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = 135°$,

$$v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{t} \approx 2{,}8 \cdot 10^{-2} м$$

№ 4

Дано:	Решение:
$t_1 = 3$ сут. $t_2 = 5$ сут.	v — собственная скорость теплохода, v_{Π} — скорость плота, равная скорости течения.
$t_3 - ?$	При условии постоянства собственной скорости, можно записать уравнения:

$$\left.\begin{aligned} v+v_{\Pi} &= \frac{l}{t_1} \\ v-v_{\Pi} &= \frac{l}{t_2} \end{aligned}\right\} 2v_{\Pi} = \frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2} = l\frac{t_2-t_1}{t_2 t_1};$$

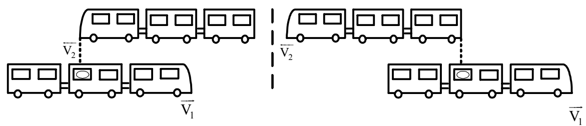
$t_3 = \dfrac{l}{v_{\Pi}} = \dfrac{2l}{l}\dfrac{t_2 t_1}{t_2-t_1} = \dfrac{2t_2t_1}{t_2-t_1} = 15$ сут. Ответ: $t_3 = \dfrac{2t_2t_1}{t_2-t_1} = 15$ сут.

№ 5

Дано:
$v_1 = 60$ км/ч
$t = 2c$

$v_2 - ?$

Решение:



В системе отсчета, связанной с первым поездом, скорость второго поезда составляет $v_2' = v_1 + v_2$. Второй поезд в течение времени t проходит расстояние l. Следовательно, $l = v_2' t = (v_1 + v_2)\cdot t$,

отсюда $v_2 = \dfrac{l}{t} - v_1 = 300$ м/с. Ответ: $v_2 = \dfrac{l}{t} - v_1 = 300$ м/с.

§ 12. Равномерное прямолинейное движение

ВОПРОСЫ

1. Равномерное прямолинейное движение — такое движение, при котором тело движется по прямой линии и за любые равные промежутки времени проходит одинаковые расстояния, то есть тело движется с постоянной скоростью.

2. Скорость постоянна и по модулю, и по направлению, а значит и предел отношения $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = const$.

3. $v = const \Rightarrow \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = const$, а значит и расстояние, равное произведению скорости на промежуток времени (который все время берется одним и те же), так же постоянная величина.

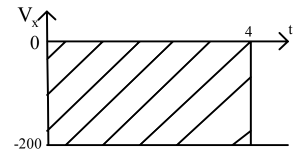
4. Перемещение тела численно равно площади под графиком $v(t)$.

5. Тангенс угла наклона графика численно равен скорости тела.

ЗАДАЧИ

№ 1

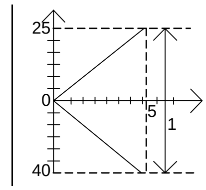
Дано:	Решение:
$v = 200$ м/с $t = 4c$	Перемещение тела численно равно заштрихованной площади (см. рисунок).
$S - ?$	



$S = v\Delta t$ =800 м. Ответ: $S = v\,\Delta t$ =800 м.

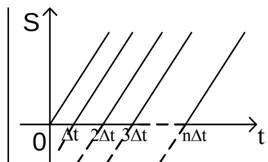
№ 2

Дано:	Решение:
$v_{x1} = 5$ м/с $v_{x2} = -8$м/с $t = 5c$	Расстояние между бегунами (см. рисунок) равно $l = t(v_{x1} - v_{x2}) = 65$ м .
l - ? $x(t)$ - ?	Ответ: $l = t(v_{x1} - v_{x2}) = 65$ м



№ 3

Дано:	Решение: $x(t) = x_0 + v_x t$
v; Δt	1-й поезд: $x(t) = vt$.
$s(t) - ?$	2-й поезд: $x(t) = -v\Delta t + vt$. 3-й поезд: $x(t) = -2v\Delta t + vt$. n-й поезд: $x(t) = -(n-1)v\Delta t + vt$.



Ответ: 1-й поезд: $x(t) = vt$.

2-й поезд: $x(t) = -v\Delta t + vt$.

3-й поезд: $x(t) = -2v\Delta t + vt$.

n-й поезд: $x(t) = -(n-1)v\Delta t + vt$

№ 4

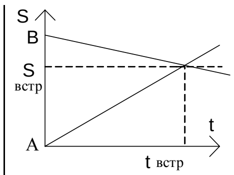
Дано:	Решение:
$v_1 = 25$ м/с $v_2 = 20$ м/с $l = 30$ м	Построим графики зависимости координаты обоих

$t-?$ $S_1-?S_2-?$	транспортных средств от времени. Обе зависимости линейные:

$x_1 = v_1 t$; $x_2 = x_0 + v_2 t$;
где $x_0 = l = 30$ м
Точка их пересечения имеет координаты t=6 с, x =150 м.
То есть автомобиль и автобус встретятся через 6 секунд, причем автомобиль пройдет до момента встречи 150 метров, а автобус 150-30=120 м.
Ответ: $t = 6\text{с}; S_1 = 150\text{м}; S_2 = 120\text{м}$

№ 5

Дано:	Решение:
$v_1 = 40\,\text{м/с}$ $v_2 = 20\,\text{м/с}$ $l = 1800\,\text{м}$	Задача решается практически аналогично предыдущей. x_1=40t; x_2=1800-20t;
$t-?\ S-?$	Из рисунка: $t_{ВСТР} = \dfrac{l}{v_1+v_2} = 30\,c$.



$$S_{ВСТР} = v_1 t = v_1 \cdot \frac{l}{v_1+v_2} = 1200\,\text{м}.$$

Ответ: $t_{ВСТР} = \dfrac{l}{v_1+v_2} = 30\,c$; $S_{ВСТР} = v_1 \cdot \dfrac{l}{v_1+v_2} = 1200$ м

§ 13. Ускорение

ВОПРОСЫ

1. Мгновенное ускорение — векторная величина, численно равная отношению изменения скорости за некоторый бесконечно малый промежуток времени к этому промежутку времени.

2. Тангенциальное ускорение — составляющая полного ускорения, отвечающая за изменение модуля скорости. Нормальное ускорение — составляющая полного ускорения, отвечающая за изменение направления скорости. Тангенциальное ускорение направлено по касательной к траектории, а нормальное перпендикулярно траектории.

3. Вектор скорости не меняет своего направления, а значит нормальное ускорение равно нулю.

4. Скорость увеличивается, изменение скорости >0, следовательно вектор изменения скорости, а значит и ускорение направлено в сторону движения тела.

5. Изменение скорости, а значит и ускорение, в данном случае отрицательная величина, но сама скорость положительна. Поэтому вектора скорости и ускорения противоположно направлены.

§ 14. Прямолинейное движение с постоянным ускорением

ВОПРОСЫ

1. Прямолинейное равноускоренное движение — движение вдоль прямой с постоянным по модулю ускорением, при котором векторы скорости и ускорения сонаправлены.

Прямолинейное равнозамедленное движение – движение вдоль прямой с постоянным по модулю ускорением, при котором векторы скорости и ускорения противоположно направлены.

Прямолинейное равнопеременное движение – движение вдоль прямой с постоянным по модулю ускорением, при котором векторы скорости и ускорения параллельны.

2. Направлением вектора ускорения.

3. И в том, и в другом случае на восток.

4. Как площадь под графиком зависимости скорости от времени.

5. Парабола.

ЗАДАЧИ

№ 1.

Дано:	Решение:
a=5м/с^2 v=90км/ч	Запишем уравнение движения: $x = x_0 + v_{ox}t + \frac{at^2}{2}$
t – ? S – ?	

Начальная скорость равна нулю, начальная координата тоже равно нулю, следовательно: $S = \frac{at^2}{2}$; $v = at$;

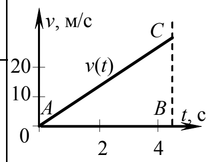
$S = \frac{av^2}{2a^2} = \frac{v^2}{2a} = \frac{25^2}{10} = 62{,}5$ м.; $t = \frac{v}{a} = \frac{25}{5} = 5$ с.

Ответ: S = 62,5 м; t = 5 м.

№ 2

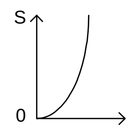
Дано:
a=5 м/с^2
v=90 км/ч
S – ?
$S(t)$ – ?

Решение:



$v(t)=v_0+at$; $v_0=0$ => $v(t)=5t$.

Перемещение S равно площади фигуры под графиком $v(t)$ за соответствующее время. $S=\frac{vt}{2}=62{,}5$ м.



Ответ: $S=\frac{vt}{2}=62{,}5$ м

№ 3

Дано:
v = 90 км/ч
t = 4с
S – ?
a – ?

Решение:

$x=vt-\frac{at^2}{2}=S$; $0=v-at \Leftrightarrow a=\frac{v}{t}=\frac{25}{4}=6{,}25$ м/с^2

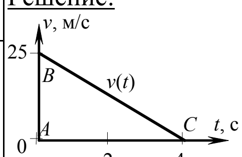
$S=vt-\frac{at^2}{2}=vt-\frac{vt}{2}=\frac{vt}{2}=50$ м.

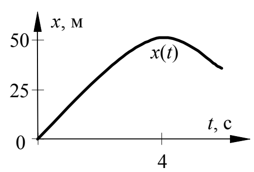
Ответ: $S=\frac{vt}{2}=50м$, $a=\frac{v}{t}=6{,}25$ м/с^2

№ 4

Дано:
Sl – ?
$s(t)$ – ?

Решение:





Путь найдем как площадь фигуры под графиком $v(t)$, $S=\frac{vt}{2}=50$ м.

Ответ: $S=\frac{vt}{2}=50$ м

№ 5

Дано:
a; v_0

Решение:

$S-?$
$t-?$

$v = v_0 + at$. Скорость должна уменьшиться вдвое, следовательно $\frac{1}{2}v_0 = v_0 + at \Leftrightarrow t = \frac{v_0}{2a}$;

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}; x = -\frac{v_0^2}{2a} + \frac{av_0^2}{4a^2 \cdot 2} = (-\frac{3}{8})\frac{v_0^2}{2a}$$

Ответ: $t = \frac{v_0}{2a}$, $S = \frac{3}{8} \cdot \frac{v_0^2}{2a}$.

§ 15. Прямолинейное движение с постоянным ускорением

ВОПРОСЫ

1. Скорости различных частей струи не равны между собой, поэтому струя разделяется на капли.

2. Если можно пренебречь сопротивлением воздуха.

3. Галилей скатывал шар по наклонной плоскости и заметил, что расстояние, пройденное шаром, при любых углах наклона пропорционально квадрату времени движения.

Роберт Бойль подтвердил идеи Галилея, когда он наблюдал падение различных тел в сосуде, из которого был откачан воздух.

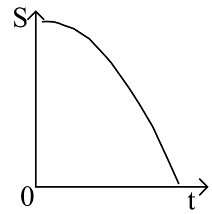
4. На тела, падающие в воздухе, действует сила сопротивления воздуха.

5. При открытии парашюта резко возрастает сила сопротивления воздуха, в результате чего ускорение парашютиста становится намного меньше.

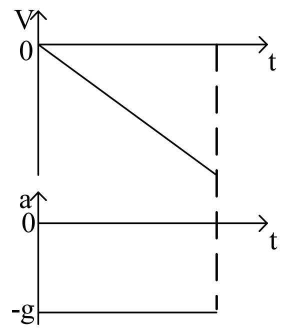
§ 16. Графики зависимости пути, перемещения и ускорения от времени при равнопеременном движении

ВОПРОСЫ

1. $y = H - \frac{gt^2}{2}$.



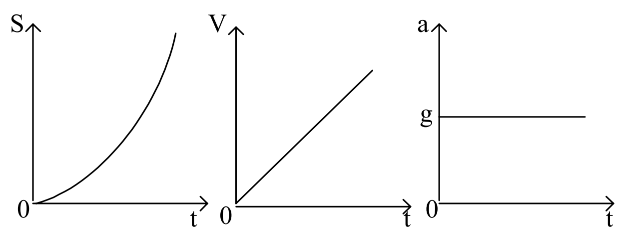
2.



3. Этот корень можно отбросить, так как он не имеет физического смысла.

4. Путь — это всегда не убывающая величина, а перемещение может как убывать, так и возрастать. Если убывающую часть графика зависимости перемещения от времени отразить сверху вниз, мы получим график пути от времени.

5.



З А Д А Ч И

№ 1

Дано:	Решение:
$v_0 = 0$ $\Delta t = 1$ с $\tau = 3$ с	$y(t) = \dfrac{gt^2}{2}$; $\Delta h = y(\tau + \Delta t) - y(\tau) = \dfrac{g(\tau + \Delta t)^2}{2} - \dfrac{g\tau^2}{2} =$

$\Delta h - ?$

$= \dfrac{g}{2}(\tau^2 + 2\tau\Delta t + \Delta t^2 - \tau^2) = \dfrac{g\Delta t}{2}(2\tau + \Delta t) =$

$= \dfrac{9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 1\ \text{с}}{2} \cdot (2 \cdot 3\ \text{с} + 1\ \text{с}) = 34{,}3\ \text{м}.$

Ответ: $\Delta h = 34{,}3$ м.

№ 2

Дано:
τ

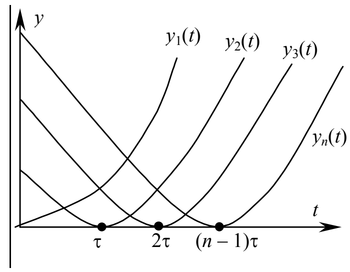
$y_1(t)$,
$y_2(t)$,
$y_n(t) - ?$

Решение:

$y_1(t) = \dfrac{gt^2}{2}, y_2(t) = \dfrac{g(t-\tau)^2}{2},$

…,

$y_n(t) = \dfrac{g\left(t-(n-1)\tau\right)^2}{2}.$



Ответ: $y_1(t) = \dfrac{gt^2}{2},\ y_2(t) = \dfrac{g(t-\tau)^2}{2},\ \ldots, y_n(t) = \dfrac{g\left(t-(n-1)\tau\right)^2}{2}.$

№ 3

Дано:
$n = 7$
τ

$\Delta h_{23} - ?$

Решение:

$y_n(t) = \dfrac{g\left(t-(n-1)\tau\right)^2}{2}$. Момент времени отрыва седьмой капли равен: $t_7 = (n-1)\tau = 6\tau$. Отсюда находим:

$$\Delta h_{23} = y_2(t_7) - y_3(t_7) = \frac{g(t_7-\tau)^2}{2} - \frac{g(t_7-2\tau)^2}{2} = \frac{g(6\tau-\tau)^2}{2} -$$

$$- \frac{g(6\tau-2\tau)^2}{2} = \frac{25g\tau^2}{2} - \frac{16g\tau^2}{2} = \frac{9g\tau^2}{2}.$$

Ответ: $\Delta h_{23} = \dfrac{9g\tau^2}{2}.$

№ 4

Дано:
H
$v_0 = 0$
$\Delta t = 1$ с

Решение:

$y(t) = \dfrac{gt^2}{2}$. T — время падения.

Δh-? | Тогда $H = y(T) = \dfrac{gT^2}{2} \Rightarrow T = \sqrt{\dfrac{2H}{g}}$

Отсюда находим путь Δh, проходимый телом за последнюю секунду:

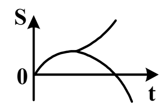
$$\Delta h = y(T) - y(T - \Delta t) = \frac{gT^2}{2} - \frac{g(T - \Delta t)^2}{2} = gT\Delta t - \frac{g\Delta t^2}{2} =$$

$$= \frac{g}{2}(2T - \Delta t) = \frac{g}{2}(2\sqrt{\frac{2H}{g}} - 1).$$ Ответ: $\Delta h = \dfrac{g}{2}(2\sqrt{\dfrac{2H}{g}} - 1)$.

№ 5

Решение:

$y_{\max} = \dfrac{v_0^2}{2g} \approx 30$ м. => $v_0 = \sqrt{2gy_{\max}} = \sqrt{2 \cdot 9{,}8\text{ м/с}^2 \cdot 30\text{ м}} \approx 24$ м/с,



$x(t) = v_0 t - \dfrac{gt^2}{2} = 24t - 4{,}9t^2$,

$l(t) = v_0 t - \dfrac{gt^2}{2} = 24t - 4{,}9t^2$ при $t \le t_{\max} = \dfrac{v_0}{g} = \dfrac{30\text{ м/с}}{9{,}8\text{ м/с}^2} \approx 3$ с

$l(t) = y_{\max} + \dfrac{g(t - t_{\max})^2}{2} = 30 + 4{,}9(t - t_{\max})^2$ при $t_{\max} \le t \le 2t_{\max}$

§ 17. Баллистическое движение

ВОПРОСЫ

1. Тело считают материальной точкой, движущейся с ускорением свободного падения.

2. Это связано с направлением ускорения: g направлено вертикально вниз.

3. $x_{\max} = \dfrac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha$, если $\alpha = 45°$, то $\sin 90° = 1$.

4. Уменьшится максимальная высота подъема и максимальная дальность полета.

5. $\dfrac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha = \dfrac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$; $\dfrac{v_0^2 2\sin\alpha\cos\alpha}{g} = \dfrac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g}$;

$4\cos\alpha = \sin\alpha \Rightarrow tg\alpha = 4 \Rightarrow \alpha = 76°$.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$v_0 = 5$ м/с $h = 19{,}6$ м	$x(t) = v_0 t,\ y(t) = h - \dfrac{gt^2}{2}$.
T-? L-?	Момент падения монеты T найдем из условия, что

$y(T) = 0$, т.е. $h - \dfrac{gT^2}{2} = 0 \Rightarrow \Rightarrow T = \sqrt{\dfrac{2h}{g}} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot 19{,}6\text{ м}}{9{,}8\text{ м/с}^2}} = 2$ с.

Расстояние L от дома до точки падения равно:

$L = x(T) = v_0 T = v_0 \sqrt{\dfrac{2h}{g}} = 5\text{ м/с} \cdot \sqrt{\dfrac{2 \cdot 19{,}6\text{ м}}{9{,}8\text{ м/с}^2}} = 10$ м. Ответ: Т = 2 с, $L = 10$ м.

№ 2

Дано:	Решение:
$h = 19{,}6$ м $v_0 = 5$ м/с	$v_x(t) = v_0$; $v_y(t) = -gt$. В момент падения монеты $T = \sqrt{\dfrac{2h}{g}}$
v, α – ?	

(см. предыдущую задачу): $v_x(T) = v_0$; $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$;

$v_y(t) = -\sqrt{(5\text{ м/с})^2 + 2 \cdot 9{,}8\text{ м/с}^2 \cdot 19{,}6\text{ м}} = 20{,}2$ м/с,

$\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{|v_y|}{v_x} = \dfrac{2gh}{v_0}$; $\alpha = \operatorname{arctg}\dfrac{2gh}{v_0} = \operatorname{arctg}\dfrac{2 \cdot 9{,}8\text{ м/с}^2 \cdot 19{,}6\text{ м}}{5\text{ м/с}} = 78{,}7°$.

Ответ: $v = 20{,}2$ м/с, $\alpha = 78{,}7°$.

№ 3

Дано:	Решение:
$\alpha = 45°$ $L = 20$ см $l = 0{,}4$ мм	$L = \dfrac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha \Rightarrow v_0 = \sqrt{\dfrac{gL}{\sin 2\alpha}}$;
H/l —?	

$H = \dfrac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} = \dfrac{gL}{\sin^2\alpha} \cdot \dfrac{\sin^2\alpha}{2g} = \dfrac{L\operatorname{tg}\alpha}{4}$; $\dfrac{H}{l} = \dfrac{L\operatorname{tg}\alpha}{4l} = \dfrac{0{,}2\text{ м} \cdot \operatorname{tg}45°}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-4}\text{ м}} = 125$.

Ответ: $H/l = 125$.

№ 4

Дано:	Решение:
$\alpha = 45°$	
L; l	$x(t) = v_0t\cos\alpha$, $y(t) = v_0t\sin\alpha - \dfrac{gt^2}{2}$.
v_0 — ?	

В момент времени T падения мяча на землю выполняются соотношения: $L + l = = v_0T\cos\alpha$, $0 = v_0T\sin\alpha - \dfrac{gT^2}{2}$.

Выражаем T из первого уравнения и подставляем во второе, получаем: $T = \dfrac{L+l}{v_0\cos\alpha}$; $0 = v_0\sin\alpha - \dfrac{g(L+l)}{2v_0\cos\alpha}$;

$v_0^2\sin 2\alpha = g(L+l)$;

$$v_0 = \sqrt{\frac{g(L+l)}{\sin 2\alpha}} = \sqrt{\frac{g(L+l)}{\sin 2\cdot 45°}} = \sqrt{g(L+l)}.$$

Ответ: $v_0 = \sqrt{g(L+l)}$.

№ 5

Дано:	Решение:
H; l	
α — ?	Для пули: $x_1(t) = v_0t\cos\alpha$, $y_1(t) = v_0t\sin\alpha - \dfrac{gt^2}{2}$.

Для падающей птицы: $y_2(t) = H - \dfrac{gt^2}{2}$.

В момент времени T попадания пули в птицу должно выполняться:

$$\begin{cases} x_1(t) = l; \\ y_1(t) = y_2(t); \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} v_0t\cos\alpha = l; \\ v_0t\sin\alpha - \dfrac{gT^2}{2} = H - \dfrac{gT^2}{2}; \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} v_0t\cos\alpha = l; \\ v_0t\sin\alpha = H \end{cases}$$

Поделим второе уравнение на первое, получим:
$\operatorname{tg}\alpha = H/l \Rightarrow \alpha = \operatorname{arctg}(H/l)$. Ответ: $\alpha = \operatorname{arctg}(H/l)$.

§ 18. Кинематика периодического движения

ВОПРОСЫ

1. Движение называется периодическим, если его параметры повторяются через определенные промежутки времени. Период – минимальный промежуток времени, через который параметры движения повторяются.

2. Или угол поворота радиуса-вектора, или пройденный путь.

3. Модуль вектора скорости остается постоянным, но его направление все время изменяется под действием нормального центростремительного ускорения. А значит движение равноускоренное, причем ускорение направлено к центру окружности, по которой движется тело.

4. Кольца Сатурна неоднородны и их части движутся относительно друг друга.

5. Периодические колебания величины s(t) называются гармоническими колебаниями, если

$s(t) = A\sin(\omega t + \phi_0)$ *или* $s(t) = A\cos(\omega\ t+ \phi\_0)$.

$$v(t) = -A\omega\cos(\omega t + \phi_0)$$

$$a(t) = -A\omega^2\sin(\omega t + \phi_0)$$

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
$r = 1{,}5 \cdot 10^8$ км
$T = 1$ год
v – ?

Решение:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\cdot 3{,}14\cdot 1{,}5\cdot 10^{11}\ \text{м}}{3{,}1\cdot 10^7\ \text{с}} \approx 3 \cdot 10^4\ \text{м/с} = 30\ \text{км/с}.$$

Ответ: $v \approx 30$ км/с.

№ 2

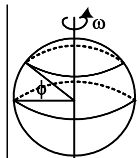
Дано:
$\varphi = 55°\ 45'$
$R = 6400$ км
$T = 1$ сутки
v — ?

Решение:

Из геометрических соображений:

$$v = \frac{2\pi R\cos\varphi}{T} = \frac{2\cdot 3{,}14\cdot 6{,}4\cdot 10^6\ \text{м}\cdot\cos 55{,}75°}{86164\ \text{с}} \approx$$

$\approx 262{,}5$ м/с. Ответ: $v \approx 262{,}5$ м/с.



№ 3

Дано:
$r_1 = 1{,}5$ см
$r_1 = 1$ см
$r_1 = 0{,}5$ см
$T_1 = 12$ ч
$T_2 = 1$ ч
$T_3 = 1$ мин

Решение:

Если считать, что все стрелки вращаются равномерно, то $a_1 = 0$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0$;

$$a_{n1} = \frac{2\pi^2 r_1}{T_1^{\,2}} = \frac{2\cdot 3{,}14^2\cdot 1{,}5\cdot 10^{-2}\ \text{м}}{43200^2\ \text{с}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-10}\ \text{м/с};$$

a_{t1}, a_{t2}, a_{t3}, a_{n1}, a_{n2}, a_{n3} —?	$a_{n2} = \dfrac{2\pi^2 r_2}{T_2^{\ 2}} = \dfrac{2\cdot 3{,}14^2\cdot 10^{-2}\text{ м}}{3600^{\ 2}\text{с}} \approx 1{,}5\cdot 10^{-8}$ м/с;

$a_{n3} = \dfrac{2\pi^2 r_3}{T^{\ 2}_{\ 3}} = \dfrac{2\cdot 3{,}14^2\cdot 5\cdot 10^{-3}\text{ м}}{60^2\text{ с}} \approx 2{,}7\cdot\ 10^{-5}$ м/с. Ответ: $a_{t1} = 0$; $a_{t2} = 0$;

$a_{t3} = 0$; $a_{n1} \approx 1{,}6\cdot 10^{-10}$ м/с; $a_{n2} \approx 1{,}5\cdot 10^{-8}$ м/с; $a_{n3} \approx 2{,}7\cdot 10^{-5}$ м/с.

№ 4

Дано:	Решение:
$x = 24\cos\frac{\pi}{12}t$ см	$x = r\cos\omega t \Rightarrow r = 24$ см, $\omega = \frac{\pi}{12}$ с$^{-1}$;
$t = 4$ с	$v_x(t) = -\omega r\sin\omega t = -\dfrac{\pi}{12}\cdot 24\cdot\sin\dfrac{\pi}{12}t = -2\pi\sin\dfrac{\pi}{12}t$ см/с;
$v_x(t)$, $a_x(t)$, $x(4)$, $v_x(4)$, $a_x(4)$ —?	

$a_x(t) = -\omega^2 r\cos\omega t = -\left(\dfrac{\pi}{12}\right)^2\cdot 24\cdot\cos\dfrac{\pi}{12}t = -\dfrac{\pi^2}{6}\ \cos\dfrac{\pi}{12}t$ см/с^2;

$x(4) = 24\cos\left(\dfrac{\pi}{12}\cdot 4\right) = 12$ см; $v_x(4) = -2\cdot 3{,}14\cdot\sin\left(\dfrac{\pi}{12}\cdot 4\right) \approx 5{,}4$ см;

$a_x(4) = -\dfrac{(3{,}14)^2}{6}\cdot\cos\left(\dfrac{\pi}{12}\cdot 4\right) = -0{,}8$ см/с^2.

Ответ: $v_x(t) = -2\pi\sin\dfrac{\pi}{12}t$ см/с; $a_x(t) = -\dfrac{\pi^2}{6}\ \cos\dfrac{\pi}{12}t$ см/с^2;

$x(4) = 12$ см, $v_x(4) \approx 5{,}4$ см; $a_x(4) = -0{,}8$ см/с^2.

№ 5

Дано:	Решение:
$A = 18$ см	$x_1(t) = A\cos\omega_1 t$; $x_2(t) = A\cos\omega_2 t$; $\omega_1 = \dfrac{2\pi}{T_1}$; $\omega_2 = \dfrac{2\pi}{T_2}$;
$T_1 = 3{,}6$ с	
$T_2 = 1{,}8$ с	
$t = 0{,}9$ с	$x_1(t) = A\cos\dfrac{2\pi}{T_1}t$; $x_2(t) = A\cos\dfrac{2\pi}{T_2}t$;
l, v_{21} — ?	

$l = |x_2(t) - x_1(t)| = A\left|\cos\dfrac{2\pi}{T_2}t - \cos\dfrac{2\pi}{T_1}t\right| = 18\text{ см}\cdot\left|\cos\dfrac{2\pi}{3{,}6\text{ с}}\cdot 0{,}9\text{с} - \cos\dfrac{2\pi}{1{,}8\text{ с}}\cdot 0{,}9\text{с}\right| = 18$ см;

$v_1 = -\dfrac{2\pi A}{T_1}\sin\dfrac{2\pi}{T_1}t$; $v_2 = -\dfrac{2\pi A}{T_2}\sin\dfrac{2\pi}{T_2}t$; $v_{21} = v_2 - v_1 = -\dfrac{2\pi A}{T_2}\sin\dfrac{2\pi}{T_2}t +$

$$+\ \frac{2\pi A}{T_1}\sin\frac{2\pi}{T_1}t = -2\pi A\left(\frac{1}{T_2}\sin\frac{2\pi}{T_2}t - \frac{1}{T_1}\sin\frac{2\pi}{T_1}t\right) =$$

$$= -2\cdot 3{,}14\cdot 18\ \text{см}\cdot\left(\frac{1}{1{,}8\ \text{с}}\sin\frac{2\pi}{1{,}8\ \text{с}}\cdot 0{,}9\ \text{с} - \frac{1}{3{,}6\ \text{с}}\sin\frac{2\pi}{3{,}6\ \text{с}}\cdot 0{,}9\ \text{с}\right) = 31{,}4\ \text{см/с}.$$

Ответ: l = 18 см, v_{21} = 0,314 м/с

3 Динамика материальной точки

§ 19. Принцип относительности Галилея

ВОПРОСЫ

1. Динамика изучает влияние взаимодействий между телами на их механическое движение.

2. Движение по инерции — движение в отсутствие воздействий со стороны других тел. Принцип инерции Галилея состоит в том, что если на тело не действуют никакие другие тела, то оно движется бесконечно долго, равномерно и прямолинейно либо покоится.

3. Инерциальная система — такая, в которой выполняется принцип относительности Галилея. В ИСО свободное от взаимодействий тело либо покоится, либо движется бесконечно долго, равномерно и прямолинейно, поэтому эти состояния тела взаимозаменяемы.

4. Рассмотрим равномерное прямолинейное движение вдоль оси ОХ платформы и машины на ней (рисунок 73 из учебника). Примем скорость платформы относительно Земли за v, а скорость машины относительно платформы за $v_{x'}$. Тогда за время t платформа сместится от начального положения на платформе на расстояние $x' = v_{x'} t$, а от начального положения на земле на расстояние $x = x' + v_{x'} t$. Отсюда получается, что $x' = x - v\,t$. Если поделить это равенство на t, получим преобразование для скоростей:

$$v_x = v_{x'} + v.$$

5. Во всех инерциальных системах отсчета все законы классической динамики выглядят одинаково.

§ 20. Первый закон Ньютона

ВОПРОСЫ

1. Существуют такие системы отсчета, в которых тела движутся прямолинейно и равномерно, если на них не действуют никакие другие тела или сумма сил, приложенных к телу равна нулю.

2. При условии, что равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна нулю.

3. При резком выдергивании свекла не успевает приобрести скорость ботвы, поэтому остается в земле. При постепенном выдергивании, свекла успевает приобрести нужную скорость.

4. Если выдергивать лист резко, то стакан останется на столе, (стакан не успевает приобрести скорости листа бумаги), если же медленно двигать лист, стакан приобретет его скорость и будет двигаться вместе с ним под действием силы трения.

5. Тело может двигаться и если на него действуют другие тела, и если такого действия нет.

§ 21. Второй закон Ньютона

ВОПРОСЫ

1. Сила является мерой взаимодействия. Сила измеряется в Ньютонах. 1

2. Если поезд движется равноускоренно, то на тела, находящиеся в нем действует некоторая сила, которую при желании можно обнаружить. Если же поезд движется равномерно, такой силы нет.

3. Инертность – способность тела сопротивляться изменению его скорости. Масса является мерой инертности тела.

4. Принцип суперпозиции следует из принципа независимости действия сил. И заключается в том, что действие нескольких сил можно заменить действием одной – равнодействующей. Равнодействующей называется единственная сила, результат действия которой эквивалентен одновременному действию всех сил, приложенных к этому телу.

5. В ИСО ускорение, приобретенное телом прямо пропорционально равнодействующей сил, действующих на тело и обратно пропорционально массе тела: $\vec{a} = \dfrac{\sum \vec{F}}{m}$.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m = 2$ кг	По второму закону Ньютона:
$F = 10$ Н	$\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$; $a = \dfrac{F}{m} = \dfrac{10\text{ Н}}{2\text{ кг}} = 5$ м/с^2.
a — ?	

Так как ускорение сонаправленно с силой, то оно направлено на запад, как и сила. Ответ: $a = 5$ м/с^2.

№ 2

Дано:
$m = 10$ кг
$a = 0{,}5$ м/с^2
$F_1 = 25$ Н
F_2 — ?

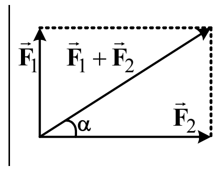
Решение:
Предположим, что сила F_2 направлена на юг (по оси X).
По второму закону Ньютона:
$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$; $ma = F_{x1} + F_{x2}$;
$F_{x2} = ma - F_{x1} = 10$ кг $\cdot$ $0{,}5$ м/с$^2 - 25$ Н $= -20$ Н.

Так как $F_{2x} < 0$, то сила $\vec{F}_2$ направлена на север, а модуль ее равен:
$F_2 = |F_{2x}| = 20$ Н.
Ответ: $F_2 = 20$ Н.

№ 3

Дано:
$m = 5$ кг
$F_1 = 9$ Н
$F_2 = 12$ Н
a, α – ?

Решение:
По второму закону Ньютона:
$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}$.
Из геометрических соображений (см. рисунок) находим:



$\operatorname{tg} \alpha = \dfrac{F_1}{F_2} \Rightarrow \alpha = \operatorname{arctg} \dfrac{F_1}{F_2} = \operatorname{arctg} \dfrac{9\text{ Н}}{12\text{ Н}} \approx 37°$; $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$.

Отсюда: $a = \dfrac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}}{m} == \dfrac{\sqrt{(9\text{ Н})^2 + (12\text{ Н})^2}}{5\text{ кг}} = 3$ м/с^2.

Ответ: $a = 3$ м/с^2; $\alpha \approx 37°$.

№ 4

Дано:
v_0; F_1
$F_2 = 3F_1$
m
$v(t)$ – ?

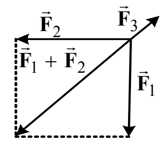
Решение:
Примем за начальный отсчет времени $t = 0$ момент влета ракеты в плотные слои атмосферы.
По второму закону Ньютона ускорение a в плотных слоях атмосферы равно:
$a = \dfrac{F_2}{m} = \dfrac{3F_1}{m}$.

Воспользовавшись кинематическим соотношением для $v(t)$, получим: $v(t) = v_0 - at = v_0 - \dfrac{3F_1}{m}t$.

Ответ: $v(t) = v_0 - \dfrac{3F_1}{m}t$.

№ 5

Дано:	Решение:
$F_1 = 1000$ Н $F_2 = 1000$ Н $F_3 = 414$ Н $a = 2$ м/с^2	По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F}$. Из геометрических соображений находим:
m, α – ?	



$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F_1}{F_2} \Rightarrow \alpha = \operatorname{arctg}\frac{F_1}{F_2} = \operatorname{arctg}\frac{1000\ \text{Н}}{1000\ \text{Н}} = 45°;$$

$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2;\ F_{12} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2};\ F = F_{12} - F_3 = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} - F_3.$$

Следовательно, $ma = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} - F_3$;

$$m = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2} - F_3}{a} = \frac{\sqrt{(1000\ \text{Н})^2 + (1000\ \text{Н})^2} - 414\ \text{Н}}{2\ \text{м/с}^2} = 500\ \text{кг}.$$

Ответ: $m = 500$ кг; $\alpha = 45°$ — лодка движется на юго-запад.

§ 22. Третий закон Ньютона

ВОПРОСЫ

1. Во взаимодействии участвуют два тела, причем они равноправны, поэтому если на первое тело действует сила со стороны второго, то на второе действует сила со стороны первого.

2. Две материальные точки взаимодействуют с силами
- одной природы,
- равными по модулю,
- противоположными по направлению,
- приложенными к разным телам,
- действующими вдоль прямой, соединяющей это точками.

3. Для всех.

4. С такой же силой, какой и она притягивает меня. $F = mg$.

5. $\dfrac{m_1}{m_2} = \dfrac{a_2}{a_1}$

§ 23. Сила упругости

ВОПРОСЫ

1. Силы гравитационного и электромагнитного взаимодействия. Силы упругости являются следствием электромагнитного взаимодействия между молекулами и атомами.

2. Силы, возникающие при деформации пружины, и силы, взаимодействия между атомами имеют одну природу. И проявляется как сила отталкивания или притяжения в зависимости от смещения атомов или звеньев пружины.

3. Особенностью упругого воздействия на тело является то, что при его исчезновении тело восстанавливает свой объем и форму.

4. Сила реакции опоры — сила упругости, которая действует на тело со стороны опоры, сила реакции опоры перпендикулярна поверхности соприкосновения.

5. Сила натяжения — сила упругости, которая действует на тело со стороны нити или пружины.

Согласно закону Гука упругие деформации прямо пропорциональны вызывающим их внешним воздействиям: $\vec{F}_{упр} = -k\Delta\vec{x}$.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$l_0 = 70$ см	Так как увеличилось расстояние между атомами на
$n = 0{,}1$ %	$n = 0{,}1$ %, то и на столько же увеличилась длина
Δx — ?	стержня, т.е. $\Delta x = 0{,}001 l_0$; $\Delta x = 0{,}001 \cdot 70$ см $= 0{,}7$ мм.
	Ответ: $\Delta x = 0{,}7$ мм.

№ 2

Дано:	Решение:
F	Из геометрических соображений:
α, N — ?	$N = \sqrt{F^2 + F^2} = \sqrt{2}F$; $\alpha = \operatorname{arctg}\dfrac{F}{F} = 45°$.
	Ответ: $\alpha = 45$, $N = \sqrt{2}F$.

№ 3

Дано:	Решение:
$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m = 70$ кг	По второму закону Ньютона:
$\Delta x = 2{,}5$ см	$m\vec{a} = \vec{F}_т + \vec{F}_{упр}$; $0 = F_т - F_{упр}$;
k — ?	

$F_т = F_{упр}$; $(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g = k\Delta x + k\Delta x + k\Delta x + k\Delta x$; $4mg = 4k\Delta x \Rightarrow$

$$k = \frac{mg}{\Delta x} = \frac{70\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2}{0{,}025\ \text{м}} = 27440\, H/м \approx 2{,}7 \cdot 10^4\ \text{Н/м} = 27440\ \text{Н/м}.$$

Ответ: $k = 2744$ Н/м.

№ 4

Дано:	Решение:
$l_0 = 20$ см	По закону Гука:
$F = 50$ Н	$F = k\Delta x = k(l - l_0)$;
$k = 1000$ Н/м	$l = \dfrac{F}{k} + l_0 = \dfrac{50\ \text{Н}}{1000\ \text{Н/м}} + 0{,}2$ м $= 0{,}25$ м $= 25$ см.
l — ?	Ответ: $l = 25$ см.

№ 5

Дано:	Решение:
$k_1 = k$	Удлинение системы из двух последовательно соединен-
$k_2 = 3k$	ных пружин равно сумме удлиннений каждой пружины,
$k_{общ}$ — ?	т.е. $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$.

Сила упругости в каждой точке системы из двух последовательно соединенных пружин постоянна, т.е. $k_{общ}\Delta x = k_1\Delta x_1 = k_2\Delta x_2$;
$k_{общ}(\Delta x_1 + \Delta x_2) = k\Delta x_1 = 3k\Delta x_2$;
$\Delta x_1 = 3\Delta x_2$; $k_{общ}(3\Delta x_2 + \Delta x_2) = k \cdot 3\Delta x_2$;
$k_{общ} = 3k/4$. Ответ: $k_{общ} = 3k/4$.

§ 24. Сила трения

ВОПРОСЫ

1. Силу трения определяет электромагнитное взаимодействие. Сила трения — сила, возникающая между двумя соприкасающимися поверхностями и направленная параллельно плоскости соприкосновения при попытке их взаимного перемещения. Силы трения подразделяются на силу трения качения, скольжения, покоя.

2. Сила трения покоя равна по модулю той силе, которая пытается вывести данное тело их состояния покоя. Максимальная сила трения покоя равна силе трения скольжения и прямо пропорциональна силе нормального давления.

3. На удерживание санок нужно приложить усилие меньшее или равное усилию, необходимому для их перемещения.

4. Сила трения скольжения направлена противоположно скорости тела. $F_{тр}=\mu N$.

5. При качении без проскальзывания молекулярные связи разрываются легче, чем при скольжении. А при трении покоя молекулярные связи еще не рвутся. Отсюда и получается данное неравенство.

ЗАДАЧИ

№ 1

Сила трения не зависит от площади соприкосновения грани коробка с поверхностью стола. Поэтому при движении коробка на любой грани сила трения скольжения будет одинаковой.

№ 2

Дано:
$F = 20$ Н
$\mu = 0{,}4$
$m - ?$

Решение:
По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{тр}$;
$0 = F - F_{тр}$; $F_{тр} = \mu N$; $N = mg$; $0 = F - \mu mg$;
$m = \dfrac{F}{\mu g} = \dfrac{20\ \text{Н}}{0{,}4 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2} \approx 5{,}1$ кг. Ответ: $m \approx 5{,}1$ кг.

№ 3

Дано:
$m = 250$ кг
$\mu = 0{,}1$
$F - ?$

Решение:
По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{тр}$;
$0 = F - F_{тр}$; $F_{тр} = \mu N$; $N = mg$; $0 = F - \mu mg$;

$F = \mu mg = 0{,}1 \cdot 250\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 = 245$ Н. Ответ: $F = 245$ Н.

№ 4

Дано:
$F = 1{,}57 \cdot 10^5$ Н
$m = 1{,}6 \cdot 10^6$ кг
$\mu_{кач} - ?$

Решение:
По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{тр.\ кач}$;
$0 = F - F_{тр\ кач}$; $F_{тр\ кач} = \mu_{кач} N$; $N = mg$; $0 = F - \mu_{кач} mg$;

$\mu_{кач} = \dfrac{F}{mg} = \dfrac{1{,}57 \cdot 10^5\ \text{Н}}{1{,}6 \cdot 10^6\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2} = 0{,}01$. Ответ: $\mu_{кач} = 0{,}01$.

№ 5

Дано:
$m = 1$ кг
$k = 100$ Н/м
$\mu = 0{,}5$
Δx — ?

Решение:
По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F}_{упр} + \vec{F}_{тр}$;
$0 = F_{упр} - F_{тр}$;
$F_{упр} = k\Delta x$; $F_{тр} = \mu N$; $N = mg$; $0 = k\Delta x - \mu mg$;

$\Delta x = \dfrac{\mu mg}{k} = \dfrac{0{,}5 \cdot 1\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2}{100\ \text{Н/м}} = 0{,}049$ м $= 4{,}9$ см. Ответ: $\Delta x = 4{,}9$ см.

§ 25. Гравитационная сила. Закон всемирного тяготения

ВОПРОСЫ

1. Дальнодействие — способ распространение взаимодействия, при котором тела взаимодействуют на расстоянии без участия среды.

2. Между всякими двумя материальными точками действуют силы взаимного притяжения, которые прямо пропорциональны массам точек и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя материальными точками массами 1 кг, расположенными на расстоянии 1 м.

3. С помощью крутильных весов (рисунок 92 из учебника). По углу закручивания нити.

4. Эти силы очень малы по сравнению с другими силами, действующими на эти предметы, например по сравнению с силами их притяжения к Земле.

5. Примерно в $1/R^2$ раз, где R — расстояние от Земли до Луны.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$R = 6{,}4\cdot10^6$м $M = 6\cdot10^{24}$кг $m_1 = m_2 = m = 1$ кг $r = 1$ м	По закону всемирного тяготения: $F_1 = G\frac{m_1m_2}{r^2} = G\frac{m^2}{r^2}$; $F_2 = G\frac{m_1M}{R^2} = G\frac{mM}{R^2}$. =>
F_2/F_1 — ?	

$$=> \frac{F_2}{F_1} = G\frac{mM}{R^2}\cdot\frac{r^2}{Gm^2} = \left(\frac{r}{R}\right)^2\frac{M}{m} = \left(\frac{1\,\text{м}}{6{,}4\cdot10^6\,\text{м}}\right)^2\cdot\frac{6\cdot10^{24}\,\text{кг}}{1\,\text{кг}} \approx 1{,}46\cdot10^{11}.$$

Ответ: $F_2/F_1 \approx 1{,}46\cdot10^{11}$.

№ 2

Дано:	Решение:
$R_{ЗЛ} = 3{,}8\cdot10^8$ м $R_{СЛ} = 1{,}5\cdot10^{11}$ м $M_З = 6\cdot10^{24}$ кг $M_С = 2\cdot10^{36}$ кг	По закону всемирного тяготения: $F_З = G\frac{M_ЗM_Л}{R_{ЗЛ}^2}$; $F_С = G\frac{M_СM_Л}{R_{СЛ}^2}$. =>
$F_З/F_С$ – ?	$\frac{F_З}{F_С} = G\frac{M_ЗM_Л}{R_{ЗЛ}^2}\cdot\frac{R_{СЛ}^2}{GM_СM_Л} = \left(\frac{R_{СЛ}}{R_{ЗЛ}}\right)^2\frac{M_З}{M_С} =$

$$= \left(\frac{1{,}5\cdot 10^{11}\ \text{м}}{3{,}8\cdot 10^{8}\ \text{м}}\right)^2 \cdot \frac{6\cdot 10^{24}\ \text{кг}}{2\cdot 10^{36}\ \text{кг}} \approx 0{,}47.\ \text{Ответ: } F_З/F_С \approx 0{,}47$$

№ 3

Дано:	Решение:
R = 6950 км $M_З = 6\cdot 10^{24}$ кг	По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = F_g$; $ma = F_g$, где $a = \dfrac{4\pi^2 R}{T^2}$ — центростремительное ускорение,
T – ?	

$F_g = G\dfrac{mM_З}{R^2}$ — гравитационная сила взаимодействия между спутником массой m и Землей. Следовательно: $m\dfrac{4\pi^2 R}{T^2} = G\dfrac{mM_З}{R^2}$;

$$T = 2\pi R\sqrt{\frac{R}{GM_З}} = 2\cdot 3{,}14\cdot 6{,}95\cdot 10^6\ \text{м}\ \times$$

$$\cdot\times\sqrt{\frac{6{,}95\cdot 10^6\ \text{м}}{6{,}67\cdot 10^{-11}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2\cdot 6\cdot 10^{24}\ \text{кг}}} \approx 5752\ \text{с} \approx 1\ \text{ч}\ 36\ \text{мин}.$$

Ответ: $T \approx 1$ ч 36 мин.

№ 4

Дано:	Решение:
$M_З = 6\cdot 10^{24}$ кг $T_З$ = 1 сут	Чтобы спутник постоянно висел над определенной точкой, находящейся на экваторе, необходимо, чтобы скорости вращения спутника и Земли и соответственно их периоды были равны: $T_С = T_З$. Из предыдущей задачи:
R — ?	

$$T_С = 2\pi R\sqrt{\frac{R}{GM_З}}. \Rightarrow 2\pi R\sqrt{\frac{R}{GM_З}} = T_З;\ R^{3/2} = \frac{T_З}{2\pi}\sqrt{GM_З};$$

$$R = \left(\frac{T_З}{2\pi}\sqrt{GM_З}\right)^{2/3} = \left(\frac{86164\ \text{с}}{2\cdot 3{,}14}\cdot\sqrt{6{,}67\cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{кг}^2}\cdot 6\cdot 10^{24}\ \text{кг}}\right)^{2/3} \approx$$

$\approx 4{,}22\cdot 10^7$ м. Ответ: $R \approx 4{,}22\cdot 10^7$ м.

№ 5

Луна является спутником Земли, а не самостоятельной планетой Солнечной системы, хотя Солнце притягивает ее в 2 раза сильнее, чем Земля, так как Солнце сообщает им примерно равные ускорения.

Считая расстояния от Солнца до Земли и от Солнца до Луны примерно равными $R_{СЗ} \approx R_{СЛ} = R$, находим:

$$M_З a_З \approx G\frac{M_С M_З}{R^2};\ M_Л a_Л \approx G\frac{M_С M_Л}{R^2};\ \frac{a_З}{a_Л} \approx 1.$$

§ 26. Сила тяжести. Вес тела.

ВОПРОСЫ

1. Сила тяжести — сила, с которой тело притягивается к Земле.

2. На высоте h<<R над Землей силу тяжести тела можно считать постоянной.

3. Вес — сила, с которой тело давит на опору или оттягивает подвес.

4. Силами взаимодействия между атомами, возникающими вследствие появления деформаций растяжения-сжатия.

5. Сила тяжести приложена к центру масс тела, а вес — к опоре или подвесу.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$g_м = 3{,}7$ м/с^2	Силы тяжести на Земле $F_т$ и на Меркурии $F_{т\ М}$ равны
$g = 9{,}8$ м/с^2	соответственно: $F_т = mg$;
$F_т / F_{т.\ М}$ — ?	$F_{т\ М} = mg_М$.

Отсюда находим: $\dfrac{F_т}{F_{т.\ М}} = \dfrac{mg}{mg_М} = \dfrac{g}{g_М} = \dfrac{9{,}8\ м/с^2}{3{,}7\ м/с^2} \approx 2{,}65.$

Ответ: $\dfrac{F_т}{F_{т.\ М}} \approx 2{,}65.$

№ 2

Дано:	Решение:
$R = R_З/2$	По закону всемирного тяготения:
$M = M_З$	$F_g = G\dfrac{mM}{R^2} = G\dfrac{mM_З}{(R_З/2)^2} = 4G\dfrac{mM_З}{R_З^2}.$
g' – ?	

По определению ускорение g' на данной планете есть:

$$g' = \frac{F_g}{m} = 4G\frac{M_З}{{R_З}^2} = 4g = 4 \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 = 39{,}2 \text{ м/с}^2.$$ Ответ: $g' = 39{,}2$ м/с^2.

№ 3

Дано:	Решение:
$D = 1{,}21 \cdot 10^4$ км $\rho = 5{,}2 \cdot 10^3$ кг/м^3 $t = 1$ с	По закону всемирного тяготения: $F_g = G\dfrac{mM}{R^2}$.
l — ?	Считая Венеру шаром, найдем:

$$M = \rho V = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3;\ R = D/2;\ F_g = G\frac{m\rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3}{R^2} = \frac{4}{3}Gm\rho\pi R = \frac{2}{3}Gm\rho\pi D.$$

По определению ускорение $g_В$ на Венере есть: $g_В = \dfrac{F_g}{m} = \dfrac{2}{3}G\rho\pi D.$ Из кинематического соотношения окончательно находим:

$$l = \frac{g_в t^2}{2} = \frac{1}{3}G\rho\pi D t^2 = \frac{1}{3} \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot 5{,}2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}21 \cdot$$
$$\cdot\, 10^7 \text{ м} \cdot (1 \text{ с})^2 \approx 4{,}4 \text{ м}.$$ Ответ: $l \approx 4{,}4$ м.

№ 4

Дано:	Решение:
$g_Л = 1{,}6$ м/с^2 $R_З/R_Л = 3{,}7$	По определению ускорения на Луне $g_Л$ и на Земле $g_З$ есть: $g_Л = \dfrac{F_{g_Л}}{m} = G\dfrac{M_Л}{R_Л^2}$; $g_З = \dfrac{F_{g_З}}{m} = G\dfrac{M_З}{R_З^2}$. Следова-
$\dfrac{M_З}{M_Л}$ – ? P – ?	тельно: $\dfrac{g_З}{g_Л} = G\dfrac{M_З}{R_З^2} \cdot \dfrac{R_Л^2}{GM_Л} = \left(\dfrac{R_Л}{R_З}\right)^2 \dfrac{M_З}{M_Л}$;

$$\frac{M_З}{M_Л} = \left(\frac{R_З}{R_Л}\right)^2 \frac{g_З}{g_Л} = (3{,}7)^2 \cdot \frac{9{,}8 \text{ м/с}^2}{1{,}6 \text{ м/с}^2} \approx 84.$$ Ответ: $\dfrac{M_З}{M_Л} \approx 84$

§ 27. Применение законов Ньютона

ВОПРОСЫ

1. При равномерном движении вес равен силе тяжести, при движении с ускорением, направленным вверх вес больше силы тяжести, при ускорении, направленном вниз – меньше, если же лифт свободно падает, то вес равен нулю.

2. Легче тянуть, чем время от времени толкать, так как коэффициент силы трения скольжения несколько меньше коэффициента силы трения покоя.

3. $F = \mu N$.

4. Пружинные часы. (Маятниковые и песочные не будут работать при нулевом весе.)

5. Если тангенс угла наклона равен μ, то тело будет равномерно скользить. При больших углах тело будет покоиться.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m = 100$ кг $F = 149$ Н $l = 200$ м $\mu = 0{,}05$	По второму закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{\text{тр}}$; $ma = F - F_{\text{тр}}$; $F_{\text{тр}} = \mu N$; $N = mg$; $a = \dfrac{2l}{t^2}$;
t – ?	

$$m\frac{2l}{t^2} = F - \mu mg;$$

$$t = \sqrt{\frac{2ml}{F - \mu mg}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100\ \text{кг} \cdot 200\ \text{м}}{149\ \text{Н} - 0{,}05 \cdot 100\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2}} = 20\ \text{с}.$$

Ответ: $t = 20$ с.

№ 2

Дано:	Решение:
m; M; k; F	Запишем второй закон Ньютона для электровоза и вагона: $M\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{\text{упр}}$; $m\vec{a} = \vec{F}'_{\text{упр}}$.
a, Δx — ?	

Учитывая, что $\vec{F}_{\text{упр}} = -\vec{F}'_{\text{упр}}$ и проектируя уравнения движения на ось X, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Ma = F - F_{упр}; \\ ma = F_{упр}. \end{cases}$$

Складывая эти два уравнения, получаем: $(m + M)a = F$,

откуда $a = \dfrac{F}{m+M}$.

Согласно закону Гука и второму уравнению системы, получаем:

$F_{упр} = k\Delta x = ma = m\dfrac{F}{m+M}$ => $\Delta x = \dfrac{F}{k}\dfrac{m}{m+M}$.

Ответ: $a = \dfrac{F}{m+M}$, $\Delta x = \dfrac{F}{k}\dfrac{m}{m+M}$.

№ 3

Дано:	Решение:
$m = 50$ т	Запишем второй закон Ньютона для трех вагонов:
$F = 17940$ Н	$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{тр.\ кач} + \vec{T}_1$;
$\mu_{кач} = 0{,}002$	$m\vec{a} = \vec{T}_1' + \vec{F}_{тр.\ кач} + \vec{T}_2$;
a, T_1, T_2 — ?	$F_{тр\ кач} = \mu N = \mu mg$ и проецируя уравнения движения на ось X, получим следующую систему уравнений:

$m\vec{a} = \vec{T}_2' + \vec{F}_{тр.\ кач}$.

Учитывая, что $\vec{T}_1 = -\vec{T}_1'$, $\vec{T}_2 = -\vec{T}_2'$,

$$\begin{cases} ma = F - \mu_{кач}mg - T_1; \\ ma = T_1 - \mu_{кач}mg - T_2; \\ ma = T_2 - \mu_{кач}mg. \end{cases}$$

Складывая эти три уравнения, получаем:

$3ma = F - 3\mu_{кач}mg$ =>

=> $a = \dfrac{F}{3m} - \mu_{кач}g = \dfrac{17940\ \text{Н}}{3\cdot 5\cdot 10^4\ \text{кг}} - 0{,}002\cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \approx 0{,}1\ \text{м/с}^2$.

Из второго и третьего уравнения системы получаем выражения для сил натяжения T_1 и T_2:

$T_2 = ma + \mu_{кач}mg = F/3 = \dfrac{17940\ \text{Н}}{3} = 5980$ Н;

$T_1 = ma + \mu_{кач}mg + T_2 = F/3 + F/3 = 2F/3 = 2\cdot\dfrac{17940\ \text{Н}}{3} = 11960$ Н.

Ответ: $a \approx 0{,}1$ м/с^2; $T_1 = 11960$ Н; $T_2 = 5980$ Н.

№ 4

Дано:	Решение:
v_0	*Кубик поднимается вверх.*
α	Запишем второй закон Ньютона:
μ	$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}.$;
t, h — ?	$\begin{cases} \text{ось } X: \ ma_1 = F_{тр} + mg\sin\alpha; \\ \text{ось } Y: \ 0 = N - mg\cos\alpha. \end{cases}$

$N = mg\cos\alpha \Rightarrow F_{тр} = \mu N = = \mu mg\cos\alpha$. $ma_1 = \mu mg\cos\alpha + mg\sin\alpha$;

$a_1 = g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)$.

$$\Rightarrow a_1 = \frac{v_0}{t_1} = \frac{v_0^2}{2l} \Rightarrow t_1 = \frac{v_0}{a_1} = \frac{v_0}{g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)};\ l = \frac{v_0^2}{2a_1} = \frac{v_0^2}{2g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)};$$

$$h = l\sin\alpha = \frac{v_0^2 \sin\alpha}{2g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}.$$

Кубик опускается вниз.

Запишем второй закон Ньютона: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}$.

$$\begin{cases} \text{ось } X: \ ma_2 = -F_{тр} + mg\sin\alpha; \\ \text{ось } Y: \ 0 = N - mg\cos\alpha. \end{cases}$$

$N = mg\cos\alpha, \Rightarrow F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\alpha$;

$ma_2 = -\mu mg\cos\alpha + mg\sin\alpha$;

$a_2 = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$.

$$a_2 = \frac{2l}{t_2^2} \Rightarrow t_2 = \sqrt{\frac{2l}{a_2}} = \sqrt{\frac{2v_0^2}{2g^2(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}} = \frac{v_0}{g\sqrt{\sin^2\alpha - \mu^2\cos^2\alpha}}.$$

Полное время $t = t_1 + t_2 = \frac{v_0}{g}\left(\frac{1}{\sin\alpha + \mu\cos\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\sin^2\alpha - \mu^2\cos^2\alpha}}\right)$.

Ответ: $h = \frac{v_0^2\sin\alpha}{2g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}$; $t = \frac{v_0}{g}\left(\frac{1}{\sin\alpha + \mu\cos\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\sin^2\alpha - \mu^2\cos^2\alpha}}\right)$.

№ 5

Дано:	Решение:
m_1; $m_2 > m_1$	По второму закон Ньютона:
a, T, F_g — ?	$m_1\vec{a}_1 = m_1\vec{g} + \vec{T}_1$; $m_2\vec{a}_2 = m_2\vec{g} + \vec{T}_2$; $0 = \vec{F}_g + \vec{T}_1' + \vec{T}_2'$.

В проекции на ОУ: $\begin{cases} m_1 a_1 = -m_1 g + T_1; \\ m_2 a_2 = -m_2 g + T_2; \\ 0 = F_g - T_1' - T_2'. \end{cases}$

Так как нить нерастяжима и невесома, то $\vec{T}_1 = \vec{T}_2 = -\vec{T}_1' = -\vec{T}_2' = \vec{T}$, $\vec{a}_1 = -\vec{a}_2 = \vec{a}$. Отсюда: $\begin{cases} m_1 a = -m_1 g + T; \\ -m_2 a = -m_2 g + T; \\ 0 = F_g - T - T. \end{cases}$

Вычитая из первого уравнения системы второе, получим:

$(m_1 + m_2)a = (m_2 - m_1)g$, откуда $a = \dfrac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} g$;

$T = m_1 a + m_1 g = m_1 \dfrac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} g + m_1 g = \dfrac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g; F_g = 2T = \dfrac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g.$

Ответ: $a = \dfrac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} g$; $T = \dfrac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$; $F_g = 2T = \dfrac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$.

4 Законы сохранения

§ 28. Импульс материальной точки

ВОПРОСЫ

1. Импульс силы — векторная величина, равная произведению силы на время ее действия.

2. Импульс тела — векторная величина, равная произведению скорости тела на его массу.

3. Импульс силы в первом и втором случае одинаковы.

4. Импульс зависит не только от величины силы, но от времени ее воздействия. Сила постоянна, а промежуток времени ее действия линейно увеличивается, поэтому и импульс силы, а значит и тела линейно возрастает.

5. Если на тело не действуют внешние силы или их равнодействующая равна нулю.

ЗАДАЧИ

№ 1

Направление импульса силы, изменяющей направление потока воды, определяется величиной $\vec{F}\Delta t = \vec{p} - \vec{p}_0$. Из геометрических соображений видно, что импульс силы $\vec{F}\Delta t$ направлен под углом $\alpha = 45°$ к горизонтали ($|\vec{p}_0| = |\vec{p}|$).

Считая, что шланг не движется и не деформируется, то сила $\vec{F}'$, действующая на шланг, будет направлена противоположно силе $\vec{F}$ и соответственно импульсу силы $\vec{F}\Delta t$.

№ 2

Дано:	Решение:
m = 2000 кг v = 90 км/ч= =25м/с	$\Delta\vec{p} = \vec{p} - \vec{p}_0$; $|\vec{p}_0| = |\vec{p}|$, =>
Δp — ?	$\Delta p = \sqrt{p_0^2 + p^2} = \sqrt{(mv)^2 + (mv)^2} = \sqrt{2}\, mv =$ $= \sqrt{2} \cdot 2000$ кг $\cdot$ 25 м/с $\approx 7{,}07 \cdot 10^4$ кг·м/с;

$\alpha = \text{arctg}\,\dfrac{p_0}{p} = 45°$,

значит изменение импульса автомобиля направлено на юго-восток.

Ответ: $\Delta p \approx 7{,}07 \cdot 10^4$ кг·м/с, на юго-восток.

№ 3

Дано:	Решение:
v	Перейдем в систему отсчета, связанную с движущейся со
u	скоростью $\vec{u}$ теннисной ракеткой.
V — ?	

В данной системе отсчета скорость мяча равна $\vec{v}+\vec{u}$. После упругого столкновения модуль скорости мяча не изменится, а направление изменится на противоположное, т.е. в системе отсчета, связанной с ракеткой, скорость мяча после столкновения будет равна

$$-\left(\vec{v}+\vec{u}\right) = -\vec{v}-\vec{u}.$$

Теперь переходим в первоначальную систему отсчета, связанную с землей, и получаем, что скорость мяча равна: $\vec{V} = -\vec{v}-\vec{u}.-\vec{u} = -\vec{v}-2\vec{u}$. Таким образом: $V = v + 2u$.

Ответ: $V = v + 2u$.

№ 4

Столкновение шара из пластилина с бетонной стеной является неупругим, т.е. его скорость после столкновения равна нулю, а изменение импульса равно:

$$\Delta p = m\Delta v = mv.$$

Столкновение теннисного мяча с бетонной стеной является упругим, т.е. модуль его скорости остается прежним, а направление меняется на противоположное. В этом случае изменение импульса равно:

$$\Delta\vec{p} = m\vec{v} - \left(-m\vec{v}\right) = 2m\vec{v};\ \Delta p = 2mv.$$

№ 5

Столкновение молекулы газа со стенкой сосуда является упругим. Из геометрических соображений находим, что изменение скорости молекулы $\Delta\vec{v}$ и соответственно изменение ее импульса $\Delta\vec{p} = m\Delta\vec{v}$ направлено перпендикулярно стенке, причем $\Delta p = 2mv\cos\alpha$. Это изменение импульса равно импульсу, который молекула сообщает стенке.

§ 29. Закон сохранения импульса

ВОПРОСЫ

1. Система называется замкнутой, если ни на одно из тел системы не действуют внешние силы. Если рассматривать взаимодействие шаров в течение небольшого промежутка времени, то можно пренебречь действующей на них силой тяжести, тогда можно считать систему замкнутой.

2. Суммарный импульс замкнутой системы тел сохраняется.

3. Многоступенчатые ракеты используются для постепенного уменьшения массы ракеты по мере набора высоты за счет отброса ставшей ненужной после выгорания топлива очередной ступени.

4. В первом случае камень улетит дальше, так как во втором случае часть импульса камня перейдет к лодке.

5. По закону сохранения импульса, человек при переходе на берег сообщает лодке некоторый импульс, в результате чего лодка приобретает скорость.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m_1 = 1$ кг	Импульс системы двух тел равен: $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$,
$m_2 = 2$ кг	$\vec{p}_1 = m_1\vec{v}_1$, $\vec{p}_2 = m_2\vec{v}_2$.
$v_1 = 10$ м/с	Из геометрических соображений находим:.
$v_2 = 5$ м/с	
$\alpha, p - ?$	

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} == \sqrt{(m_1v_1)^2 + (m_2v_2)^2} = \sqrt{(1\text{ кг}\cdot 10\text{ м/с})^2 + (2\text{ кг}\cdot 5\text{ м/с})^2} \approx$$

$$\approx 14{,}14 \text{ кг·м/с}; \ \alpha = \operatorname{arctg}\frac{p_2}{p_1} = \operatorname{arctg}\frac{m_2v_2}{m_1v_1} = \operatorname{arctg}\frac{2\text{ кг}\cdot 5\text{ м/с}}{1\text{ кг}\cdot 10\text{ м/с}} = 45°, \text{ т.е}$$

$\vec{p}$ направлен на северо-запад.

Ответ: $p \approx 14{,}14$ кг·м/с, $\alpha = 45°$, на северо-запад

№ 2

Дано:	Решение:
$m = 1$ кг	В силу закона сохранения импульса, второй осколок
$v = 20$ м/с	полетит на восток.
$m_1 = 0{,}2$ кг	Закон сохранения импульса в проекциях на ось X, на-
$v_1 = 500$ м/с	правив ее вдоль движения осколков: $-mv = -m_1v_1 + m_2v_2$,
$v_2 - ?$	

$$v_2 = \frac{m_1 v_1 - mv}{m_2} = \frac{m_1 v_1 - mv}{m - m_1} = \frac{0,2\text{ кг}\cdot 500\text{ м/с} - 1\text{ кг}\cdot 20\text{ м/с}}{1\text{ кг} - 0,2\text{ кг}} = 100\text{ м/с}.$$

Ответ: $v_2 = 100$ м/с, на восток.

№ 3

Дано:	Решение:
$m = 20$ кг $v_0 = 200$ м/с $\alpha = 30°$ $M = 2000$ кг	Запишем закон сохранения импульса в проекциях на ось X, направив ее параллельно поверхности Земли: $0 = -Mv + mv_0\cos\alpha$,
v — ?	$v = \frac{mv_0\cos\alpha}{M} = \frac{20\text{ кг}\cdot 200\text{ м/с}\cdot\cos 30°}{2000\text{ кг}} \approx 1,73$ м/с. Ответ: $v \approx 1,73$ м/с.

№ 4

Дано:	Решение:
$m = 70$ кг $M = 130$ кг $l = 4$ м	Запишем закон сохранения импульса в проекциях на ось X, направив ее вдоль поверхности Земли: $0 = -(M + m)V + mv$. Умножим левую и правую часть
L — ?	этого уравнения на Δt: $0 = -(M + m)V\Delta t + mv\Delta t$; $0 = -(M + m)L + ml$,

$$L = \frac{m}{m+M}l = \frac{70\text{ кг}}{70\text{ кг} + 130\text{ кг}}\cdot 4\text{ м} = 1,4\text{ м}.$$ Ответ: $L = 1,4$ м.

№ 5

Дано:	Решение:
$h = 1960$ м $v = 100$ м/с $v_1 = 2v$ $m_1 = m_2 = m/2$	Запишем закон сохранения импульса в проекциях на ось X, направив ее перпендикулярно поверхности Земли: $mv = -m_1v_1 + m_2v_2$; $mv = -\frac{m}{2}2v + \frac{m}{2}v_2$;
l — ?	$v = -v + v_2/2$, => $v_2 = 4v$. Из кинематики:

$$h = \frac{gt^2}{2};\ t = \sqrt{\frac{2h}{g}};\ l_1 = v_1 t = 2v\sqrt{\frac{2h}{g}};\ l_2 = v_2 t = 4v\sqrt{\frac{2h}{g}};$$

$$l = l_1 + l_2 = 6v\sqrt{\frac{2h}{g}} = 6\cdot 100\text{ м/с}\times\sqrt{\frac{2\cdot 1960\text{ м}}{9,8\text{ м/с}^2}} = 12000\text{ м}.$$

Ответ: $l = 12000$ м.

§ 30. Работа силы

ВОПРОСЫ

1. Работа — физическая величина, равная скалярному произведению силы на перемещение, совершенное телом под действием этой силы. Работа измеряется в Джоулях. Работа показывает, как изменяется энергия в данном процессе.

2. Работа силы положительна, если угол между векторами перемещения и силы меньше 90º, отрицательна, если этот угол больше 90º и равна нулю, если перемещение перпендикулярно силе.

3. Работа силы тем больше, чем больше x-овая компонента силы, если направить ось x вдоль направления вектора перемещения. Графически работу можно найти, вычислив площадь под графиком зависимости $F(x)$.

4. 100кг·2м>120кг·1,5м, следовательно, в первом случае работа больше.

5. Наклонная лестница уменьшает усилие при подъеме, поскольку работу совершает только компонента силы тяжести, сонаправленная перемещению: $mg\sin\alpha < mg$.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
Δx = 15 см=0,15м	По определению:
F_x = 40 Н	$A = F_x\Delta x$ = 40 Н · 0,15 м = 6 Дж
A — ?	Ответ: A = 6 Дж.

№ 2

Дано:	Решение:
m = 200 кг	$A = F_x\Delta x = F_{тр}l$. Сила трения $F_{тр} = \mu N = \mu mg$.
μ = 0,5; l = 5 м	$A = \mu mgl$ = 0,5 · 200 кг · 9,8 м/с^2 · 5 м = 4900 Дж =
A — ?	=4,9 кДж. Ответ: A = 4,9 кДж.

№ 3

Дано:	Решение:
A = 1 Дж	За минуту сердце сокращается 70 раз, совершая за
t = 1 мин	одно сокращение работу 1 Дж.
t' = 1 сут	Отсюда находим работу, совершаемую сердцем за су-
V = 160 см^3	тки:
n = 70	
A — ?	

$A' = nA\frac{t'}{t} = 70 \cdot 1 \text{ Дж} \cdot \dfrac{86164 \text{ с}}{60 \text{ с}} \approx 10^5 \text{ Дж} = 100 \text{ кДж}.$

Ответ: A = 100 кДж.

№ 4

Дано:	Решение:
l = 10 км=10^4м A = 980 кДж= =$9{,}8\cdot10^5$Дж μ = 0,02	$A = F_x\Delta x = F_{тр}l$. $F_{тр} = \mu N = \mu mg$. => $A = \mu mgl \Rightarrow$ $\Rightarrow m = \dfrac{A}{\mu gl} = \dfrac{9{,}8\cdot10^5 \text{ Дж}}{0{,}02\cdot9{,}8 \text{ м/с}^2\cdot10^4 \text{ м}} = 500$ кг.
m — ?	Ответ: m = 500 кг.

№ 5

Дано:	Решение:
A = 9,8 кДж= =$9{,}8\cdot10^3$Дж h = 20 м	$A = F_x\Delta x = F_тh$. $F_т = mg$. $A = mgh \Rightarrow$ $\Rightarrow m = \dfrac{A}{gh} = \dfrac{9{,}8\cdot10^3 \text{ Дж}}{9{,}8 \text{ м/с}^2\cdot20 \text{ м}} = 50$ кг.
m — ?	Ответ: m = 50 кг.

§ 31. Потенциальная энергия

ВОПРОСЫ

1. Потенциальными называются те силы, работа которых не зависит от траектории, а зависит от начального и конечного положений тел.

2. Потенциальная энергия — часть энергии механической системы, зависящая только от ее конфигурации. Потенциальная энергия численно равна работе силы при перемещении тела (всех тел системы) из данной точки в точку, потенциальная энергия которой принята за ноль.

3. Силу тяжести можно считать постоянной при небольших h, а перемещения при подъеме наверх и вниз противоположны, следовательно, суммарная работа обратится в ноль.

4. Любая система стремится принять такое состояние, при котором его потенциальная энергия окажется минимальной.

5. Устойчивое равновесие таково, что если попытаться вывести тело из состояния устойчивого равновесия, то оно будет стремиться вернуться в начальное положение (мяч у подножья горы). При неустойчивом равновесии тело удаляется от начального положения (мяч на вершине горы). При безразличном положении соседние положения также равновесны (мяч на горизонтальной поверхности).

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение
$m = 1$кг $E_p = 9{,}8$ дж	Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту H равна:
H — ?	

$E_p = mgH$. => $H = \dfrac{E_p}{mg} = \dfrac{9{,}8 \text{ Дж}}{1 \text{ кг} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2} = 1$ м. Ответ: $H = 1$ м.

№ 2

Дано:	Решение:
$H = 1$ м $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м^3 $a = 2$ м; $b = 2$ м	Параллелепипед со сторонами основания a и b и глубиной H можно заменить на материальную точку, находящейся на глубине $\dfrac{H}{2}$. Тогда
A, ΔE_p — ?	

$$A = mg\frac{H}{2} = \rho gabH\frac{H^2}{2} = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot 2 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}\frac{(1 \text{ м})^2}{2} =$$

$= 1{,}96 \cdot 10^4$ Дж $= 19{,}6$ кДж.

Учитывая $\Delta E_p = A = 19{,}6$ кДж.

Ответ: $A = \Delta E_p = 19{,}6$ кДж.

№ 3

Дано:	Решение:
$g_1 = 9{,}8$ м/с^2 $g_2 = 1{,}6$ м/с^2 $V = 200$ л$=0{,}2$ м^3 $H = 1$ м; $\rho = 10^3$ кг/м^3	Цилиндр высоты H можно заменить на материальную точку, находящейся на высоте $\dfrac{H}{2}$.
ΔE_{p1}, ΔE_{p2} — ?	$\Delta E_{p1} = 0 - mg_1\dfrac{H}{2} = -\rho Vg_1\dfrac{H}{2} =$

$$= -10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 0{,}2 \text{ м}^3 \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2\frac{1 \text{ м}}{2} = -980 \text{ Дж} = -0{,}98 \text{ кДж}.$$

$$\Delta E_{p2} = 0 - mg_2\frac{H}{2} = -\rho Vg_2\frac{H}{2} = -10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 0{,}2 \text{ м}^3 \cdot 1{,}6 \text{ м/с}^2\frac{1 \text{ м}}{2} =$$

$= -160$ Дж$= -0{,}16$ кДж. Ответ: $\Delta E_{p1} = -0{,}98$ кДж; $\Delta E_{p2} = -0{,}16$ кДж.

№ 4

Дано:	Решение:
$H = 1$ м $h = 0{,}1$ м $m = 2$ кг	Каждый словарь толщиной h можно принять за материальную точку на высоте $\frac{H}{2}$.
A — ?	Примем за нуль потенциальной энергии положение $H + \frac{h}{2}$.

Тогда $A = mg \cdot 0 + mgh + mg2h + mg3h + mg4h = mg(h + 2h + 3h + 4h) =$ $= 10\ mgh = 10 \cdot 2$ кг $\cdot$ 9,8 м/с$^2 \cdot$ 0,1 м = 19,6 Дж.
Ответ: A= 19,6 Дж.

№ 5

Дано:	Решение:
$m = 200$ кг $H = 2$ м	$A = mgH = 200$ кг $\cdot$ 9,8 м/с^2 $\cdot$ 2 м = 3920 Дж = 3,92 кДж Ответ: A= 3,92 Дж.
A — ?	

§ 32. Потенциальная энергия сил гравитации и упругости

ВОПРОСЫ

1. Если принять потенциальную энергию в бесконечности за ноль.

2. Потенциальная энергия тела на поверхности Земли:

$$E = -G \cdot \frac{mM_{\oplus}}{r}.$$

Эта энергия минимальна при минимальном r. То есть на поверхности Земли.

3. Потому что ее работа не зависит от формы траектории.

$$E_p = \frac{kx^2}{2},$$

где k — коэффициент жесткости пружины, x — изменение ее длины.

5. Потенциальная энергия пружины равна нулю, когда пружина нерастянута. При сжатой пружине x<0, при растянутой пружине x>0.

№ 1

Движение планет и спутников по эллиптической орбите не может быть равномерным, так как при таком движении постоянно меняется расстояние между телами, а значит и сила их взаимодействия.

№ 2

Дано:	Решение:
$h = R_\oplus$	При подъеме спутника совершается работа
A_1, A_2 — ?	$A_1 = G\dfrac{mM}{R_\oplus} - G\dfrac{mM}{R_\oplus + h} = G\dfrac{mM}{2R_\oplus}$.

При запуске спутника необходимо сообщить ему первую космическую скорость на данной высоте

$$v_1 = \sqrt{G\frac{M}{R_\oplus + h}} = \sqrt{G\frac{M}{2R_\oplus}}.$$

Тогда $A_2 = \dfrac{mv_1^2}{2} = \dfrac{m}{2}\cdot G\dfrac{M}{2R_\oplus} = G\dfrac{mM}{4R_\oplus}$. $\dfrac{A_1}{A_2} = G\dfrac{mM}{2R_\oplus}\cdot\dfrac{4R_\oplus}{GmM} = 2$.

Ответ: $\dfrac{A_1}{A_2} = 2$.

№ 3

Дано:	Решение:
$x_1 = 2$ см=0,02м $A_1 = 1$ Дж $x_2 = 2$ см=0,02м	$E_{p1} = A_1$. $A_1 = \dfrac{kx_1^2}{2} \Rightarrow k = \dfrac{2A_1}{x_1^2}$,
A_2 — ?	

$$E_{p2} = k\frac{(x_1 + x_2)^2}{2} = \frac{2A_1}{x_1^2}\cdot\frac{(x_1 + x_2)^2}{2} = A_1\cdot\left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2.$$

$A_2 = E_{p2} - E_{p1} =$

$$= A_1\cdot\left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 - A_1 = A_1 + 2A_1\frac{x_2}{x_1} + A_1\left(\frac{x_2}{x_1}\right)^2 - A_1 = A_1\frac{x_2}{x_1}\left(2 + \frac{x_2}{x_1}\right) =$$

$$1\text{ Дж}\cdot\frac{0{,}02\text{ м}}{0{,}02\text{ м}}\cdot\left(2 + \frac{0{,}02\text{ м}}{0{,}02\text{ м}}\right) = 3\text{ Дж}.$$

Ответ: A_2= 3 Дж.

№ 4

Дано:	Решение:
x_1 = 3 см=0,03м	$E_{p2} = \frac{k}{2}x_2^2$; $E_{p1} = \frac{k}{2}x_1^2$.
x_2 = 6 см=0,06м	
E_{p2}/E_{p1} – ?	

Тогда $\frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^2 = \left(\frac{0,06\text{ м}}{0,03\text{ м}}\right)^2 = 4$.

Ответ: $E_{p2}/E_{p1} = 4$.

№ 5

Дано:	Решение:
m = 0,2 кг	По закону сохранения энергии
ν = 2 Гц	$\frac{mv^2}{2} = \frac{kA^2}{2}, v = 2\pi\nu A$, следовательно
A = 0,2 м	
F_{max}, E — ?	$\frac{m4\pi^2\nu^2A^2}{2} = \frac{kA^2}{2}$, откуда $k = 4\pi^2\nu^2 m$.

По закону Гука

$F_{max} = kA = 4\pi^2\nu^2 mA \approx 4 \cdot 3,14^2 \cdot (2\text{ Гц})^2 \cdot 0,2\text{ кг} \cdot 0,2\text{ м} \approx 6,31$ Н.

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{4\pi^2\nu^2 mA^2}{2} \approx \frac{4\cdot 3,14^2 \cdot (2\text{ Гц})^2 \cdot 0,2\text{ кг} \cdot (0,2\text{ м})^2}{2} \approx 0,63\text{ Дж}.$$

Ответ: $F_{max} \approx 6,31$ Н; $E \approx 0,63$ Дж.

§ 33. Кинетическая энергия

ВОПРОСЫ

1. Кинетическая энергия — энергия его механического движения. Кинетическая энергия численно равна

$E_k = \frac{mv^2}{2}$ где m – масса тела, v – его скорость.

Кинетическая энергия измеряется в Джоулях.

2. Изменение кинетической энергии механической системы равно алгебраической сумме работ всех внешних и внутренних сил, действующих на эту систему.

3. Даже если равнодействующая сил не равна нулю, суммарная работа всех сил может равняться нулю в том случае, если перемещение тела перпендикулярно равнодействующей, тогда кинетическая энергия системы останется постоянной.

4. От скорости автомобиля ($l \sim v^2$) и от коэффициента трения $l \sim \dfrac{1}{\mu}$.

5. Для запуска спутника по экватору требуется меньше энергии, так как спутник уже обладает некоторой кинетической энергией связанной с вращением Земли.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$v_2 = 2v_1$	По определению кинетической энергии:
$m_2 = m_1/2$	
E_2/E_1 — ?	$E_1 = \dfrac{m_1 v_1^2}{2}$;

$$E_2 = \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1}{2} \cdot \frac{(2v_1)^2}{2} = m_1 v_1^2 = 2E_1.$$

Следовательно: $E_2/E_1 = 2$.

Ответ: $E_2/E_1 = 2$

№ 2

Дано:	Решение:
$v = 4$ м/с	По закону сохранения энергии
$m = 1$ кг	$E_{P\max} = E_{K\max}$
E_p — ?	$E_p = \dfrac{mv^2}{2} = \dfrac{1\ \text{кг} \cdot (4\ \text{м/с})^2}{2} = 8$ Дж.
	Ответ: $E_p = 8$ Дж.

№ 3

Дано:	Решение:
$m = 1$ кг	По определению кинетической энергии
$v = 60$ км/с$=6 \cdot 10^4$ м/с	
E_k — ?	$E_k = \dfrac{mv^2}{2} = \dfrac{1\ \text{кг} \cdot \left(6 \cdot 10^4\ \text{м/с}\right)^2}{2} = 1{,}8 \cdot 10^9$ Дж.
	Ответ: $E_k = 1{,}8 \cdot 10^9$ Дж.

№ 4

Дано:	Решение:
$E = 7{,}4 \cdot 10^{16}$ Дж $m = 3000$ т$=3\cdot 10^{6}$кг	По определению кинетической энергии
v — ?	$E = \dfrac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\dfrac{2E}{m}} = \sqrt{\dfrac{2\cdot 7{,}4\cdot 10^{16}\text{ Дж}}{3\cdot 10^{6}\text{ кг}}} \approx 2{,}22\cdot 10^{5}$ м/с $=$ $=222$ км/с. Ответ: $E \approx 222$ км/с.

№ 5

Дано:	Решение:
$m = 9$ г$=9 \cdot 10^{-3}$ кг $v_0 = 650$ м/с $v = 390$ м/с $\alpha = \dfrac{E_{k0} - E_0}{E_{k0}}$	По определению кинетической энергии $E_{k0} = mv_0^2/2$; $\alpha = \dfrac{mv_0^2/2 - mv^2/2}{mv_0^2/2} = \dfrac{v_0^2 - v^2}{v_0^2} == 1 - \left(\dfrac{v}{v_0}\right)^2 =$
α, $A_{сопр}$ — ?	$= 1 - \left(\dfrac{390\text{ м/с}}{650\text{ м/с}}\right) = 0{,}64.$

По теореме о кинетической энергии:

$$A_{сопр} = E_k - E_{k0} = \frac{m}{2}\left(v^2 - v_0^2\right) =$$

$$= \frac{9\cdot 10^{-3}\text{ кг}}{2}\left((390\text{ м/с})^2 - (650\text{ м/с})^2\right) \approx 1217\text{Дж}$$

Ответ: $\alpha = 0{,}64$; $A_{сопр} = 1{,}2$ кДж.

§ 34. Мощность

ВОПРОСЫ

1. Средняя мощность — скалярная величина, численно равная отношению работы к промежутку времени, в течение которого эта работа совершается. Единица измерения мощности Ватт. 1 Ватт = = 1Дж/с.

2. Мгновенная мощность — скалярная величина, численно равная отношению работы к малому промежутку времени, в течение которого эта работа совершается.

3. Мощность является скалярной величиной.

4. Чем больше скорость, тем меньшая сила тяги требуется для ее поддержания, так как $P=F_x v_x$.

5. На поддержание заданной высоты.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
m = 100 кг H = 20 м t = 9,8 с	По определению мощности $P = A/t$ Работа крана против силы тяжести $A = mgH$.
P — ?	Тогда $P = \dfrac{mgH}{t} = \dfrac{100\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 20\ \text{м}}{9{,}8\ \text{с}} = 2000$ Вт = 2 кВт. Ответ: P = 2 кВт.

№ 2

Дано:	Решение:
F =30 Н v = 40 м/мин=2/3м/с	Мощность, передаваемая ремнем
P — ?	$P = Fv = 30\ \text{Н} \cdot \dfrac{2}{3}\ \text{м/с} = 20$ Вт. Ответ: P = 2 кВт.

№ 3

Дано:	Решение:
V = 90 млн л/мин= =$1{,}5 \cdot 10^3$ м^3/с h = 100 м; ρ = 10^3 кг/м^3	Работа силы тяжести $A = mgh = \rho Vtgh$. По определению мощности $P = \dfrac{A}{t} = \dfrac{\rho Vtgh}{t} = \rho Vgh =$
P — ?	$=10^3\ \text{кг/м}^3 \cdot 1{,}5 \cdot 10^3\ \text{м}^3/\text{с} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 100\ \text{м} =$ $= 14{,}7 \cdot 10^8$ Вт = 1470 мВт. Ответ: P = 147 0мВт.

№ 4

Дано:	Решение:
A = 16 Дж n = 180 мин$^{-1}$=3 с$^{-1}$	По определению мощность
P — ?	$P = \dfrac{A}{t} = An = 16\ \text{Дж} \cdot 3\ \text{с}^{-1} = 48$ Вт. Ответ: P = 48 Вт.

№ 5

Дано:	Решение:
V = 1 л E = 20 кДж P = 80 Вт	За время Δt = 1 человеку требуется энергия $E_0 = P\Delta t$. Поскольку энергия, выделяющаяся при биохимических реакциях пропорциональна объему выдыхаемого воз-
V_0 — ?	духа, то $\dfrac{E_0}{V_0} = \dfrac{E}{V}$, откуда

$$V_0 = \frac{E_0}{E}V = \frac{P\Delta t}{E}V = \frac{80\ \text{Вт}\cdot 1\ \text{с}}{2\cdot 10^4\ \text{Дж}}\cdot 1\ \text{л} = 4\cdot 10^{-3}\ \text{л} = 4\ \text{мл}.$$

Ответ: $V_0 = 4$ мл.

§ 35. Закон сохранения механической энергии

ВОПРОСЫ

1. Полная механическая энергия системы складывается из потенциальной и кинетической энергии. По закону изменения механической энергии, изменение полной механической энергии равно работе всех непотенциальных сил системы.

2. Система тел называется консервативной, если в ней действуют только потенциальные силы.

3. Механическая энергия системы сохраняется, если работа всех непотенциальных сил равна нулю.

4. По закону сохранения энергии,

$$mgh = \frac{mv^2}{2}$$

Ситуация, когда мяч бросают вертикально вверх с некоторой начальной скоростью до высоты h, с позиции энергии равнозначна ситуации, когда мяч падает без начальной скорости с высоты h. Поэтому скорость в конце пути будет равна 5,4 м/с.

5. Это следует из закона сохранения энергии.

$$mgh + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} \Leftrightarrow v = \sqrt{v_0^2 - 2gh}$$

В это выражение не входит угол наклона вылета, поэтому скорость на высоте h одинакова для любых углов.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$v_0 = 20$ м/с	По закону сохранения механической энергии
h — ?	$\frac{mv_0^2}{2} = mgh \Rightarrow h = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{(20\ \text{м/с})^2}{2\cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2} \approx 20{,}4$ м.
	Ответ: $h \approx 20{,}4$ м.

№ 2

Дано:	Решение:
$h_1 = 18$ м $g_1 = 9{,}8$ м/с^2 $g_2 = 3{,}7$ м/с^2	По закону сохранения энергии, вся энергия сжатой пружины E перейдет в потенциальную энергию поднятого над планетой тела, то есть
h_2 — ?	$E = mg_1h_1$, $E = mg_2h_2 \Rightarrow mg_1h_1 = mg_2h_2$, откуда находим

$$h_2 = \frac{g_1}{g_2} \cdot h_1 = \frac{9{,}8\ \text{м/с}^2}{3{,}7\ \text{м/с}^2} \cdot 18\ \text{м} \approx 47{,}7\ \text{м}.$$

Ответ: $h_2 \approx 47{,}7$ м.

№ 3

Дано:	Решение:
$v_0 = 5$ м/с $h = 5$ м	По закону сохранения механической энергии (пренебрегая сопротивлением воздуха):
v — ?	$mgh + \dfrac{mv_0^2}{2} = \dfrac{mv^2}{2}$, откуда находим

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh} = \sqrt{(5\text{м/с})^2 + 2 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 5\ \text{м}} \approx 11{,}1\ \text{м/с}.$$

Ответ: $v \approx 11{,}1$ м/с.

№ 4

Дано:	Решение:
$h = 9{,}2$ км$=9{,}2 \cdot 10^3$м $v = 1080$ км/ч$=300$ м/с	По определению кинетической энергии
$\dfrac{E_k}{E}$, $\dfrac{E_p}{E}$ — ?	$E_k = \dfrac{mv^2}{2}$. Потенциальная энергия поднятого над Землей тела $E_p = mgh$. По определению полной энергии $E = E_p + E_k$.

Тогда $\dfrac{E_k}{E} = \dfrac{E_k}{E_p + E_k} = \dfrac{1}{1+\dfrac{E_p}{E_k}} = \dfrac{1}{1+\dfrac{2mgh}{mv^2}} = \dfrac{1}{1+\dfrac{2gh}{v^2}} =$

$$= \frac{1}{1+\dfrac{2 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 9200\ \text{м}}{(300\ \text{м/с})^2}} \approx 0{,}33.$$

Тогда $\dfrac{E_p}{E} = 1 - \dfrac{E_k}{E} \approx 1 - 0{,}33 \approx 0{,}67$.

Ответ: $\dfrac{E_k}{E} \approx 0{,}33$; $\dfrac{E_p}{E} \approx 0{,}67$.

№ 5

Дано:	Решение:
$m = 5$ кг	$E_p = mgh$.
$H = 10$ м	Тогда $\Delta E_p = 0 - E_p = -mgH = -5$ кг $\cdot$ 9,8 м/с^2 $\cdot$ 10 м $= -490$ Дж.
$h = 5$ м	$\Delta E_k = -\Delta E_p = 490$ Дж.
ΔE_k, ΔE_p, v — ?	По закону сохранения энергии: $mgh = mgh + \dfrac{mv^2}{2}$.

Отсюда следует

$$v = \sqrt{2g(H-h)} = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot (10 \text{ м} - 5 \text{ м})} \approx 9{,}9 \text{ м/с}.$$

Ответ: $\Delta E_p = -490$ Дж; $\Delta E_k = 490$ Дж; $v \approx 9{,}9$ м/с.

§ 36. Абсолютно неупругое и абсолютно упругое столкновения

ВОПРОСЫ

1. Абсолютно неупругий удар, тот, при котором после соударения тела движутся как одно целое. Пример: столкновение двух пластилиновых шариков.

2. Абсолютно упругий удар — тот, при котором после соударения тела разлетаются без изменения формы и объема. Пример: столкновение двух стальных шаров.

3. Часть их кинетической энергии расходуется на деформацию тел.

4. Допустим, массы шаров m_1 и m_2, а скорость первого тела v.

Абсолютно неупругий удар:

$$m_1 v = (m_1 + m_2)v' \Leftrightarrow v' = v\frac{m_1}{m_1 + m_2}.$$

Абсолютно упругий удар:

$$\begin{cases} m_1 v = m_1 v' + m_2 v'' \\ \dfrac{m_1 v^2}{2} = \dfrac{m_1 v'^2}{2} + \dfrac{m_1 v''^2}{2} \end{cases} \Leftrightarrow v'' = v \cdot \frac{2m_1}{m_1 + m_2}.$$

При абсолютно упругом ударе скорость, приобретенная покоящимся шаром больше, чем при абсолютно неупругом.

5. Потому что энергия и импульс шаров должны сохраняться.

ЗАДАЧИ

№ 1

При ковке большую энергию теряет тяжелый молоток, так как удар тяжелого молотка о заготовку значительно деформирует ее в отличие от легкого; при этом энергия переходит из механической в тепловую.

№ 2

Дано:	Решение:
v_1	Начальная кинетическая энергия шара v_0.
v_2	При центральном столкновении движущегося шара с неподвижным (шары одинаковы) вся энергия переходит неподвижному шару т. е. $v_1 = v_0$.
v_1/ v_2	

Запишем закон сохранения импульса для абсолютно неупругого столкновения шаров: $mv_0 = (m + m)v$, отсюда находим $v_2 = \dfrac{v_0}{2}$.

Следовательно $\dfrac{v_1}{v_2} = 2$.

Ответ: $\dfrac{v_1}{v_2} = 2$.

№ 3

Дано:	Решение:
$m_e << m_a$	По закону сохранения энергии и импульса:
$\dfrac{\Delta E}{E_0}$ — ?	$\begin{cases} \dfrac{m_e v_0^2}{2} = \dfrac{m_e v^2}{2} + \dfrac{m_a V^2}{2}; \\ m_e v_0 = m_e v + m_a V. \end{cases}$
	$v = v_0 - \dfrac{m_a}{m_e} V$;
	$V\left(1 + \dfrac{m_a}{m_e}\right) = 2\ v_0.$

Поскольку $m_e << m_a$, то $\dfrac{m_a}{m_e} >> 1$, значит, $m_a V = 2m_e v_0$.

По определению кинетической энергии $E_0 = \dfrac{m_e v_0^2}{2}$, энергию, которую приобретает атом равна теряемой электроном энергии

$$\Delta E=\frac{m_aV^2}{2}=\frac{1}{2m_a}\left(m_aV\right)^2=\frac{1}{2m_a}\left(2m_ev_0\right)^2=\frac{4m_e}{m_a}\cdot\frac{m_ev_0^2}{2}=\frac{4m_e}{m_a}\cdot E_0,$$

откуда находим $\frac{\Delta E}{E_0}=\frac{4m_e}{m_a}$.

Ответ: $\frac{\Delta E}{E_0}=\frac{4m_e}{m_a}$.

№ 4

Запишем закон сохранения импульса:

$0 = m_1v_1 + m_2v_2 \Rightarrow m_1v_1 = -m_2v_2$.

По определению кинетической энергии

$$E_1=\frac{m_1v_1^2}{2}=\frac{1}{2m_1}\left(m_1v_1\right)^2,$$

$$E_2=\frac{m_2v_2^2}{2}=\frac{1}{2m_2}\left(m_2v_2\right)^2=\frac{1}{2m_2}\left(m_1v_1\right)^2.$$

Тогда $\frac{E_2}{E_1}=\frac{m_1}{m_2}$, т. е. энергия частицы обратно пропорциональна ее массе.

№ 5

Дано:	Решение:
$v_0 = 600$ м/с $l = 2$ м $m = 9$ г$=9\cdot10^{-3}$кг $M = 2$ кг	По закону сохранения импульса $mv_0 = (M + m)V$. $M >> m$, $mv_0 = MV$. Тогда по определению кинетическая энергия пули $E_0=\frac{mv_0^2}{2}$, ящика
$\frac{\Delta E}{E_0}$, α — ?	$E=\frac{MV^2}{2}=\frac{\left(mv_0\right)^2}{2M}=\frac{m}{M}E_0$. Энергия, потраченная на деформацию ящика

$\Delta E = E_0 - E = E_0\left(1-\frac{m}{M}\right)$, тогда

$$\frac{\Delta E}{E_0}=1-\frac{m}{M}=1-\frac{0{,}009\text{ кг}}{2\text{ кг}}=0{,}995.$$

Ящик может подняться на высоту h, отклонившись на угол α.

По закону сохранения энергии:

$$E = Mgh;$$

$$\frac{m^2 v^2}{2M} = Mgh;$$

$$h = \left(\frac{m}{M}\right)^2 \frac{v^2}{2g} = \left(\frac{0{,}009\ \text{кг}}{2\ \text{кг}}\right)^2 \frac{(600\ \text{м/с})^2}{2 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2} = 0{,}37\ \text{м}.$$

$$\cos\alpha = \frac{l-h}{l} = 1 - \frac{h}{l} = 1 - \frac{0{,}37\ \text{м}}{2\ \text{м}} = 0{,}815.$$

Тогда $\alpha \approx 35{,}5°$.

Ответ: $\frac{\Delta E}{E_0} = 0{,}995$; $\alpha \approx 35{,}5°$.

5 Динамика периодического движения

§ 37. Движение тел в гравитационном поле

ВОПРОСЫ

1. Первая космическая скорость — минимальная скорость, необходимая для того, чтобы тело стало искусственным спутником Земли.

$$v_I = \sqrt{gR_{\oplus}}.$$

Вторая космическая скорость — минимальная скорость, необходимая для преодоления земного притяжения.

$$v_I = \sqrt{2gR_{\oplus}}.$$

Перигей — минимальное расстояние от центра эллиптической орбиты до точек эллипса.

Апогей — максимальное расстояние от центра эллиптической орбиты до точек эллипса.

1) парабола;
2) окружность;
3) эллипс;
4) парабола;
5) гипербола.

Стягивает все тела их взаимное притяжение друг к другу, а препятствует этому наличие у тел скоростей.

Луна является спутником Земли, а не самостоятельной планетой Солнечной системы, хотя Солнце притягивает ее в два раза больше, чем Земля, так как Солнце сообщает Земле и Луне примерно равные ускорения.

Считая расстояния от Солнца до Земли и от Солнца до Луны примерно равными $R_{СЗ} \approx R_{СЛ} = R$, находим:

$$M_З a_З \approx G\frac{M_С M_З}{R^2};$$

$$M_Л a_Л \approx G\frac{M_С M_Л}{R^2};\ \ \frac{a_З}{a_Л} \approx 1.$$

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$h << R$ =6400 км	$R >> h$, следовательно на спутник массы m действует сила, равная mg.
T — ?	По второму закону Ньютона:

$$\frac{mv^2}{R+h} \approx \frac{mv^2}{R} = mg \Rightarrow v = \sqrt{Rg}.$$

Поскольку $T = \frac{2\pi R}{v}$, то

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} = 2 \cdot 3{,}14 \cdot \sqrt{\frac{6{,}4 \cdot 10^6 \text{ м}}{9{,}8 \text{ м/с}^2}} \approx 5{,}08 \cdot 10^8 \text{ с} \approx 1 \text{ ч } 25 \text{ мин}.$$

Ответ: $T \approx 1$ ч 25 мин.

№ 2

Дано:	Решение:
T h<<R	Поскольку высота движения спутника много меньше радиуса планеты, то $\frac{mv^2}{R} = G\frac{Mm}{R^2}$.
ρ — ?	

Считая планету шаром, выразим ее массу M через плотность ρ и радиус R:

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3\rho. \text{ Учитывая } v = \frac{2\pi R}{T}, \text{ находим } \frac{1}{R}\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 = \frac{G}{R^2} \cdot \frac{4}{3}\pi R^3\rho \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{3\pi}{GT^2}.$$

Ответ: $\rho = \frac{3\pi}{GT^2}$.

№ 3

Дано:	Решение:
T_1 R_1 R_2	По второму закону Ньютона:
T_2 — ?	

$$\begin{cases} \frac{m_1 v_1^2}{R_1} = G\frac{Mm_1}{R_1^2}; \\ \frac{m_2 v_2^2}{R_2} = G\frac{Mm_2}{R_2^2}. \end{cases}$$

Разделим второе уравнение на первое: $\frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{R_1}{R_2}$.

Поскольку $v_1 = \frac{2\pi R_1}{T_1}$, $v_2 = \frac{2\pi R_2}{T_2}$, то

$$\frac{4\pi R_2^2}{T_2^2} \cdot \frac{T_1^2}{4\pi R_1^2} = \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow \frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{3/2}.$$

Ответ: $T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{3/2}$.

№ 4

Дано:	Решение:
$M = 2M_\oplus$ $R = 2R_\oplus$	Определим ускорение свободного падения g на планете, учитывая, что ускорение свободного падения на Земле
v_I — ?	$g_\oplus = 9{,}8$ м/с^2. $g = G\frac{M}{R^2} = G\frac{2M_\oplus}{4R_\oplus^2} = \frac{1}{2}G\frac{M_\oplus}{R_\oplus^2} = \frac{1}{2}g_\oplus$.

$$v_I = \sqrt{gR} = \sqrt{\frac{1}{2}g_\oplus \cdot 2R_\oplus} = \sqrt{g_\oplus R_\oplus}.$$

Поскольку первая космическая скорость на Земле

$v_{I\oplus} = \sqrt{g_\oplus R_\oplus} = 7{,}9$ км/с, $v_I = v_{I\oplus} = 7{,}9$ км/с.

Ответ: $v_I = 7{,}9$ км/с.

№ 5

Дано:	Решение:
$R = R_\oplus$ $v_{I\oplus} = 11{,}2$ км/с $\rho = 4\rho_\oplus$	Так как $R = R_\oplus$, то ускорение свободного падения на планете
v_{II} — ?	$g = G\frac{M}{R^2} = G\frac{M_\oplus}{R_\oplus^2}$. Учитывая, что $\rho = 4\rho_\oplus$, находим

$M = 4M_\oplus$, значит $g = 4g_\oplus$; $v_{II} = \sqrt{2Rg} = 2\sqrt{2R_\oplus g_\oplus} =$

$= 2v_{II\oplus} = 2 \cdot 11{,}2$ км/с $= 22{,}4$ км/с.

Ответ: $v_{II} = 22{,}4$ км/с.

§ 38. Динамика свободных колебаний

ВОПРОСЫ

1. Вынужденные колебания — колебания, возникающие под действием внешнего воздействия. Примером может служить периодическое раскачивание качелей.

2. Свободные колебания — колебания, происходящие в отсутствие переменных внешних воздействий и возникающие вследствие какого-либо начального отклонения этой системы от положения равновесия. Примером является движение математического маятника.

3. Период — минимальный отрезок времени, через который повторяются значения величин, характеризующих систему. Амплитуда — максимальное положительное значение колеблющейся величины.

4. Пропорционален $\sqrt{k}$ и обратно пропорционален $\sqrt{m}$.

5. Пропорциональна квадрату амплитуды.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
$m_1 = m$
$m_2 = 2m$
$k_1 = k_2 = k$
T_2/T_1 — ?

Решение:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{k_1}{m_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}};$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{k_2}{m_2}} = 2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}};$$

Следовательно $\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{2}$. Ответ: $\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{2}$.

№ 2

Дано:
v_0
ω_0
A — ?

Решение:

По закону сохранения энергии $\frac{mv_0^2}{2} = \frac{kA^2}{2}$.

Тогда получаем $A = v_0\sqrt{\frac{m}{k}}$. Учитывая $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, находим $A = \frac{v_0}{\omega_0}$.

Ответ: $A = \frac{v_0}{\omega_0}$.

№ 3

Дано:	Решение:
m = 10 г=0,01кг $x = 0{,}4\sin\left(\frac{\pi}{4}t\right)$	$\omega_0 = \frac{\pi}{4}$, => $\frac{\pi}{4} = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow k = m\frac{\pi^2}{16} \approx 0{,}01\frac{3{,}14^2}{16} \approx$ ≈0,006 Н/м = 6 мН/м.
k, $E_k(t)$, $E_p(t)$, E — ?	Потенциальная энергия

$$E_p = \frac{k}{2}x^2 = \frac{k}{2}\left(0{,}4\sin\left(\frac{\pi}{4}t\right)\right)^2 = \frac{0{,}006}{2}\cdot 0{,}16\sin^2\frac{\pi}{4}t = 4{,}8\cdot 10^{-4}\cdot\sin^2\frac{\pi}{4}t =$$

$$= 4{,}8\cdot 10^{-4}\cdot\frac{1-\cos^2\frac{\pi}{4}t}{2} = 2{,}4\cdot 10^{-4}\left(1-\cos\frac{\pi}{2}t\right).$$

Максимум потенциальной энергии (полной энергии) равен

$E = E_{p\max} = 2{,}4\cdot 10^{-4}$ Дж $\cdot$ 2 = $4{,}8\cdot 10^{-4}$ Дж, при $\cos\frac{\pi}{2}t = -1$.

Тогда кинетическая энергия равна разности полной и потенциальной энергий:

$$E_k = E - E_k = 4{,}8\cdot 10^{-4} - 2{,}4\cdot 10^{-4}\left(1-\cos\frac{\pi}{2}t\right) = 2{,}4\cdot 10^{-4}\left(1+\cos\frac{\pi}{2}t\right).$$

Отметим, что кинетическая и потенциальная энергии меняются на частоте $\frac{\pi}{2} = 2\,\omega_0$, т. е. на удвоенной частоте.

Ответ: $k \approx 6$ мН/м, $E_p = 2{,}4\cdot 10^{-4}\left(1-\cos\frac{\pi}{2}t\right)$, $E_k = 2{,}4\cdot 10^{-4}\left(1+\cos\frac{\pi}{2}t\right)$, $E = = 4{,}8\cdot 10^{-4}$ Дж.

№ 4

Дано:	Решение:
m h Δl	По закону сохранения энергии: $mg(h+\Delta l) = \frac{k\Delta l^2}{2} \Leftrightarrow k = \frac{2mg(h+\Delta l)}{\Delta l^2}$. Ответ: $k = \frac{2mg(h+\Delta l)}{\Delta l^2}$
k-?	

№ 5

Дано:	Решение:
T a	$x = x_0\sin(\omega t + \varphi_0)$
v-?	$v = x_0\omega\cos(\omega t + \varphi_0) = a\frac{2\pi}{T}\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{a\pi\sqrt{3}}{T}$

Так как если $\sin(\omega t+\varphi_0)=\frac{1}{2}$, то $\cos(\omega t+\varphi_0)=\frac{\sqrt{3}}{2}$. Ответ: $v=\frac{a\pi\sqrt{3}}{T}$

§ 39. Колебательная система под действием внешних сил

ВОПРОСЫ

1. Затухающие колебания — колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени в результате постоянной внешней силы, например трения. Пример: физический маятник, его колебания затухают под действием силы сопротивления воздуха.

2. Пружина играет роль источника энергии.

3. Апериодическое движение возникает при больших силах сопротивления. Колеблющееся тело теряет энергию и не проходит через положение равновесия. Примером можно считать амортизатор в машине.

4. При условии, что энергия колеблющейся системы не может компенсировать потери энергии на сопротивление воздуха или трение.

5. Статическим смещением — это смещение положения равновесия под действием постоянной внешней силы. Характеристики свободных колебаний при статическом смещении не изменяются.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m = 0{,}5$ кг	Так как груз находится в равновесии, то
$k = 245$ Н/м	$0=mg-k\Delta l$, т. е. $\Delta l=\frac{mg}{k}=\frac{0{,}5\text{ кг}\cdot 9{,}8\text{ м/с}^2}{245\text{ Н/м}}=0{,}02\text{ м}=2\text{ см}.$
Δl — ?	Ответ: $\Delta l = 2$ см.

№ 2

Дано:	Решение:
$\Delta l = 2$ см$=2\cdot10^{-3}$м	Т. к. картофель находится в равновесии, то
$m = 2$ кг	$0 = mg - k\Delta l$, т. е. $k=\frac{mg}{\Delta l}=\frac{2\text{ кг}\cdot 9{,}8\text{ м/с}^2}{0{,}02\text{ м}}=980\text{ Н/м}.$
k, T —	

Рассматривая весы как пружинный маятник, получаем:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta l}{g}} \approx 2\cdot 3{,}14\sqrt{\frac{0{,}02\text{ м}}{9{,}8\text{ м/с}^2}} \approx 0{,}28\text{ с.}$$

Ответ: : $k = 980$ Н/м, $T \approx 0{,}28$ с.

№ 3

Дано:	Решение:
$T = 0{,}4$ с	Когда груз совершает колебания, то их период
Δl — ?	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \Rightarrow \frac{m}{k} = \frac{T^2}{4\pi^2}$.
	Когда груз покоится $mg = k\Delta l \Rightarrow$

$$\Rightarrow \Delta l = \frac{mg}{k} = g\frac{T^2}{4\pi^2} \approx 9{,}8\text{ м/с}^2 \cdot \frac{(0{,}4\text{ с})^2}{4\cdot 3{,}14^2} \approx 0{,}04\text{ м} = 4\text{ см.}$$

Ответ: $\Delta l = 4$ см.

№ 4

Дано:	Решение:
$x = 0{,}04\cos^2\pi t$	$x = 0{,}04\frac{1+\cos 2\pi t}{2} = 0{,}02 + 0{,}02\cos 2\pi t = x_0 + A\cos\omega_0 t$,
x_0, T, A — ?	

где x_0 — статическое смещение, A — амплитуда колебаний, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ — собственная частота. Тогда $x_0 = 0{,}02$ м = 2 см, $\frac{2\pi}{T} = 2\pi$, $T = 1$ с, $A = 0{,}02$ м = 2 см. Ответ: $x_0 = 2$ см, $T = 1$ с, $A = 2$ см.

№ 5

Дано:	Решение:
$x = -0{,}04\sin^2\pi t$	$x = -0{,}04\sin^2\pi t = -0{,}04\frac{1-\cos 2\alpha}{2} = -0{,}02 + 0{,}02\cos 2\pi t =$
$m = 1$ кг	
x_0, A, T, k, ω_0 F_0, ν, — ?	$= x_0 + A\cos\omega_0 t$, где x_0 — статическое смещение,

A — амплитуда колебаний, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ — собственная частота.

Тогда $x_0 = -0{,}02$ м = – 2 см, $A = 0{,}02$ м = 2 см, $\omega_0 = 2\pi\text{ с}^{-1} \approx 6{,}28\text{ с}^{-1}$,

$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{2\pi\text{с}^{-1}} = 1\text{ с}^{-1}$, $\nu = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2\pi\text{с}^{-1}}{2\pi} = 1$ Гц. $\omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow k = m\omega_0^2 \approx$

$\approx 1\text{ кг}\cdot(6{,}28\text{ с}^{-1})^2 \approx 39{,}4$ Н/м. $F = -kx_0 \approx -39{,}4\text{ Н/м}\cdot(0{,}02\text{ м}) \approx 0{,}79$ Н.

Ответ: $x_0 = -2$ см, $T = 1$ с, $A = 2$ см, $\omega_0 \approx 6{,}28\text{ с}^{-1}$, $k = 39{,}4$ Н/м, $F \approx 0{,}79$ Н, $\nu = 1$ Гц.

§ 40. Вынужденные колебания. Резонанс

ВОПРОСЫ

1. Безразличным называется такое равновесие, при котором все соседние с данным положения равновесия также являются положениями равновесия.

2. Нет, так как основным условием существования свободных колебаний является наличие положения устойчивого равновесия.

3. Да, возможны.

4. Резонанс — резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при приближении вынуждающей частоты к собственной частоте системы. Потери энергии в результате действия сил трения приводят к уменьшению полной механической энергии системы, поэтому уменьшается и их амплитуда.

5. Чтобы избежать резонанса, необходимо изменить либо собственную частоту системы, либо вынуждающую частоту.

Резонанс используется в вибромашинах в горнодобывающей промышленности, при разработке замершего грунта.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m = 0{,}1$ кг	По второму закону Ньютона $ma = F$,
$F = 0{,}25\cos 5t$ Н	значит,
$a(t)$, a_{max}, A — ?	$a = \dfrac{F}{m} = \dfrac{0{,}25\cos 5t}{0{,}1} = 2{,}5\cos 5t$.

Так как $\cos 5t \le 1$, то $a_{max} = 2{,}5$ м/с^2. $a_{max} = \omega^2 A \Rightarrow$

$$\Rightarrow A = \frac{a_{max}}{\omega^2} = \frac{2{,}5\ \text{м/с}^2}{\left(5\ \text{с}^{-1}\right)^2} = 0{,}1\ \text{м} = 10\ \text{см}.$$

Ответ: $a(t) = 2{,}5\cos 5t$, $a_{max} = 2{,}5$ м/с^2, $A_{max} = 10$ см.

№ 2

Дано:	Решение:
$m = 0{,}1$ кг	Найдем ускорение для случая безразличного равно-
$F = 0{,}25\cos 5t$	весия из второго закона Ньютона
$A = 5A_0$	$ma_0 = F \Rightarrow$ максимальное значение ускорения
k — ?	

$a_{0\max} = \dfrac{0,25}{0,1} = 2,5$ м/с^2.

Тогда $A_0 = \dfrac{A_{0\max}}{\omega^2} = \dfrac{2,5 \text{ м/с}^2}{\left(5 \text{ с}^{-1}\right)^2} = 0,1$ м.

Пусть $F_0 = 0,25$ Н, $\omega = 5$ с$^{-1}$.

Для случая резонанса $A = \dfrac{F_0}{m\left|\omega_0^2 - \omega^2\right|} = 5\ A_0$, откуда получаем

$$\omega_0^2 = \frac{F_0}{5mA_0} + \omega^2 = \frac{0,25 \text{ Н}}{5 \cdot 0,1 \text{ кг} \cdot 0,1 \text{ м}} + \left(5 \text{ с}^{-1}\right)^2 = 30 \text{ с}^{-2}.$$

Поскольку $\omega_0^2 = \dfrac{k}{m}$, то $k = m\omega_0^2 = 0,1$ кг · 30 с$^{-1}$ = 3 Н/м. Ответ: $k = 3$ Н/м.

№ 3

Дано:	Решение:
$a_x = -0,8 \cos 4t$ м/с^2	Смещение маятника $x = -\dfrac{a_x}{\omega^2}$, значит
A — ?	

$A = \dfrac{a_{x\max}}{\omega^2}$, т. е. $A = \dfrac{0,8 \text{ м}}{\left(4 \text{ с}^{-1}\right)^2}$ =0,05 м = 5 см.

Ответ: $A = 5$ см.

№ 4

Дано:	Решение:
$F_1 = 0,5 \cos 1,9t$	Пусть $F_0 = 0,5$ Н, $\omega_1 = 1,9$ рад/с, $\omega_2 = 1,95$ рад/с.
$F_2 = 0,5 \cos 1,95t$	Учитывая $\omega_0^2 = \dfrac{k}{m}$, получаем $m = \dfrac{k}{\omega_0^2}$.
$\omega_0 = 114,6$ град/с	
$k = 50$ Н/м	
A_1, A_2 — ?	

Тогда $A_1 = \dfrac{F_0}{m\left|\omega_0^2 - \omega_1^2\right|} = \dfrac{\omega_0^2 F_0}{k\left|\omega_0^2 - \omega_1^2\right|} = \dfrac{(2 \text{ рад/с})^2 \cdot 0,5 \text{ Н}}{50 \text{ Н/м} \cdot \left|(2 \text{ рад/с})^2 - (1,9 \text{ рад/с})^2\right|} \approx 0,1$ м.

Аналогично $A_2 = \dfrac{\omega_0^2 F_0}{k\left|\omega_0^2 - \omega_2^2\right|} = \dfrac{(2 \text{ рад/с})^2 \cdot 0,5 \text{ Н}}{50 \text{ Н/м} \cdot \left|(2 \text{ рад/с})^2 - (1,95 \text{ рад/с})^2\right|} \approx 0,2$ м.

Ответ: $A_1 \approx 0,1$ м, $A_2 \approx 0,2$ м.

№ 5

Дано:	Решение:
$A = 10\,x_0$ F_0	$x_0 = \dfrac{F_0}{m\omega_0^2}$. $A = \dfrac{F_0}{m\left\|\omega_0^2 - \omega^2\right\|}$.
$\dfrac{\left\|\omega-\omega_0\right\|}{\omega_0}$ –?	Разделив первое уравнение на второе, находим

$\dfrac{x_0}{A} = \dfrac{\left|\omega_0^2 - \omega^2\right|}{\omega_0^2} = \dfrac{1}{10}$. $10\left|\omega_0^2 - \omega^2\right| = \omega_0^2$. Это уравнение сводится к двум:

$10\omega_0^2 - 10\omega^2 = \omega_0^2$; $\qquad 10\omega_0^2 - 10\omega^2 = -\omega_0^2$;

$\omega' = \dfrac{3}{\sqrt{10}}\omega_0 \approx 0{,}95\,\omega_0$; $\qquad \omega'' = \dfrac{\sqrt{11}}{\sqrt{10}}\omega_0 \approx 1{,}05\,\omega_0$

Таким образом $\left|\omega - \omega'\right| \approx \left|\omega - \omega''\right| \approx 0{,}05\,\omega_0$.

Отсюда $\dfrac{\left|\omega - \omega_0\right|}{\omega_0} \approx \dfrac{0{,}05\omega_0}{\omega_0} \approx 0{,}05 = 5\%$. Ответ: $\dfrac{\left|\omega - \omega_0\right|}{\omega_0} = 5\%$.

6 Релятивистская механика

§ 41. Постулаты специальной теории относительности

ВОПРОСЫ

1. Эти опыты показали, что движение Земли не влияет на скорость распространяемого на ней света.

2. Согласно классическому закону сложения скорость зависит от выбора системы отсчета. А из опытов Майкельсона-Морли следовало, что скорость света этому закону не подчиняется.

3. СТО рассматривает физические явления, происходящие в инерциальных системах отсчета. ОТО рассматривает физические явления, происходящие в неинерциальных (ускоренно движущихся друг относительно друга) системах отсчета.

4. В любых инерциальных системах отсчета все физические явления при одних и тех же условиях протекают одинаково.

Скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО, то есть не зависит ни от скорости источника, ни от направления движения.

5. Если бы какие-либо сигналы передавались со скоростью, большей скорости света, то мы могли бы получить информацию из черной дыры. Но так как этого не происходит, можно считать существование черных дыр подтверждением наличия верхнего предела скорости.

Радиусом Шварцшильда $R_{Ш}$ называется критический радиус черной дыры, соответствующей скорости света: $R_{Ш} = \frac{2GM}{c^2}$, где G — гравитационная постоянная, M — масса черной дыры, c — скорость света.

Горизонт событий – поверхность черной дыры, радиусом $R_{Ш}$.

§ 42. Относительность времени

ВОПРОСЫ

1. Сосуществование событий в нашем чувственном восприятии не означает их одновременности, так как скорость распространения сигналов, несущих информацию об окружающем мире, конечна.

2. Так как скорость света конечна, мы видим свет звезд, испущенный в прошлом, возможно очень далеком, то есть мы как бы заглядываем в прошлое.

3. Пусть в центре ракеты, движущейся с некоторой скоростью, излучается световой сигнал. Для наблюдателя в ракете свет достигает ее стен одновременно. Для неподвижного же наблюдателя вне ракеты эти события одновременны не будут, так как свет достигнет одной из стен раньше, чем другой.

4. Порядок следования событий не определен, если они разделены временным интервалом, большим необходимого свету, для прохождения расстояния между ними.

5. Смотри ответ 4.

§ 43. Замедление времени

ВОПРОСЫ

1. Время, измеряемое по часам, которые движутся вместе с наблюдателем, называется собственным.

2. Эффект замедления времени обусловлен свойствами самого времени.

3. При движении замедляется протекание всех физических процессов, так как это свойство самого времени. Если бы хотя бы один процесс в природе не замедлялся при движении, то с помощью него можно было бы ввести абсолютную шкалу времени.

4. Суть парадокса близнецов состоит в следующем. Один из близнецов улетает к далекой звезде со скоростью, близкой к скорости света, а второй остается на Земле. Затем первый близнец возвращается менее постаревшим, чем второй. Теперь перейдем в систему отсчета, связанную с первым близнецом. Второй близнец движется относительно него в противоположном направлении, и он должен постареть меньше. Разрешается этот парадокс потому, что для описанных процессов специальная теория относительности неприменима, так как система, связанная с первым близнецом, не является инерциальной (ее скорость изменяется на противоположную). Главный вывод из парадокса близнецов состоит в том, что он показывает границы применимости специальной теории относительности и необходимость применения общей теории относительности.

5. Проведенный в 1971 году эксперимент по исследованию замедления времени состоял в следующем. Одни цезиевые часы пыли помещены на авиалайнер, а другие остались на земле. Часы были строго синхронизованы. После облета самолетом Земли было обнаружено, что часы, находившиеся на нем, отстают на 200 нс.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$v = 2{,}6 \cdot 10^8$ м/с	Время по часам движущегося t и неподвижного t' наблюдателей связаны формулой $t = \dfrac{t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$;
$\dfrac{t}{t_1}$ — ?	

Отсюда находим

$$\frac{t}{t'} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{\left(2{,}6 \cdot 10^8 \text{ м/с}\right)^2}{\left(3 \cdot 10^8 \text{ м/с}\right)^2}}} \approx 2.$$

Ответ: $\dfrac{t}{t_1} \approx 2.$

№ 2

Дано:	Решение:
$v = 7900$ м/с	Время по часам движущегося t' и неподвижного t наблюдателей связаны формулой
$t = 1$ год	
Δt — ?	

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}.$$

Отсюда находим $t' = t\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}.$

Тогда Δt

$$= t - t' = t\left(1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right) = 3{,}15 \cdot 10^7 \text{ с}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{(7900 \text{ м/с})^2}{\left(3 \cdot 10^8 \text{ м/с}\right)^2}}\right) \approx 0{,}011 \text{ с} = 11 \text{ мс}.$$

Ответ: $\Delta t = 11$ мс.

№ 3

Дано:	Решение:
$\frac{t-t'}{t}=1\%$	Собственное время t' и время в неподвижной системе отсчета t связаны формулой $t=\frac{t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.
v — ?	

Отсюда получаем $1-\frac{v^2}{c^2}=\left(\frac{t'}{t}\right)^2 \Rightarrow v=c\sqrt{1-\left(\frac{t'}{t}\right)^2}$.

Учитывая $\frac{t-t'}{t}=0{,}01$, находим $\frac{t'}{t}=0{,}99$.

Тогда $v=c\sqrt{1-0{,}99^2}\approx 0{,}14$ с $= 4{,}2\cdot 10^7$ м/с. Ответ: $v\approx 4{,}2\cdot 10^7$ м/с.

№ 4

Дано:	Решение:
$t'=26$ Нс	Собственное время t' и время в неподвижной системе отсчета связаны формулой
$v=0{,}99$ с	
l — ?	

$$t=\frac{t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{t'}{\sqrt{1-0{,}99^2}}\text{, тогда}$$

$$l=vt=\frac{vt'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{2{,}97\cdot 10^8\ \text{м/с}\cdot 2{,}6\cdot 10^{-8}\text{с}}{\sqrt{1-0{,}99}}\approx 54{,}7\ \text{м. Ответ: } l\approx 54{,}7\ \text{м.}$$

№ 5

Дано:	Решение:
$t=6$ лет	Время по часам движущегося t' и неподвижного t наблюдателей связаны формулой $t=\frac{t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.
$t'=2$ года	
v — ?	

Отсюда получаем $v=c\sqrt{1-\left(\frac{t'}{t}\right)^2}=c\sqrt{1-\left(\frac{2\ \text{года}}{6\ \text{лет}}\right)^2}\approx 0{,}94$ с $\approx 2{,}8\cdot 10^8$ м/с.

Ответ: $v\approx 2{,}8\cdot 10^8$ м/с.

§ 44. Релятивистский закон сложения скоростей

ВОПРОСЫ

1. Согласно преобразованиям Галилея и классическому закону сложения скоростей, если скорость меньше скорости света в одной системе отсчета, может быть больше в другой, движущейся относительно нее. Это противоречит тому, что скорость света есть максимальная скорость распространения взаимодействий.

2. При переходе из системы K в систему K' скорость преобразуется по закону: $v_x = \dfrac{v'_x + v}{1 + {v'_x v}/{c^2}}$, где v_x — скорость тела в системе K, v'_x — скорость тела в системе K', v — скорость системы K' относительно системы K, c — скорость света.

3. Классический закон сложения скоростей применим при скоростях, много меньших скорости света.

4. Пусть в системе отсчета K', движущейся относительно K со скоростью v, испущен световой сигнал. Тогда скорость светового сигнала в системе K: $v_x = \dfrac{c+v}{1 + {cv}/{c^2}} = c \cdot \dfrac{c+v}{c+v} = c$, что согласуется со вторым постулатом теории относительности (о постоянстве скорости света).

5. Согласно релятивистскому закону сложения скорость света не зависит от выбора системы отсчета, что подтверждает эксперимент Майкельсона-Морли.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$v_1 = 0{,}5\ c$	По классическим представлениям
$v_2 = -0{,}5\ c$	$v_1 = v_{12} + v_2 \Rightarrow v_{12} = v_1 - v_2 = 0{,}5\ c - (-0{,}5\ c) = c$.
v_{12} — ?	По релятивистским представлениям
	$v_1 = \dfrac{v_{12} + v_2}{1 + \dfrac{v_{12} v_2}{c^2}}$.

Значит, $v_1 + v_{12} \dfrac{v_1 v_2}{c^2} = v_{12} + v_2$.

Отсюда находим $v_{12} = \dfrac{v_1 - v_2}{1 - \dfrac{v_1 v_2}{c^2}} = \dfrac{0{,}5\text{ c} - (-0{,}5\text{ c})}{1 - \dfrac{0{,}5\text{ c} \cdot (-0{,}5\text{ c})}{c^2}} = 0{,}8$ с.

Ответ: $v_{12} = c$ по классическим представлениям; $v_{12} = 0{,}8\ c$ по релятивистским представлениям.

№ 2

Дано:
$v = 0{,}9\ c$

v' — ?

Решение:
Пользуясь формулой, полученной в задаче №1 данного параграфа, запишем: $v' = \dfrac{c - v}{1 - \dfrac{vc}{c^2}} = \dfrac{c - v}{1 - \dfrac{v}{c}} = c\dfrac{c - v}{c - v} = c.$

Этот результат очевиден, поскольку известно, что скорость света инвариантна во всех инерциальных системах отсчета. Ответ: $v' = c$.

№ 3

Дано:
$v_1 = 0{,}75c$
$v_2 = -\,0{,}75c$

v_{12} — ?

Решение:
Пользуясь формулой полученной в задаче №1 данного параграфа запишем:

$$v_{12} = \frac{v_1 - v_2}{1 - \dfrac{v_1 v_2}{c^2}} = \frac{0{,}75c - (-0{,}75c)}{1 - \dfrac{0{,}75c \cdot (-0{,}75c)}{c^2}} = 0{,}96\text{ с.}$$

Ответ: $v_{12} = 0{,}96$ с.

№ 4

В релятивистской механике скорость света не зависит от выбора системы отсчета то есть два лазерных импульса в противоположных направлениях распространяются относительно друг друга со скоростью c. По классическим представлениям они движутся друг относительно друга со скоростью $c - (-\,c) = 2c$.

№ 5

Дано:
$v_0 = 0{,}8c$
$v = 0{,}976c$

v' — ?

Решение:
Пользуясь формулой, полученной в задаче №1 данного параграфа, запишем:

$$v' = \frac{v - v_0}{1 - \dfrac{v v_0}{c^2}} = \frac{0{,}976c - 0{,}8c}{1 - \dfrac{0{,}976c \cdot 0{,}8c}{c^2}} \approx 0{,}8\ c.$$ Ответ: $v' \approx 0{,}8\ c$.

§ 45. Взаимосвязь массы и энергии

ВОПРОСЫ

1. Масса тела в системе, относительно которой тело находится в состоянии покоя, называется массой покоя.

2. Эксперимент по искривлению траектории света звезд под действием притяжения Солнца подтверждает конечность массы фотона.

3. В классической механике масса инвариантна, не зависит от энергии, поэтому в ней два отдельных закона: сохранения массы и сохранения энергии.

4. Нагревание тела увеличивает его энергию, а, значит, и массу, которая пропорциональна энергии. В обычной жизни таких эффектов не наблюдается из-за большой величины скорости света.

5. Скорость света — предельная скорость распространения взаимодействий, эффект замедления времени, взаимосвязь массы и энергии.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг	$E_0 = m_e c^2 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг $\cdot (3 \cdot 10^8$ м/с$)^2 \approx 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж.
E_0 — ?	Ответ: $E_0 \approx 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж.

№ 2

Энергия покоя электрона $E_e = m_e c^2 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг $\cdot (3 \cdot 10^8$ м/с$)^2 \approx$ $\approx 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж.

Энергия покоя протона $E_p = m_p c^2 = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг $\times$ $\times (3 \cdot 10^8$ м/с$)^2 \approx 1{,}5 \cdot 10^{-10}$ Дж. Поскольку 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж, то 1 Дж $= \dfrac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}$ эВ $= 6{,}25 \cdot 10^{18}$ эВ. Тогда выразим массу электрона и протона в электрон-вольтах:

$m_e = 8{,}2 \cdot 10^{-14} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{18}$ эВ $\approx 5{,}1 \cdot 10^5$ эВ $= 0{,}51$ МэВ.

$m_p = 1{,}5 \cdot 10^{-10} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{18}$ эВ $\approx 9{,}38 \cdot 10^8$ эВ $= 9{,}38$ МэВ.

№ 3

Дано:	Решение:
$E = 1083$ МэВ	
$E_0 = 1{,}5 \cdot 10^{-10}$ Дж	Поскольку $E = mc^2$, а $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, то $E = \dfrac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$.
t — ?	

Учтем также, что $E_0 = m_0c^2$, т. е.

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow v = c\sqrt{1-\left(\frac{E_0}{E}\right)^2} = = 3\cdot 10^8 \text{ м/с}^2 \sqrt{1-\left(\frac{1,5\cdot 10^{-10}\text{ Дж}}{1,773\cdot 10^{-10}\text{ Дж}}\right)^2} \approx$$

$\approx 1,6 \cdot 10^8$ м/с. $t = \frac{l}{v} = \frac{1,5\cdot 10^{11}\text{ м}}{1,6\cdot 10^8\text{ м/с}} \approx 9,4 \cdot 10^2$ с ≈ 16 мин. Ответ: $t \approx 16$ мин.

№ 4

Дано:	Решение:
$E_0 = 0,51$ МэВ. $v_1 = 0,6c$ $v_2 = 0,8c$	$E_1 = \frac{m_ec^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_ec^2}{\sqrt{1-0,6^2}} = \frac{5}{4}m_ec^2$,
A — ?	

$$E_2 = \frac{m_ec^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_ec^2}{\sqrt{1-0,8^2}} = \frac{5}{3}m_ec^2.$$

По теореме о кинетической энергии, верной и в релятивистском случае $A = E_2 - E_1 =$

$$= \frac{5}{3}m_ec^2 - \frac{5}{4}m_ec^2 = \frac{5}{12}m_ec^2 = \frac{5}{12}E_0 = \frac{5}{12}\cdot 0,51\text{ МэВ} \approx 0,213\text{ МэВ}.$$

Ответ: $A \approx 0,213$ МэВ.

№ 5

Дано:	Решение:
$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг $E_0 = 1875,6$ МэВ	По закону сохранения энергии $\Delta E = m_pc^2 + m_nc^2 - E_0 = c^2(m_p + m_n) - E_0 =$ $= (3,8 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 \cdot (1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} + 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}) -$ $- 3 \cdot 10^{-10}$ Дж $= 1,32 \cdot 10^{-12}$ Дж.
$\frac{m_{об}}{M}$ — ?	

Поскольку 1 Дж $= 6,25 \cdot 10^{18}$ эВ по результатам задачи №2 данного параграфа, то: $\Delta E = 1,32 \cdot 10^{-12} \cdot 6,25 \cdot 10^{18}$ эВ $= 8,25 \cdot 10^6$ эВ $= 8,25$ МэВ.

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{1,32\cdot 10^{-12}\text{ Дж}}{\left(3\cdot 10^8\text{ м/с}\right)^2} \approx 1,47 \cdot 10^{-29}\text{ кг}.$$

Ответ: $\Delta E = 8,25$ МэВ, $\Delta m \approx 1,47 \cdot 10^{-29}$ кг.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

7 Молекулярная структура вещества

§ 46.Масса атомов. Молярная масса.

ВОПРОСЫ

1. Совокупность взаимодействующих между собой и движущихся атомов (молекул) представляет собой модель материального тела.

2. Главной характеристикой химического элемента является заряд ядра.

3. Массовым числом называют число нуклонов в ядре атома.

4. Дефектом массы называют разность суммарной массы отдельных частиц, которые входят в состав ядра (атома), и полной массы ядра (атома). Он объясняется уменьшением массы ядра, которое образуется при объединении нуклонов по сравнению с суммарной массой этих нуклонов до объединения.

5. Постоянная Авогадро — это число частиц (атомов или молекул), которые содержатся в 1 моле вещества:

$$N_A = 6{,}022 * 10^{23}\ моль^{-1}.$$

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
M = 12 а. е. м. $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг $\frac{m_{об}}{M}$ — ?	В атоме углерода ${}^{12}_{6}C$ 6 электронов, поэтому масса электронной оболочки $m_{об} = 6\ m_e$.

Тогда $\frac{m_{об}}{M} = \frac{6m_e}{M} = \frac{6 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ кг}{1{,}992 \cdot 10^{-26}\ кг} \approx 2{,}74 \cdot 10^{-4}$.

Ответ: $\frac{m_{об}}{M} \approx 2{,}74 \cdot 10^{-4}$.

№ 2

После замены протонов на нейтроны и нейтронов на протоны мы получим:

1) ${}_{4}^{9}Be \to {}_{5}^{9}B,\ z = 5, A = 9;$

2) ${}_{7}^{13}N \to {}_{6}^{13}C,\ z = 6, A = 13;$

3) ${}_{11}^{23}Na \to {}_{12}^{23}Mg,\ z = 12, A = 23.$

№ 3

Дано:	Решение:
$m_\Sigma = 2{,}009 \cdot 10^{-26}$ кг	Используя закон сохранения энергии
$M = 1{,}992648 \cdot 10^{-26}$ кг	$\Delta E = (m_\Sigma - M)c^2 = (2{,}009 \cdot 10^{-26}$ кг –
ΔE — ?	$- 1{,}992648 \cdot 10^{-26}$ кг$) \times (3 \cdot 10^8$м/с$)^2 \approx 1{,}471 \cdot 10^{-11}$ Дж.

В силу того, что: 1 Дж = $6{,}25 \cdot 10^{18}$ эВ, то

$\Delta E = 1{,}471 \cdot 10^{-11} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{18}$ Эв $\approx 9{,}19 \cdot 10^7$ эВ = = 91,9 МэВ.

Ответ: $\Delta E = 91{,}9$ МэВ.

№ 4

Дано:	Решение:
$m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг	В атоме ${}_{5}^{10}B$ содержится 5 электронов, 5 про-
$m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг	тонов, и 10 – 5 = 5 нейтронов, поэтому дефект
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг	массы равен:
$M = 10{,}013$ а. е. м.	$\Delta m = 5m_p + 5m_n + 5m_e - M = 5(m_p + m_n + m_e) - M =$
Δm — ?	

$= 5(1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг$+1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг $+ 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг$) - - 1{,}662 \cdot 10^{-25}$ кг $=$ $= 1{,}245 \cdot 10^{-28}$ кг. Так как: 1 а. е. м. = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг,

1 кг = $\dfrac{1}{1{,}66 \cdot 10^{-27}}$ а. е. м. $\approx 6{,}024 \cdot 10^{26}$ а. е. м, мы получим

$\Delta m = 1{,}241 \cdot 10^{-28} \cdot 6{,}024 \cdot 10^{26}$ а. е. м. $\approx 0{,}075$ а. е. м.

Ответ: $\Delta m \approx 0{,}075$ а. е. м.

№ 5

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

1 кг = $\dfrac{1}{1{,}66 \cdot 10^{-27}}$ а. е. м. = $6{,}024 \cdot 10^{26}$ а. е. м.

1) Масса протона $1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг = $1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг $\cdot 6{,}024 \cdot 10^{26}$ а. е. м. $\approx$ $\approx 1{,}007$ а. е. м.

2) Масса нейтрона $1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг = $1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг $\cdot 6{,}024 \cdot 10^{26}$ а. е. м. $\approx$ $\approx 1{,}009$ а. е. м.

3) Дефект массы дейтона:

$3{,}965 \cdot 10^{-30}$ кг $= 3{,}965 \cdot 10^{-30}$ кг $\cdot\ 6{,}024 \cdot 10^{26}$ а. е. м. $\approx 0{,}002388$ а. е. м.

§ 47.Агрегатные состояния вещества

ВОПРОСЫ

1. Твердое, жидкое, газообразное, плазменное. При фазовых переходах изменяется энергия частиц.

2. Если средняя кинетическая энергия молекул много меньше средней потенциальной энергии их притяжения.

Частицы твердого тела колеблются около положений равновесия.

3. Если средняя потенциальная энергия притяжения молекул соизмерима с их средней кинетической энергией. Упорядоченное расположение частиц наблюдается в пределах нескольких слоев. Относительные положения молекул не фиксированы, и они оттносительно медленно изменяют положение друг относительно друга.

4. Если средняя потенциальная энергия молекул много меньше их средней кинетической энергии.

1)Размеры молекул много меньше среднего расстояния между ними.

2)На расстоянии больше диаметра молекул средняя потенциальная энергия молекул много меньше их средней кинетической энергии.

3)Столкновения молекул со стенками сосуда и между собой считаются абсолютно упругими.

5. Электроны, неоны и нейтральные атомы. Примером плазмы является солнечный ветер (поток плазмы, который испускается солнцем).

8 Молекулярно-кинетическая теория идеального газа

§ 48. Распределение молекул идеального газа в пространстве

ВОПРОСЫ

1. Свойства разреженных газов не зависят от их состава, потому что средней потенциальной энергией взаимодействия молекул, которой определяется состав газа, можно пренебречь.

2. Потому что мы не можем экспериментально определять скорости и координаты отдельных молекул и количество уравнений, описывающих такое движение, очень велико.

3. Газ неограниченно расширяется (занимает весь предоставленный ему объем), так как средняя кинетическая энергия движения молекул много больше средней потенциальной энергии их взаимодействия.

4. Аромат духов распространяется в течение достаточно большого времени, так как молекулы газа движутся хаотически, испытывая постоянные столкновения.

5. В отсутствие внешних сил молекулы газа распределены в пространстве однородно, так как движение молекул хаотично, а пространство однородно.

ЗАДАЧИ

№ 1

Используем следующую формулу: $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$, здесь n — общее число частиц, k — число частиц в одной половине сосуда, C_n^k — число таких возможных состояний. 1) Полное число $2^6 = 64$.

2) $< 3/3 >: C_{3+3}^3 = C_6^3 = \frac{6!}{3!(6-3)!} = \frac{720}{6 \cdot 6} = 20.$

3) $< 2/4 >: C_{2+4}^2 = C_6^2 = \frac{6!}{2!(6-2)!} = \frac{720}{2 \cdot 24} = 15.$

4) < 1/5 > : $C_{5+1}^{1} = C_{6}^{1} = \frac{6!}{1!(6-1)!} = \frac{720}{1 \cdot 120} = 6.$

№ 2

Дано:	Решение:
$T = 24$ ч	Используя предыдущую задачу мы находим, что полное число состояний в системе шести частиц, распределенных по двум половинам сосуда: $2^6 = 64$, число равновесных состояний
t — ?	

$\frac{6!}{3! \cdot 3!} = 20$. Отсюда $t = T\frac{20}{64} = 24\text{ ч} \cdot \frac{20}{64} = 7{,}5$ ч. Ответ: $t = 7{,}5$ ч.

№ 3

Дано:	Решение:
$N = 10$	Время наблюдения прямо пропорционально полному числу микросостояний $T \sim 2^N = 2^{10} = 1024$, время нахождения системы в равновесном состоянии пропорционально числу состояний $\left\langle \frac{N}{2}; \frac{N}{2} \right\rangle$, поэтому:
$\frac{t}{T}$ — ?	

$$t \sim \frac{N!}{\frac{N}{2}! \cdot \frac{N}{2}!} = \frac{10!}{\frac{10}{2}! \cdot \frac{10}{2}!} = \frac{10!}{(5!)^2} = \frac{3628800}{14400} = 252. \text{ Тогда } \frac{t}{T} = \frac{252}{1024} = \frac{63}{256}.$$

Ответ: $\frac{t}{T} = \frac{63}{256}$.

№ 4

Дано:	Решение:
$N = 10$	Обозначим за $t_{\langle 0/10 \rangle}$ время пребывания системы в состояниях $\langle 0/10 \rangle$ и $\langle 10/0 \rangle$. Получим:
$\frac{t_{\langle 5/5 \rangle}}{t_{\langle 0/10 \rangle}}$ — ?	

$$t_{\langle 5/5 \rangle} \sim \frac{N!}{\left(\frac{N}{2}\right)! \cdot \left(\frac{N}{2}\right)!} = \frac{10!}{\left(\frac{10}{2}\right)! \cdot \left(\frac{10}{2}\right)!} = 252; \quad t_{\langle 0/10 \rangle} \sim \frac{N!}{0! \cdot (N-0)!} + \frac{N!}{N! \cdot (N-N)!} =$$

$1 + 1 = 2.$

Тогда можно найти: $\frac{t_{\langle 5/5 \rangle}}{t_{\langle 0/10 \rangle}} = \frac{252}{2} = 126$. Ответ: $\frac{t_{\langle 5/5 \rangle}}{t_{\langle 0/10 \rangle}} = 126$.

№ 5

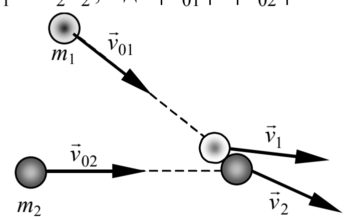
Дано:	Решение:
$N = 6$	Полное число микросостояний $N_{max}=3^N = 3^6 = 729$. В состоянии $\langle 2\|2\|2 \rangle$ число микросостояний $\frac{6!}{2!\cdot 2!\cdot 2!} = \frac{720}{2\cdot 2\cdot 2} = 90$. Так как $t_{\langle 2\|2\|2 \rangle} \sim 90$, $t_{max} \sim 729$, То мы получаем:
N_{max}, $\frac{t_{\langle 2\|2\|2 \rangle}}{t_{max}}$ — ?	

$\frac{t_{\langle 2|2|2 \rangle}}{t_{max}} = \frac{90}{729} = \frac{10}{81}$. Ответ: $N_{max} = 729$, $\frac{t_{\langle 2|2|2 \rangle}}{t_{max}} = \frac{10}{81}$.

§ 49.Распределение молекул идеального газа по скоростям

ВОПРОСЫ

1. В векторном виде данный закон принимет вид: $m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$, где $|\vec{v}_{01}| = |\vec{v}_{02}| = v$.



23

2. Для определения среднего значения физической величины $\overline{A}$ из эксперимента необходимо измерить ее N раз, тогда мы получим значения A_1, A_2, …, A_N. Пусть значения A_1 получается ΔN_1 раз, A_2 — ΔN_2 раз, …, A_i — ΔN_i раз, причем $\Delta N_1 + \Delta N_2 + \ldots + \Delta N_i = N$.

Тогда $\overline{A} = \frac{A_1\Delta N_1 + A_2\Delta N_2 + \ldots + A_i\Delta N_i}{N}$.

3. Вращающиеся диски в опыте Штерна применяют для того, чтобы отсортировать молекулы по скоростям.

4. Количество частиц, приходящихся на единичный интервал скоростей, рассчитывается по формуле $\frac{\Delta N}{\Delta v}(v)$.

5. Скорость молекул, которой обладает наибольшее количество молекул, называется наивероятной.

№ 1

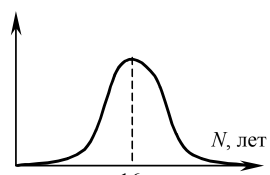
Для выполнения задани воспользуйтесь формулой: $\overline{W} = \dfrac{W_1N_1 + W_2N_2 + ... + W_nN_n}{N}$, где $\overline{W}$ — средний возраст семьи, N_i — число входящих в возрастную группу W_i, $i = 1, 2, \ldots, n$, N — общее число человек в семье, $N = N_1 + N_2 + \ldots N_n$.

№ 2

Дано:	Решение:
$v_{ср} = 450$ м/с	$\Delta v = v\dfrac{\Delta\alpha}{\alpha} = 450\text{ м/с}\cdot\dfrac{2^\circ}{90^\circ} = 10$ м/с.
$\alpha = 90°$	Ответ: $\Delta v = 10$ м/с.
$\Delta\alpha = 2°$	
Δv — ?	

№ 3

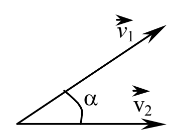
Для удобства решения можно построить гистограмму распределения, т. е. зависимость числа учащихся ΔN возраста от этого возраста. Примерный вид такой гистограммы приведен на рисунке 26. Максимум распределения на гистограмме показывает наиболее вероятный возраст. Как видно из рисунка 26 этот возраст 16 лет.



24.

№ 4

Пусть масса шаров m, начальная скорость первого шара $\vec{v}$, скорости шаров после соударения $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, угол разлета шаров α. По законам сохранения энергии и импульса: $\begin{cases} m\vec{v} = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2; \\ \dfrac{mv^2}{2} = \dfrac{mv_1^2}{2} + \dfrac{mv_2^2}{2}, \end{cases}$ откуда



25.

получаем $\begin{cases} \vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \\ v^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$ Построим рисунок, соответствующий первому уравнению системы: по теореме косинусов

$v^2 = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos(\pi - \alpha) = v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2\cos\alpha$. Учитывая второе уравнение системы, получаем, что cos α = 0, т. е. $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

№ 5

Если бы было выбранное направление, то молекулы, передавая свой импульс стенкам сосуда, привели бы его в движение, чего не наблюдается на практике. Значит, выбранного направления движения молекул газа нет.

§ 50.Температура

ВОПРОСЫ

1. Состояние газа, при котором количество молекул, приходящихся на заданный интервал скоростей, остается постоянным с течением времени, называется равновесным стационарным состоянием.

2. Температура является мерой средней кинетической энергии поступательного хаотического движения молекул:

$$\frac{3}{2}kT = \frac{\overline{m_a v^2}}{2}.$$

Единицей измерения температуры в СИ является кельвин (1 К).

3. Понятие температуры нельзя применить к одной молекуле.

4. Потому что термодинамическая температура есть мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул, т.е. по определению положительной величины.

5. Средняя квадратичная скорость молекул различных газов, составляющих воздух, различна, так как различны массы молекул.

ЗАДАЧИ

№ 1

Перевод из шкалы Цельсия t в школу Фаренгейта T_F осуществляется по формуле $T_F = 32 + 1{,}8t$. Тогда:

1) Температура таяния льда $t = 0°C \Rightarrow T_F = (32 + 1{,}8 \cdot 0°C)F = 32\ F$.

Температура кипения воды $t = 100°C \Rightarrow T_F = (32 + 1{,}8 \cdot 100°C)F = 212\ F$.

Нормальная температура человеческого тела $t = 36{,}6°C \Rightarrow$

$\Rightarrow T_F = (32 + 1{,}8 \cdot 36{,}6°C)\ F = 97{,}88\ F$.

№ 2

Показания термометров по шкалам Цельсия и Фаренгейта одинаковы, значит, учитывая переход из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия, мы можем записать $t = 32 + 1{,}8t$.

Решая это уравнение, находим $t = -40$°C.

№ 3

Переход из абсолютной шкалы температур в шкалу Цельсия осуществляется по формуле $t = T - 273$, а переход из шкалы Цельсия в шкалу Фаренгейта — по формуле

$$T_F = 32 + 1{,}8t.$$

Значит, $T_F = 32 + + 1{,}8(T - 273) = -459{,}4 + 1{,}8T$. Таким образом, мы можем записать $T = -459{,}4 + 1{,}8T$.

Решая это уравнение, находим $T = 574{,}25$ К.

№ 4

Дано:	Решение:
$t = 20$°C $M_1 = 0{,}032$ моль$^{-1}$ $M_2 = 0{,}04$ моль$^{-1}$	$v_1 = \sqrt{\dfrac{3RT}{M_1}} = \sqrt{\dfrac{3 \cdot 8{,}31 \dfrac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 298\ \text{К}}{0{,}032\,кг \cdot \text{моль}^{-1}}} \approx 478$ м/с;
v_1, v_2 — ?	

$$v_2 = \sqrt{\frac{3RT}{M_2}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8{,}31 \dfrac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 298\ \text{К}}{0{,}04\,кг \cdot \text{моль}^{-1}}} \approx 427 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v_1 \approx 478$ м/с, $v_2 \approx 427$ м/с.

№ 5

Дано:	Решение:
$v = 90$ км/ч $M = 2{,}8 \cdot 10^{-2}$ кг/моль	$\dfrac{m_0 v^2}{2} = \dfrac{3}{2} kT,$
T — ?	поэтому получаем, что

$T = \dfrac{m_0 v^2}{3k}$. В силу того, что $m_0 = \dfrac{M}{N_А}$, то

$$T = \frac{Mv^2}{3kN_А} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-2}\ \text{кг/моль} \cdot (25\ \text{м/с})^2}{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{Дж/К} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{-23}\ \text{моль}^{-1}} \approx 0{,}7\ \text{К}.$$

Ответ: $T \approx 0{,}7$ К.

§ 51. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

ВОПРОСЫ

1. Барабанная перепонка уха человека не продавливается бомбардирующими ее молекулами, так как давления по обе стороны барабанной перепонки примерно равны.

2. Эксперимент фон Герике показал, что атмосферное давление имеет значительную величину.

3. Давление p идеального газа равно одной трети произведения массы молекулы $m_а$, концентрации молекул n и среднему квадрату скорости $\overline{v^2}$ их хаотического движения:

$$p = \frac{1}{3} n m_а \overline{v^2}.$$

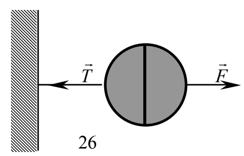
4. Потому что на таких высотах концентрация молекул очень мала.

5. Давление смеси идеальных газов p равно сумме парциальных давлений p_1, p_2, …, p_N всех газов, составляющих смесь: $p = p_1 + p_2 + \ldots + p_N$.

ЗАДАЧИ

№ 1

Сила тяги удвоится, потому что стена неподвижная (см. рисунок).



26

№ 2

Дано:	Решение:
$p = 1{,}01 \cdot 10^5$ Па $v = 500$ м/с	Из основного уравнения МКТ идеального газа мы имеем: $p = \frac{1}{3}\rho v^2 \Rightarrow \rho = \frac{3p}{v^2} = \frac{3 \cdot 1{,}01 \cdot 10^5 \text{ Па}}{(500 \text{ м/с})} \approx$ $\approx 1{,}21$ кг/м^3. Ответ: $\rho = 1{,}21$ кг/м^3.
ρ — ?	

№ 3

Дано:	Решение:
$v = 550$ м/с $M = 3{,}2 \cdot 10^{-2}$ кг/моль $n = 10^{25}$ м$^{-3}$	Масса одной молекулы рассчитывается по формуле: $m_0 = \frac{M}{N_А}$. Из основного уравнения МКТ идеального газа получаем:
p — ?	

$$p=\frac{1}{3}m_0nv^2=\frac{1}{3}\frac{M}{N_А}nv^2=\frac{1}{3}\frac{3{,}2\cdot10^{-2}\ \text{кг/моль}}{6{,}02\cdot10^{23}\ \text{моль}^{-1}}\cdot10\ \text{м}^{-3}\cdot(550\ \text{м/с})^2\approx$$

$\approx$ 53600 Па = 53,6 кПа.

Ответ: $p\approx$ 53,6 кПа.

№ 4

Дано:	Решение:
$V=1\ 0^{-3}$ м^3 $P=10^5$ Па	Из основного уравнения МКТ идеального газа получаем: $p=\frac{2}{3}n\overline{E}$.
U — ?	

В силу того, что $n=\frac{N}{V}$, мы получаем $\overline{E}=\frac{3V}{2N}p$. Для идеального газа $U=N\overline{E}$, следовательно, $U=\frac{3}{2}Vp=\frac{3}{2}\cdot10^{-3}$ м$^3\cdot10^5$ Па = 150 Дж.

Ответ: U = 150 Дж.

№ 5

Дано:	Решение:
$n_1=7{,}8\cdot10^{24}$ м$^{-3}$ $n_2=2{,}4\cdot10^{24}$ м$^{-3}$ $n_3=10^{23}$ м$^{-3}$ $\overline{E}=3\cdot10^{-21}$ Дж	Из основного уравнения МКТ идеального газа получаем: $p_1=\frac{2}{3}n_1\overline{E}$, $p_2=\frac{2}{3}n_2\overline{E}$, $p_3=\frac{2}{3}n_3\overline{E}$. По закону Дальтона давление равно
p — ?	

$$p=p_1+p_2+p_3=\frac{2}{3}n_1\overline{E}+\frac{2}{3}n_2\overline{E}+\frac{2}{3}n_3\overline{E}=\frac{2}{3}\overline{E}\,(n_1+n_2+n_3)=\frac{2}{3}\cdot3\cdot10^{-21}\ \text{Дж}\times$$

$\times$ (7,8 $\cdot$ 10^{24} м$^{-3}$ + 2,4 $\cdot$ 10^{24} м$^{-3}$ + 10^{23} м$^{-3}$) = 2 $\cdot$ 10^4 Па = 20 кПа.

Ответ: p = 20 кПа.

§ 52. Уравнение Клайперона–Менделеева

ВОПРОСЫ

1. Нормальные условия для идеального газа: давление газа равно 101 кПа, его температура — 273 К.

2. Концентрация молекул идеального газа при нормальных условиях равна 2,7 $\cdot$ 10^{25} м$^{-3}$. Эту величину называют постоянной Лошмидта.

3. Расстояние между атомами идеального газа много больше размеров атомов.

4. Уравнение Клапейрона-Менделеева связывает давление p идеального газа, его объем V и температуру T газа: $pV = \nu RT$, где R — универсальная газовая постоянная.

5. Для однозначного определения состояния идеального газа необходимо задать одну из трех пар параметров (p, V), (p, T) или (V, T).

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$V_2 = \frac{1}{4}V_1$ $T_2 = 1{,}5T_1$	По уравнению Менделеева-Клапейрона $p_1V_1 = \frac{m}{M}RT_1, \quad p_2V_2 = \frac{m}{M}RT_2.$
$\frac{p_2}{p_1}$ — ?	Отсюда следует $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}\frac{V_1}{V_2} = 1{,}5 \cdot 4 = 6.$

Ответ: $\frac{p_2}{p_1} = 6$.

№ 2

Дано:	Решение:
$p = 10^3$ Па $T = 315$ К	$p = nkT \Rightarrow n = \frac{p}{kT} = \frac{10^3\ \text{Па}}{1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{Дж/К} \cdot 315\ \text{К}} \approx$ $\approx 2{,}3 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$.
n, $\bar{l}$ — ?	Оценим среднее расстояние между молекулами:

$$\bar{l} = n^{-1/3} = \left(2{,}3 \cdot 10^{23}\ \text{м}^{-3}\right)^{-1/3} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-8}\ \text{м}.$$

Ответ: $n \approx 2{,}3 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$, $\bar{l} = 1{,}6 \cdot 10^{-8}$ м.

№ 3

Допустим, площадь класса равна $S = 20$ м^2, а его высота равна $h = 2{,}5$ м. Тогда объем класса получится равным $V = Sh = 20\ \text{м}^2 \cdot 2{,}5\ \text{м} = 50\ \text{м}^3$. Предположим, что давление равно $p = 10^5$ Па, температура $T = 20°\text{C} = 293$ К. Тогда $p = nkT = \frac{N}{V}kT$, т.е.

$$N = \frac{pV}{kT} = \frac{10^5\ \text{Па} \cdot 50\ \text{м}^3}{1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{Дж/К} \cdot 293\ \text{К}} \approx 1{,}23 \cdot 10^{27}.$$

№ 4

Дано:	Решение:
$\nu = 1$ моль $T = 293$ К $p = 1{,}01 \cdot 10^5$ Па V — ?	Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона мы можем записать: $pV = \nu RT$, откуда следует, что $V = \frac{\nu}{p} RT = \frac{1 \text{ моль}}{1{,}01 \text{ Па}} \cdot 293 \text{ К} \cdot 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \approx$ $\approx 0{,}0224$ м^3 = 22,4 л. Ответ: $V = 22{,}4$ л.

№ 5

Дано:	Решение:
$V = 4$ л $T = 20°$C $m_1 = 2$ г $M_1 = 2$ г/моль $m_2 = 4$ г $M_2 = 4$ г/моль p_1, p_2 — ?	Из уравнения Менделеева-Клапейрона получаем: $p_1 V = \frac{m_1}{M_1} RT \Rightarrow$ $p_1 = \frac{m_1}{M_1 V} RT = \frac{2 \text{ г}}{2 \text{ г/моль} \cdot 0{,}004 \text{м}^3} \cdot 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \cdot 293 \text{К} \approx$ $\approx 6{,}06 \cdot 10^5$ Па.

Аналогично:

$$p_2 = \frac{m_2}{M_2 V} RT = \frac{4 \text{ г}}{4 \text{ г/моль} \cdot 0{,}004 \text{м}^3} \cdot 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \cdot 293 \text{К} \approx$$

$\approx 6{,}06 \cdot 10^5$ Па.

$p = p_1 + p_2 = 6{,}06 \cdot 10^5 = 1{,}21$ Мпа.

Ответ: $p = 6{,}06 \cdot 10^5 = 1{,}21$ Мпа.

§ 53.Изопроцессы

ВОПРОСЫ

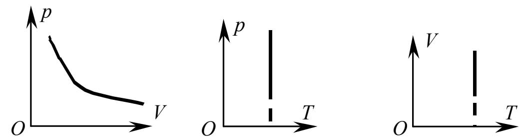
1. Если процесс происходит при постоянстве одного из макропараметров, то он называется изопроцессом.

2. Если процесс происходит с определенной массой газа при постоянной температуре, то он называется изотермическим процессом.

Закон Бойля-Мариотта:

Произведение давления газа p данной массы на его объем V неизменно при постоянной температуре:

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

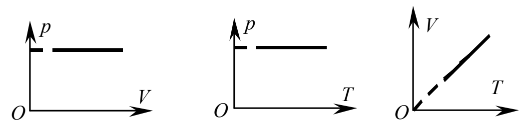


3. Рассмотрим изотермическое расширение газа в сосуде под поршнем. В этом случае часть кинетической энергии молекул передается поршню, значит температура уменьшается. Следовательно, для поддержания постоянной температуры газа ему нужно передавать тепло. Если же газ изотермически сжимают в сосуде с поршнем, то для поддержания постоянной температуры тепло должно отводиться.

4. Изобарным процессом называется процесс изменения состояния газа, обладающего определенной массой, который происходит при постоянном давлении.

Закон Гей-Люссака:

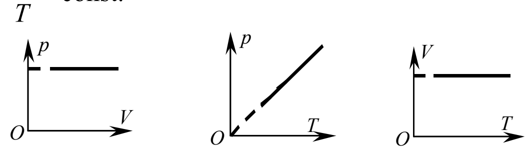
Отношение объема газа V данной массы к его температуре T неизменно при постоянном давлении: $\frac{V}{T} = \text{const}$.



5. Изохорным процессом называется процесс изменения состояния газа, обладающего определенной массой, который происходит при постоянном объеме.

Закон Шарля:

Отношение давления газа p данной массы к его температуре T постоянно: $\frac{p}{T} = \text{const}$.



ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$p = 10^5$ Па	Обозначим p_0 за атмосферное давление. Гидростатическое давление на глубине h равно: $p = \rho g h$.
$V_2 = 2V_1$	По закону Бойля-Мариотта $(p + p_0)V_1 = p_0V_2$, т.е.
$\rho = 1000$ кг/м^3	
h — ?	

$$p_0 = \rho g h \Rightarrow \Rightarrow h = \frac{p_0}{\rho g} = \frac{10^5\ \text{Па}}{1000\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2} \approx 10\ \text{м}.$$

Ответ: $h = 10$ м.

№ 2

Дано:	Решение:
$p_1, p_2,$ V_1, V_2	ΔV — изменение объема, который сначала был равен V_1. Поршень остановится, если давление в обоих частях сосуда станет одинаковым. По закону Бойля-Мариотта можем записать: $p_1V_1 = pV_1'$, $p_2V_2 = pV_2'$, где $V_1 = l_1S$; $V_2 = l_2S$.
Δl — ?	

Объем сосуда не меняется, следовательно, $V_1 + V_2 = V_1' + V_2'$, отсюда получаем: $l_1S + l_2S = l_1'S + l_2'S$; $p_1l_1 + p_2l_2 = pl_1' + pl_2'$, поэтому, $p = \dfrac{p_1l_1 + p_2l_2}{l_1 + l_2}$. Таким образом, мы находим: $p_1l_1 = \dfrac{p_1l_1 + p_2l_2}{l_1 + l_2} l_1' \Rightarrow$

$$\Rightarrow l_1' = \frac{p_1(l_1 + l_2)}{p_1l_1 + p_2l_2} l_1;\quad \Delta l = l_1' - l_1 = \frac{p_1(l_1 + l_2)}{p_1l_1 + p_2l_2} l_1 - l_1 = \frac{(p_1 - p_2)l_1l_2}{p_1l_1 + p_2l_2}.$$

Ответ: $\Delta l = \dfrac{(p_1 - p_2)l_1l_2}{p_1l_1 + p_2l_2}$.

№ 3

Дано:	Решение:
$l = 27{,}5$ см $h = 7{,}5$ см $\Delta h = 2$ см $\rho = 13600$ кг/м^3	$\begin{cases} p_1 = p_2, \text{ т.к. столбик ртути находится посередине трубки;} \\ p_1V_1 = p_1'V_1' \Rightarrow p_1\dfrac{l-h}{2} = p_1'\left(\dfrac{l-h}{2} - \Delta h\right), \text{ т.к. } T = \text{const}; \\ p_1V_1 = p_2'V_2' \Rightarrow p_2\dfrac{l-h}{2} = p_2'\left(\dfrac{l-h}{2} - \Delta h\right), \text{ т.к. } T = \text{const}; \\ P_2' = P_2 + \rho g h. \end{cases}$
$p_1, p_2,\ p_1',$ p_2' — ?	

Подставляя последнее уравнение системы в третье, находим:

$p_2\dfrac{l-h}{2} = (p_2 + \rho g h)\left(\dfrac{l-h}{2} - \Delta h\right)$, откуда находим:

$$p_2 = \rho g h\left(\frac{l-h}{2\Delta h} - 1\right) = 13600\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 0{,}075\ \text{м} \times$$

$\times\left(\dfrac{0{,}275\ \text{м} - 0{,}075\ \text{м}}{2 \cdot 0{,}02\ \text{м}} - 1\right) \approx 4 \cdot 10^4$ Па. Из первого, второго и четвертого уравнений системы получаем:

$$p_1 = p_2 = 4 \cdot 10^4\ \text{Па};$$

$$p_1\frac{l-h}{2}=p_1'\left(\frac{l-h}{2}+\Delta h\right)\Rightarrow p_1'= p_1\frac{l-h}{l-h+2\Delta h}=$$

$$=4\cdot10^4\text{ Па}\cdot\frac{0,275\text{ м}-0,075\text{ м}}{0,275\text{ м}-0,075\text{ м}+2\cdot0,02\text{ м}}\approx3,3\cdot10^4\text{ Па};$$

$$p_2'=p_2+\rho gh=4\cdot10^4\text{ Па}+13600\text{ кг/м}^3\cdot9,8\text{ м/с}^2\cdot0,075\text{ м}\approx5\cdot10^4\text{ Па}.$$

Ответ: $p_1 = p_2 = 4\cdot10^4$ Па; $p_1' = 3,3\cdot10^4$ Па; $p_2' = 5\cdot10^4$ Па.

№ 4

Дано:	Решение:
$\Delta T = 15°C$ $p_0 = 10^5$ Па $S = 10^{-2}$ м^2 $m = 50$ кг $\nu = 1$ моль	Давление на поршень $p=\frac{mg}{S}+p_0$. Тогда по закону Гей- Люссака $\frac{V}{T}=\frac{V+\Delta V}{T+\Delta T}\Rightarrow$
Δh — ?	$\Rightarrow VT+V\Delta T=VT+\Delta VT\Rightarrow\Rightarrow\Delta V=\Delta T\frac{V}{T}$.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона получаем: $pV=\nu RT\Rightarrow\frac{V}{T}=\frac{\nu R}{M}$.

Тогда мы можем найти: $\Delta V=\nu R\Delta T\left(\frac{mg}{S}+p_0\right)^{-1}$. $\Delta V=S\Delta h\Rightarrow$

$$\Rightarrow\Delta h=\frac{\Delta V}{S}=\frac{\nu R\Delta T}{S\left(\frac{mg}{S}+p_0\right)}=\frac{\nu R\Delta T}{mg+p_0}=\frac{1\text{ моль}\cdot8,31\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot15\text{ К}}{50\text{ кг}\cdot9,8\text{ м/с}^2\cdot10^5\text{ Па}\cdot10^{-2}\text{ м}}\approx$$

$\approx 0,084$ м $= 8,4$ см. Ответ: $\Delta h \approx 8,4$ см.

№ 5

Дано:	Решение:
$p_1 = 2\cdot10^4$ Па $T_1 = 7°C$ $T_2 = 42°C$	Согласно закону Шарля мы можем записать: $\frac{p_1}{T_1}=\frac{p_2}{T_2}\Rightarrow p_2=p_1\frac{T_2}{T_1}=2\cdot10^4\text{ Па}\cdot\frac{315\text{К}}{280\text{К}}=2,25\cdot10^4$ Па.
p_2 — ?	Ответ: $p_2 = 2,25\cdot10^4$ Па.

9 Термодинамика

§ 54.Внутренняя энергия

ВОПРОСЫ

1. Внутренней энергией тела называется сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, составляющих тело, и кинетической энергии их хаотического движения.

Внутренняя энергия тела не зависит от его движения и его положения относительно других тел.

2. Так как внутренняя энергия идеального газа определяется в основном кинетической энергией движения молекул (потенциальной энергией их взаимодействия можно пренебречь), которая определяет температуру, то внутренняя энергия идеального газа зависит от температуры. Температура тела уменьшится, если оно извне получит меньше энергии, чем отдаст.

3. Числом степеней свободы тела называется число возможных независимых направлений движения этого тела. (Число независимых координат, необходимых для однозначного определения положения тела в пространстве).

4. Внутренняя энергия идеального газа пропорциональна числу степеней свободы. Молекула водорода двухатомная, значит число степеней свободы равно 5, молекула гелия одноатомна, значит число степеней свободы равно 3. Таким образом, моль водорода имеет большую внутреннюю энергию, чем моль гелия.

5. Внутреннюю энергию жидкости или газа можно изменить путем совершения работы или передачи теплоты.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$T_1 = 10°C$ $T_2 = 23°C$ $M = 2{,}9 \cdot 10^{-2}\ \dfrac{кг}{моль}$ $m = 87$ кг $i = 5$	Изменение внутренней энергии по определению равно: $\Delta U = \dfrac{i}{2}\nu RT.$ Учтем, что:
ΔU — ?	

$\nu = \dfrac{m}{M}$, а $\Delta T = T_2 - T_1$, тогда находим, что изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta U = = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\left(T_2 - T_1\right) = \frac{5}{2}\cdot\frac{87\text{ кг}}{2{,}9\cdot 10^{-2}\text{ кг/моль}}\cdot 8{,}31\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot\left(303\text{ К} - 283\text{ К}\right) \approx$$

$\approx 1{,}25\cdot 10^5$ Дж$=0{,}125$ МДж.

Ответ: $\Delta U = 0{,}125$ МДж.

№ 2

Дано:	Решение:
$V_1 = 10^{-2}$ м^3 $V_2 = 1{,}5\cdot 10^{-2}$ м^3 $p = 10^4$ Па $i = 3$	Внутренняя энергия идеального газа до расширения была равна $U_1 = \dfrac{i}{2}pV_1$, а после расширения стала равна: $U_2 = \dfrac{i}{2}pV_2$. Тогда мы получаем, что изменение внутренней энергии равно:
ΔU — ?	

$\Delta U = U_2 - U_1 = \dfrac{i}{2}pV_2 - \dfrac{i}{2}pV_1 = \dfrac{i}{2}p\left(V_2 - V_1\right) = \dfrac{3}{2}\cdot 10^4$ Па $\cdot(0{,}015$ м^3 – – $0{,}01$ м$^3) = 75$ Дж.

Ответ: $\Delta U = 75$ Дж.

№ 3

Дано:	Решение:
$p_1 = 10^5$ Па $V = 15$ м^3 $\Delta U = -100$ кДж $i = 5$	Внутренняя энергия идеального газа до охлаждения была равна: $U_1 = \dfrac{i}{2}p_1V$, а после охлаждения- стала равна: $U_2 = \dfrac{i}{2}p_2V$.
p_2 — ?	Тогда получим:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2}p_2V - \frac{i}{2}p_1V = \frac{i}{2}V\left(p_2 - p_1\right) \Rightarrow p_2 = p_1 + \frac{2\Delta U}{iV} =$$

$$= 10^5\text{ Па} + \frac{2\cdot(-10^5\text{ Дж})}{5\cdot 0{,}8\text{ м}^3} = 5\cdot 10^4\text{ Па}.$$

Ответ: $p_2 = 5\cdot 10^4$ Па.

№ 4

Дано:	Решение:
p_1, p_2, V_1, V_2	Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона запишем: $p_1V_1 = \nu_1RT$, $p_2V_2 = =\nu_2RT$, $p(V_1 + V_2) = (\nu_1 + \nu_2)RT \Rightarrow$
p — ?	

$p(V_1+V_2)=p_1V_1+p_2V_2 \Rightarrow p=\dfrac{p_1V_1+p_2V_2}{V_1+V_2}$.

Ответ: $p=\dfrac{p_1V_1+p_2V_2}{V_1+V_2}$.

№ 5

Дано:	Решение:
$V_1 = 12$ м^3	Из уравнения Менделеева-Клапейрона
$V_2 = 20$ м^3	$p_1V_1 = \nu_1RT_1$, $p_2V_2 = \nu_2RT_2$, $p(V_1+V_2)=$
$T_1 = 290$ К	$=(\nu_1+\nu_2)RT$.
$T_2 = 300$ К	Отсюда находим
$p_1 = 0{,}98 \cdot 10^5$ Па	$T=p\dfrac{T_1T_2(V_1+V_2)}{p_1V_1T_2+p_2V_2T_1}$.
$p_2 = 1{,}02 \cdot 10^5$ Па	
p, T — ?	Изменение внутренней

энергии равно нулю, поэтому $\dfrac{i}{2}p_1V_1+\dfrac{i}{2}p_2V_2==\dfrac{i}{2}p(V_2-V_1)$, следовательно: $p=\dfrac{p_1V_1+p_2V_2}{V_1+V_2}=\dfrac{0{,}98\cdot10^5\text{ Па}\cdot12\text{ м}^3+1{,}02\cdot10^5\text{ Па}\cdot20\text{ м}^3}{12\text{ м}^3+20\text{ м}^3}=$ $1{,}005 \cdot 10^5$ Па.

$$T=\frac{p_1V_1+p_2V_2}{V_1+V_2}\cdot\frac{T_1T_2(V_1+V_2)}{p_1V_1T_2+p_2V_2T_1}=\frac{T_1T_2(p_1V_1+p_2V_2)}{p_1V_1T_2+p_2V_2T_1}=$$

$$=\frac{290\text{ К}\cdot300\text{ К}\cdot\left(0{,}98\cdot10^5\text{ Па}\cdot12\text{ м}^3+1{,}02\cdot10^5\text{ Па}\cdot20\text{ м}^3\right)}{0{,}98\cdot10^5\text{ Па}\cdot12\text{ м}^3\cdot300\text{ К}+1{,}02\cdot10^5\text{ Па}\cdot20\text{ м}^3\cdot290\text{ К}}\approx296\text{ К}=23°\text{C}.$$

Ответ: $T \approx 23$°С.

§ 55.Работа газа при изопроцессах

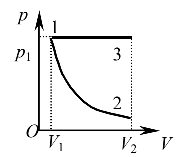
ВОПРОСЫ

1. Хаотическое движение молекул газа в сосуде можно преобразовать в механическое движение с помощью поршня.

2. Работа, совершаемая силой давления газа, зависит от среднего давления газа и изменения его объема.

3. При расширении газ совершает положительную работу, при сжатии — отрицательную.

4. Геометрический смысл работы, совершаемой силой давления газа, состоит в том, что она равна площади фигуры под графиком зависимости $p(V)$.



5. Площадь под изотермой *1 – 2* меньше, чем под изобарой *1 –3*, а, следовательно, работа при изотермическом расширении меньше, чем при изобарном.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m = 0{,}28$ кг $M = 0{,}028$ кг/моль $T_1 = 290$ К $T_2 = 490$ К $i = 5$	При изобарном процессе работа равна по определению: $A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1) =$ $= \frac{0{,}28\text{ кг}}{0{,}028\text{ кг/моль}} \cdot 8{,}31\text{ Дж/К}\cdot\text{моль} \cdot (490\text{ К} -$
A, ΔU — ?	

$- 290\text{ К}) \approx 16600$ Дж $= 16{,}6$ кДж. Изменение внутренней энергии равно: $\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R(T_2 - T_1) = \frac{5}{2}\cdot\frac{0{,}28\text{ кг}}{0{,}028\text{ кг/моль}}\cdot 8{,}31\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot(490\text{ К} -$ $- 290\text{ К}) \approx 41550$ Дж$=41{,}55$ кДж. Ответ: $A \approx 16{,}6$ кДж, $\Delta U \approx 41{,}6$ кДж.

№ 2

Дано:	Решение:
$m = 0{,}05$ кг $T_1 = 320$ К $V_1 = V_2$ $p_2 = \frac{1}{2}p_1$ $p_3 = p_2$, $T_3 = T_1$ $M = 0{,}032\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	Согласно закону Шарля: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow T_2$ $= T_1\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_1}{2}$. Иэ уравнения Менделеева — Клапейрона получаем: $p_2V_2 = \frac{m}{M}RT_2 = \frac{m}{M}R\frac{T_1}{2}$, $p_3V_3 = \frac{m}{M}RT_3 = \frac{m}{M}RT_1$.
A, ΔU — ?	

Работа при изобарном процессе равна по определению:

$A = p_2(V_3 - V_2) = p_3V_3 - p_2V_2 = \frac{m}{M}RT_1 - \frac{m}{M}R\frac{T_1}{2} = \frac{m}{2M}RT_1 =$

$= \dfrac{0{,}05\text{ кг}}{2\cdot 0{,}032\text{ кг/моль}}\cdot 8{,}31\dfrac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot 320\text{ К} \approx 2{,}08\cdot 10^3$ Дж $= 2{,}08$ кДж.

Изменение внутренней энергии при процессе 1 – 2 – 3

$\Delta U = \dfrac{i}{2}\cdot\dfrac{m}{M}\cdot R\left(T_3 - T_1\right) = \dfrac{i}{2}\cdot\dfrac{m}{M}\cdot R\left(T_1 - T_1\right) = 0$. Ответ: $A = 2{,}08$ кДж; $\Delta U = 0$.

№ 3

Работа совершается в процессах *1 – 2*, *3 – 4*, *5 – 6*; не совершается в процессах *2 – 3*, *4 – 5*, потому что эти процессы изохорные. Значит, $A_{12} = 10^4$ Па × (0,2 м^3 – 0,1 м^3) = 10^3 Дж, $A_{23} = 0$, $A_{34} = 3\cdot 10^4$ Па (0,4 м^3 – 0,2 м^3) = $6\cdot 10^3$ Дж, $A_{45} = 0$, $A_{56} = 2\cdot 10^4$ Па (0,5 м^3 – – 0,4 м^3) = $2\cdot 10^3$ Дж. Суммируя все эти работы, получаем: $A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{45} + A_{56} = 10^3$ Дж + 0 + $6\cdot 10^3$ Дж + 0 + $2\cdot 10^3$ Дж = 9 кДж.

№ 4

Процессы *1 – 2* и *3 – 4* изобарные, *2* – 3 — изохорный. Таким образом: $p_2 = p_1$; $p_3 = p_4$. Из уравнения Менделеева — Клапейрона мы получаем: $p_2V_2 = \dfrac{m}{M}RT_2$, $p_4V_4 = \dfrac{m}{M}RT_4$.

Таким образом:

$2p_1V_1 = 3p_4V_1 \Rightarrow p_4 = \dfrac{2}{3}p_1$. Работа совершается на участках *1 –2* и *3 – 4*; но не совершается на участке *2 – 3*, потому что этот процесс изохорный. Значит, $A_{12} = p_1\ (2V_1 - V_1) = p_1V_1$, $A_{23} = 0$, $A_{34} = \dfrac{2}{3}p_1\left(3V_1 - 2V_1\right) = \dfrac{2}{3}p_1V_1$. Суммируя все работы получаем:

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} = p_1V_1 + 0 + \frac{2}{3}p_1V_1 = \frac{5}{3}p_1V_1 = \frac{5}{3}\cdot 10^5\text{ Па}\cdot 3\text{ м}^3 = 5\cdot 10^5\text{ Дж}.$$

Графически работу можно найти, как площадь под кривой *1 – 2 – 3 – 4* на *pV* — диаграмме. Значит $A = p_1\left(2V_1 - V_1\right) + \dfrac{2}{3}p_1\left(3V_1 - 2V_1\right) =$

$= \dfrac{5}{3}p_1V_1 = \dfrac{5}{3}\cdot 10^5\text{ Па}\cdot 3\text{ м}^3 = 5\cdot 10^5$ Дж.

№ 5

Дано:	Решение:
$T = 300$ К $\nu = 2$ моль $V_2 = \frac{1}{2}V_1$	Для изотермического процесса работа по определению равна: $A = \nu RT\ln\dfrac{V_1}{V_2} = \nu RT\ln\dfrac{1}{2} =$
A — ?	$= 2\text{ моль}\cdot 8{,}31\dfrac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot 300\text{ К}\cdot\ln\dfrac{1}{2} \approx -3{,}456$ кДж.

Но для изотермического процесса справедлив закон Бойля — Мариотта, поэтому $pV = \text{const} \Rightarrow p = \text{const}\, t/V$.

Ответ: $A = -3{,}456$ кДж.

§ 56.Первый закон термодинамики

ВОПРОСЫ

1. Согласно первому закону термодинамики, изменение внутренней энергии ΔU системы определяется как сумма работы внешних сил, действующих на систему, $A_{вн}$ и количества теплоты Q, сообщенного ей извне: $\Delta U = A_{вн} + Q$.

2. Оно идет на изменение ее внутренней энергии и совершение системой работы.

3. При изохорном процессе полученное или отданное системой количество теплоты Q идет на изменение внутренней энергии системы ΔU: $\Delta U = Q$. (Так как работа газа равна 0).

4. При изотермическом процессе полученное или отданное системой количество теплоты Q идет на совершение системой работы A: $Q = A$. (Так как внутренняя энергия остается постоянной).

5. При изобарном процессе полученное или отданное системой количество теплоты Q идет на изменение внутренней энергии системы ΔU и на совершение системой работы A при постоянном давлении: $Q = \Delta U + A$.

Потому что при изотермическом расширении получаемое системой количество теплоты идет только на совершении работы, а при изохорном — на изменение внутренней энергии и на совершение работы.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$U_0 = 220$ кДж	Из первого закона термодинамики
$A = -50$ кДж	$\Delta U = A_{вн} + Q$, где $A_{вн} = -A$.
$Q = 125$ кДж	Поскольку $U = U_0 + \Delta U$, то:
U — ?	$U = U_0 + Q - A = 220$ кДж $+ 125$ кДж $- (-50$ кДж$) =$
	$= 295$ кДж.
	Ответ: $U = 295$ кДж.

№ 2

Дано:	Решение:
$i = 5$ $m = 0{,}032$ кг $p_1 = 10^5$ Па $p_2 = 2p_1$ $T_1 = 290$ К $M = 0{,}032$ кг/моль	Из уравнения Менделеева — Клапейрона получаем:
V, T_2, Q — ?	

$$p_1V = \frac{m}{M}RT_1 \Rightarrow V = \frac{mRT_1}{Mp_1} = \frac{0{,}032\cdot\text{кг}\,8{,}31\dfrac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot 290\text{К}}{32\,\text{кг/моль}\,10^5\ \text{Па}} \approx$$

$\approx 0{,}024$ м^3. $p_2V = \frac{m}{M}RT_2 \Rightarrow$

$$\Rightarrow T_2 = \frac{p_2VM}{mR} = \frac{p_2M}{mR}\cdot\frac{mRT_1}{Mp_1} =$$

$$= T_1\frac{p_2}{p_1} = 2T_1 = 2\cdot 290\ \text{К} = 580\ \text{К}.$$

Т. к. процесс изохорный, то $Q = \Delta U = \frac{i}{2}\cdot\frac{m}{M}R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2}\cdot\frac{m}{M}RT_1 =$

$$= \frac{5}{2}\cdot\frac{32\ \text{г}}{32\ \text{г/моль}}\cdot 8{,}31\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot 290\ \text{К} \approx 6\cdot 10^3\ \text{Дж} = 6\ \text{кДж}.$$

Ответ: $V \approx 0{,}024$ м^3; $T_2 = 580$ К; $Q = 6$ кДж.

№ 3

Дано:	Решение:
$A = 2$ кДж $i = 3$	Работа при изобарном расширении будет равна: $A = pV$. Изменение внутренней энергии рассчитаем по формуле:
Q, ΔU — ?	

$$\Delta U = \frac{i}{2}pV = \frac{i}{2}A = \frac{3}{2}\cdot 2\ \text{кДж} = 3\ \text{кДж}.$$

Из второго начала термодинамики получим:

$$Q=\Delta U+A == \frac{i}{2}A + A = A\left(1+\frac{i}{2}\right) = 2\ \text{кДж}\cdot\left(1+\frac{3}{2}\right) = 5\ \text{кДж}.$$

Ответ: $\Delta U = 3$кДж; $Q = 5$ кДж.

№ 4

Дано:	Решение:
$m = 0{,}014$ кг $T = 300$ К $M = 0{,}028$ кг/моль $i = 5$ $V_2 = 2V_1$	Работа при изобарном расширении будет равна: $A = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1)$.
Q — ?	

По закону Гей — Люссака получаем: $\frac{V_2}{T_2}=\frac{V_1}{T_1} \Rightarrow T_2 = 2T_1$.

Таким образом,

$A=\frac{m}{M}R(2T_1-T_1)=\frac{m}{M}RT_1$. Изменение внутренней энергии

$$\Delta U=\frac{i}{2}\frac{m}{M}R(T_2-T_1)=\frac{i}{2}\frac{m}{M}R(2T_1-T_1)=\frac{i}{2}\frac{m}{M}RT_1.$$

Из второго закона термодинамики

$$Q = \Delta U + A = =\frac{i}{2}\frac{m}{M}RT_1+\frac{m}{M}RT_1=\frac{m}{M}RT_1\left(\frac{i}{2}+1\right)=$$

$$\frac{0{,}014\,\text{кг}}{0{,}028\,\text{кг/моль}}\cdot 8{,}31\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}\cdot 300\,\text{К}\cdot\left(\frac{5}{2}+1\right)\approx 4{,}36\cdot 10^3\ \text{Дж} = 4{,}36\ \text{кДж}.$$

Ответ: $Q = 4{,}36$ кДж.

№ 5

В задаче №3 из § 55, получается, что работа газа $A = 9 \cdot 10^3$ Дж.

Изменение внутренней энергии $\Delta U=\frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_6-T_1)=\frac{3}{2}(p_6V_6-p_1V_1)=$

$$=\frac{3}{2}\left(2\cdot 10^4\ \text{Па}\cdot 0{,}5\,\text{м}^3-10^4\ \text{Па}\cdot 0{,}1\,\text{м}^3\right) = 1{,}35 \cdot 10^4\ \text{Дж}.$$

Количество теплоты, переданное гелию:

$Q = \Delta U + A = 1{,}35 \cdot 10^4$ Дж $+ 9 \cdot 10^3$ Дж $= = 2{,}25 \cdot 10^4$ Дж.

§ 57.Адиабатный процесс

ВОПРОСЫ

1. Адиабатным процессом называется процесс изменения состояния термодинамической системы, обладающего определенной массой, без теплообмена с внешней средой.

При адиабатном процессе работа A совершается системой за счет изменения ее внутренней энергии ΔU: $A = -\Delta U$.

2. При адиабатном расширении работа совершается системой за счет изменения ее внутренней энергии.

3. При адиабатном сжатии увеличивается число упругих соударений молекул с поршнем, поэтому их кинетическая энергия, а, следовательно, и температура, возрастает.

При адиабатном расширении уменьшается число упругих соударений молекул с поршнем, поэтому их кинетическая энергия, а, следовательно, и температура, тоже уменьшается.

4. При адиабатическом сжатии температура увеличивается, объем уменьшается, значит давление растет быстрее, чем при изотермическом сжатии. Поэтому при резком сжатии газа в цилиндре с поршнем объем уменьшается в 2 раза, а давление при этом возрастает более, чем в 2 раза.

5. При адиабатическом сжатии в цилиндре дизельного двигателя температура увеличивается настолько, что топливо, впрыскиваемое в цилиндр, воспламеняется и приводит поршень цилиндра в движение.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$A = 500$ Дж	При адиабатном процессе ($Q = 0$) первый закон термодинамики выглядит так: $\Delta U + A = 0$. Следовательно, мы получаем: $\Delta U = -A = -500$ Дж.
ΔU — ?	Ответ: $\Delta U = -500$ Дж.

№ 2

Дано:	Решение:
$\nu = 8$ моль $A = -10^{-3}$ Дж $i = 3$	При адиабатном процессе по определению: $A = -\Delta U = -\frac{i}{2}\nu R\Delta T \Rightarrow$
ΔT — ?	

$$\Rightarrow \Delta T = -\frac{2A}{i\nu R} = -\frac{2\cdot\left(-10^3\text{ Дж}\right)}{3\cdot 8\text{ моль}\cdot 8{,}31\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}} \approx 10\text{ К}.$$ Ответ: $\Delta T \approx 10$ К.

№ 3

Дано:	Решение:
$m = 0{,}064$ кг $M = 3{,}2\cdot 10^{-2}$ кг/моль $T_1 = 2T_2 = 273$ К $i = 5$	По формуле мы получим: $\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R(T_2 - T_1) = -\frac{i}{4}\frac{m}{M}RT_1 =$
$\Delta U, A$ — ?	$= -\frac{5}{4}\cdot\frac{6{,}4\cdot 10^{-2}\text{ кг}}{3{,}2\cdot 10^{-2}\text{ кг/моль}}\cdot 8{,}31\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}\cdot 273\text{ К} \approx$

≈ -5670 Дж $= -5{,}67$ кДж; $A = -\Delta U \approx 5{,}67$ кДж.
Ответ: $\Delta U \approx -5{,}67$ кДж, $A \approx 5{,}67$ кДж.

№ 4

Дано:
$m = 1{,}4$ кг
$\Delta t = -20°C$
$M = 2{,}8 \cdot 10^{-2}$ кг/моль
$i = 5$

A — ?

Решение:
При адиабатном процессе мы получаем:

$$A = -\Delta U = -\frac{i}{2}\frac{m}{M}R\Delta T =$$

$$= -\frac{5}{2}\cdot\frac{1{,}4\text{ кг}}{2{,}8\cdot10^{-2}\text{ кг/моль}}\times$$

$$\times\, 8{,}31\,\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}\cdot(-20\text{ К}) \approx 20800\text{ Дж} = 20{,}8\text{ кДж}.$$

Ответ: $A \approx 20{,}8$ кДж.

№ 5

Дано:
$V_1 = 2$ м^3
$A = -50{,}5$ кДж
$T_1 = 273$ К
$p_1 = 1{,}01 \cdot 10^5$ Па
$i = 5$

T_2 — ?

Решение:

При адиабатном процессе: $A = -\Delta U = -\frac{i}{2}\nu R\Delta T =$

$= -\frac{i}{2}\nu R(T_2 - T_1) = -\frac{i}{2}(\nu RT_2 - \nu RT_1)$.

В силу уравнения Менделеева-Клапейрона, запишем:
$\nu RT_1 = p_1V_1 \Rightarrow$

$\Rightarrow \nu R = \frac{p_1V_1}{T_1}$. Отсюда: $A = -\frac{i}{2}\,p_1V_1\left(\frac{T_2}{T_1}+1\right) \Rightarrow$

$$\Rightarrow T_2 = \left(1-\frac{2A}{ip_1V_1}\right)T_1 = \left(1-\frac{2\cdot\left(-5{,}05\cdot10^4\text{ Дж}\right)}{5\cdot1{,}01\cdot10^5\text{ Па}\cdot2\text{ м}^3}\right)\cdot273\text{ К} = 300{,}3\text{ К}.$$

Ответ: $T_2 = 300{,}3$ К.

§ 58. Тепловые двигатели

ВОПРОСЫ

1. К тепловым двигателям относят устройства по преобразованию внутренней энергии топлива в механическую. В качестве рабочего тела в тепловых двигателях используют газы и пары, так как они наилучшим образом сжимаются и расширяются.

2. Потому что давление газа при сжатии должно быть меньше давления газа при расширении, а давление растет вместе с температурой. Отсюда заключаем, что перед сжатием газ должен быть охлажден, т.е. приведен в контакт с холодильником, а перед расширением нагрет, т.е. приведен в контакт с нагревателем.

3. КПД замкнутого цикла η определяют как отношение работы A, совершенной двигателем за цикл, к количеству теплоты Q_1, полученного системой за цикл: $\eta = \frac{A}{Q_1}$.

4. Наиболее эффективным является термодинамический цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, так называемый цикл Карно. КПД цикла Карно η определяется формулой:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника.

5. Тепловые двигатели выделяют продукты сгорания топлива, загрязняющие окружающую среду. Для борьбы с этим ставят специальные очистители выхлопных газов, переходят на более экологически чистые виды топлива (таким идеальным топливом является водород, так как при сгорании дает воду), переходят на электромобили и т.д.

ЗАДАЧИ

№ 1

1 – 2 — процесс изохорный (V = const), газ работы не совершает, т.е. $A_{12} = 0$. *2 – 3* — процесс изобарный (p = const), значит, газ совершает работу, равную площади прямоугольника 2356, т.е. $A_{23} = 2p_1 \cdot (2V_1 - V_1) = 2p_1V_1$. 3 – 4 — процесс изохорный (V = const), следовательно, газ работы не совершает, т.е. $A_{34} = 0$.

4 – 1 — процесс изобарный (p = const), поэтому газ совершает работу, равную площади прямоугольника 1456, взятую со знаком «–», т.е. $A_{41} = -p_1 \cdot (2V_1 - V_1) = -p_1V_1$. К газу подводится количество теплоты на участках *1 – 2* и *2 – 3*, отводится на участках *3 – 4* и *4 – 1*. Количество теплоты, полученное в цикле от нагревателя, равно: $Q_1 = Q_{12} + Q_{23}$; $Q_{12} = = \Delta U_{12} = \frac{i}{2}\nu R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2}(\nu RT_2 - \nu RT_1)$;

$Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23} = \dfrac{i}{2}\nu R(T_3 - T_2) = = \dfrac{i}{2}(\nu RT_3 - \nu RT_2)$. Воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона и запишем:

$\nu RT_1 = p_1V_1$, $\nu RT_2 = 2p_1V_1$;

$\nu RT_3 = 2p_1 \cdot 2V_1 = 4\,p_1V_1$.

Отсюда получим:

$Q_{12} = \dfrac{i}{2}(2p_1V_1 - p_1V_1) = \dfrac{i}{2}p_1V_1$;

$Q_{23} = \dfrac{i}{2}(4p_1V_1 - 2p_1V_1) + 2p_1V_1 = = p_1V_1(i + 2)$;

$Q_1 = \dfrac{i}{2}p_1V_1 + p_1V_1(i + 2) = p_1V_1\left(\dfrac{3i}{2} + 2\right)$.

КПД цикла найдем по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

где $A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = p_1V_1$ — работа, совершаемая в цикле 1234.

Отсюда:

$$\eta = \frac{p_1V_1}{p_1V_1(3i/2 + 2)} = \frac{2}{3i + 4} = \frac{2}{3 \cdot 5 + 4} = \frac{2}{19}.$$

№ 2

Дано:	Решение:
$Q_1 = 100$ Дж	Работа, которую совершает газ за цикл, равна:
$Q_2 = 75$ Дж	$A = Q_1 - Q_2 = = 100$ Дж $- 75$ Дж $= 25$ Дж.
η, A — ?	КПД цикла найдем по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{100\text{ Дж} - 75\text{ Дж}}{100\text{ Дж}} = 0{,}25 \text{ или } 25\ \%.$$

Ответ: $A = 25$ Дж, $\eta = 0{,}25$.

№ 3

Дано:	Решение:
$t_1 = 673$К	Максимальное теоретическое значение к.п.д. паровой
$t_2 = 373$К	машины можно определить по формуле:
η_{max} — ?	$\eta = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1} = \dfrac{673\text{ К} - 373\text{ К}}{673\text{ К}} \approx 0{,}446$ или $44{,}6\ \%$.
	Ответ: $\eta_{max} \approx 0{,}446$.

№ 4

Дано:	Решение:
$t_1 = 120°C$ $t_2 = 320°C$ $Q_1 = 200$ кДж	К.п.д. цикла можно найти по формуле: $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{393\text{ К}}{593\text{ К}} \approx 0{,}337$ или 33,7 %.
η, A, Q_2 — ?	

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \Rightarrow A = \eta Q_1 = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) Q_1 = \left(1 - \frac{393\text{К}}{593\text{К}}\right) \cdot 2 \cdot 10^5 \text{ Дж} \approx 6{,}75 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 67{,}5 \text{ кДж}.$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \Rightarrow Q_2 = (1 - \eta) Q_1 = \frac{T_1}{T_2} Q_1 = \frac{393\text{К}}{593\text{К}} \cdot 2 \cdot 10^5 \text{ Дж} \approx 1{,}325 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 132{,}5 \text{ кДж}.$$

Ответ: $\eta \approx 0{,}337$, $A = 67{,}5$ Дж, $Q_2 = 132{,}5$ кДж.

№ 5

Дано:	Решение:
$t = 1$ ч $m = 5$ кг $T_1 = 1200$ К $t_2 = 370$ К $Q_1 = 46$ МДж/кг	Мощность равна: $P = \frac{A}{t}$; кпд: $\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$; $A = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) Q_1$; $Q_1 = qm$;
P — ?	$A = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) qm$; $P = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{qm}{t} =$

$$= \frac{4{,}6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} \cdot 5 \text{ кг}}{3600 \text{ с}} \cdot \left(1 - \frac{370\text{ К}}{1200\text{ К}}\right) \approx 4{,}42 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 44{,}2 \text{ кВт}.$$

Ответ: $P \approx 44{,}2$ кВт.

§ 59.Второй закон термодинамики

ВОПРОСЫ

1. Необратимым процессом называется такой процесс, который не может самопроизвольно происходить в обратном направлении.

2. Второй закон термодинамики:

В тепловом двигателе, работающем по замкнутому циклу, невозможно полное преобразование теплоты, полученной от нагревателя, в механическую работу.

3. Второй закон термодинамики определяет направление термодинамических процессов. Например, тепло не может передаться от холодного тела к горячему.

4. Термодинамическая система, предоставленная самой себе, переходит из менее вероятного (более упорядоченного) в наиболее вероятное (менее упорядоченное) состояние.

5. Происходит диффузия, в результате чего частички дыма проникают между молекулами воздуха.

10 Жидкость и пар

§ 60.Фазовый переход пар – жидкость

ВОПРОСЫ

1. Переход вещества из газообразного в жидкое состояние возможен при температуре, меньшей критической. Критической температурой называется наибольшая температура, при которой переход газа в жидкость еще возможен.

2. Паром называется вещество в газообразном состоянии, температура которого меньше критической.

3. При изотермическом сжатии газа возрастает концентрация молекул, и, когда расстояние между ними становится настолько малым, что потенциальная энергия взаимодействия молекул становится соизмерима с кинетической энергией их движения, газ превращается в жидкость.

4. Пар считается насыщенным, если он находится в состоянии термодинамического равновесия со своей жидкостью.

Давление насыщенного пара при его сжатии остается постоянным, так как часть молекул переходит в жидкость.

5. При сжатии жидкости давление резко возрастает, так как молекулы жидкости плотно упакованы, и силы межмолекулярного отталкивания играют существенную роль.

§ 61.Испарение. Конденсация

ВОПРОСЫ

1. При испарением поверхность жидкости покидают наиболее быстрые молекулы. Конденсацией называется процесс возвращения в жидкость части молекул пара над поверхностью жидкости. Испарение происходит при условии, что кинетическая энергия находящейся в поверхностном слое молекулы жидкости больше ее потенциальной энергии взаимодействия с другими молекулами.

2. Скорость испарения жидкости зависит от рода жидкости и ее температуры.

3. Удельной теплотой парообразования называется количество теплоты, которое необходимо для превращения в пар 1 кг вещества в жидком состоянии при неизменной температуре.

Количество теплоты, которое подводится при парообразовании, идет на увеличение кинетической энергии молекул.

4. При ветре молекулы воды, которые испарились с поверхности тела человека, не возвращаются обратно и поэтому не увеличивают его энергию и, соответственно, температуру, поэтому жара переносится легче.

5. Внутренняя энергия 1 кг пара больше внутренней энергии 1 кг воды, потому что энергия, затраченная на испарение 1 кг пара, превратилась в его внутреннюю (тепловую энергию).

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
$r_c = 2{,}34 \cdot 10^6$ Дж/кг
$m = 0{,}5$ кг
Q — ?

Решение:
При конденсации серебра будет выделяться следующее количество теплоты:
$Q = r_c \cdot m = 2{,}34 \cdot 10^6$ Дж/кг $\cdot$ 0,5 кг =
$= 1{,}17 \cdot 10^6$ Дж = 1,17 МДж.
Ответ: Q = 1,17 МДж.

№ 2

Дано:
$P = 75$ Вт
$t = 1$ ч
$r_в = 2{,}256 \cdot 10^6$ Дж/кг
m — ?

Решение:
Мощность рассчитывается по формуле: $P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t}$, в силу того, что $A = Q$. A — работа по испарению воды с поверхности тела человека, Q — выделяемое телом количество теплоты: $Q = r_в \cdot m \Rightarrow$

$m = \frac{Q}{r_в} = \frac{P \cdot t}{r_в} = \frac{75\text{ Вт} \cdot 3600\text{ с}}{2{,}256 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}} \approx 0{,}12$ кг. Ответ: $m \approx 0{,}12$ кг.

№ 3

Дано:
$\Delta t_1 = 3$ мин
$\Delta t_2 = 16$ мин 3 с
$T_1 = 0°C$
$T_2 = 100°C$
$C_в = 4200$ Дж/кг $\cdot$ °C
$r_в$ — ?

Решение:
На нагревание воды от 0°C до 100°C затрачено количество теплоты: $Q_1 = cm(T_2 - T_1)$, где c — удельная теплоемкость воды $\left(c_в = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{C}}\right)$.

На испарения потрачено количество теплоты

$Q_2 = r_в - m_0$. $\dfrac{Q_2}{Q_1} = \dfrac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$, следовательно:

$$r_в = c_в(T_2 - T_1)\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \cdot\ = 4200\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}\cdot 100^\circ\text{C}\ \cdot\frac{963\ \text{с}}{180\ \text{с}} =$$

$=2{,}247 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Ответ: $r_в = 2{,}247 \cdot 10^6$ Дж/кг.

№ 4

Дано:	Решение:
$m = 1$кг $t_1 = 0°$C $t_2 = 100°$C $C_в = 4200$ Дж/кг · °C $r_в = 2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг Q — ?	Для нагрева воды до $t_2 = 100°$C необходимо количество теплоты: $Q_1 = c_в m(t_2 - t_1)$. Для превращения всей воды, нагретой до кипения, в пар необходимо следующее количество теплоты: $Q_2 = r_в \cdot m$; $Q = Q_1 + Q_2$, следовательно мы получим: $Q = m(c_в\,(t_2 - t_1) + r_в) =$

$$= 1\,\text{кг}\cdot\left(4200\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}\cdot 100^\circ\text{C} + 2{,}26\cdot 10^6\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right) = 2{,}68 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 2{,}68 \text{ МДж}.$$

Ответ: $Q = 2{,}68$ МДж.

§ 62.Насыщенный пар. Влажность воздуха

ВОПРОСЫ

1. Из ненасыщенного пара можно получить насыщенный с помощью увеличения давления.

2. Процессы испарения и конденсации при этом выравниваются: сколько молекул испаряется с поверхности жидкости, столько в нее и возвращается, поэтому давление насыщенного пара при определенной температуре достигает постоянного максимального значения

3. Давление насыщенного пара при увеличении температуры растет быстрее, чем давление идеального газа, поскольку молекулы пара взаимодействуют друг с другом, а в модели идеального газа мы пренебрегаем взаимодействием молекул между собой.

4. Относительной влажностью воздуха называется величина, равная отношению концентрации водяного пара в воздухе к концентрации насыщенного пара при этой же температуре, которая выражается в процентах.

5. В сухом воздухе испарение происходит быстро. При повышенной влажности воздуха испарение влаги с поверхности тела человека уменьшается и оно охлаждается незначительно.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$t = 30°C$	$\varphi = \dfrac{p_н}{p_{н\,п}} \cdot 100\% = 60\%.$
$P_н = 2{,}52$ кПа	
$P_{нп} = 4{,}2$ кПа	Ответ: $\varphi = 60\%$.
φ — ?	

№ 2

Дано:	Решение:
$t_1 = 30°C$	$\varphi_1 = \dfrac{p_{н1}}{p_{н\,п\,1}} \cdot 100\%, \Rightarrow P_{н1} = \dfrac{p_{н\,1}}{100\%} \cdot \varphi_1.$
$t_2 = 100°C$	
$\varphi_1 = = 60\%$	$\dfrac{p_{н1}}{T_1} = \dfrac{p_{н2}}{T_2}, \Rightarrow P_{н1} = \dfrac{p_{н2}T_1}{T_2}$
$P_{нп1} = 4{,}2$ кПа	
φ_2 — ?	

$\varphi_2 = \dfrac{p_{н2}}{p_{н\,п\,2}} \cdot 100\%, = \varphi_1 \dfrac{p_{н\,п\,1}T_2}{T_1} \cdot 100\%, = 2{,}5\%$. Ответ: $\varphi_2 = 2{,}5\%$.

№ 3

Дано:	Решение:
$t_1 = 20°C$	$\varphi_1 = \dfrac{p_1}{p_{н\,п\,1}} \cdot 100\%, \Rightarrow P_1 = \varphi_1 \cdot P_{нп1}.$
$t_2 = 0°C$	
$\varphi_1 = 30\%$	Из уравнения Клайперона –Менделеева:
$P_{нп1} = 6 * 10^2$ кПа	$\dfrac{p_1}{T_1} = \dfrac{p_2}{T_2}, \Rightarrow P_1 = \dfrac{p_1T_2}{T_1}.$
$P_{нп1} = 2,\ 5 *10^2$ кПа	
φ_2 — ?	

$\varphi_2 = \dfrac{p_{н2}}{p_{н\,п\,2}} \cdot 100\% = \varphi_1 \dfrac{p_{н\,п\,1}T_2}{T_1 p_{н\,п\,2}} = \dfrac{0{,}3 \cdot 6 \cdot 10^5\,\text{Па} \cdot 273\text{К}}{293\text{К} \cdot 2{,}5 \cdot 10^5\,\text{Па}} \cdot 100\% = 67\%.$

Ответ: $\varphi_2 = 67\%$.

№ 4

Дано:	Решение:
$t_1 = 20°C$; $t_2 = 0°C$	Роса выпадет, если влажность воздуха будет
$\varphi_1 = 30\%$	больше 1. $\varphi_2 = \varphi_1 \dfrac{p_{н\,п\,1}T_2}{p_{н\,п\,2}T_1} =$
$P_{нп1} = 6 * 10^2$ кПа	
$P_{нп1} = 2,\ 5 *10^2$ кПа	
φ_2 — ?	

$= \frac{0,5 \cdot 2,5 \cdot 10^2 \text{ Па} \cdot 280\text{К}}{10^2 \text{ Па} \cdot 293\text{К}} = 1,1 \Rightarrow$ роса выпадет.

Ответ: роса выпадет.

№ 5

Дано:	Решение:
$P_{нп} = 1,01 \cdot 10^5$ Па	По формуле:
t=100°С; V_1=10^{-2}м^3	A=P $(V_1$–$V_2)$=$1,01 \cdot 10^5$Па$(10^{-2}$м^3–$5 \cdot 10^{-3}$ м$^3)$=505 Дж.
$V_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м^3	Ответ: A = 505 Дж.
A — ?	

§ 63.Кипение жидкости

ВОПРОСЫ

1. Кипением называется процесс парообразования, происходящий при определенной температуре по всему объему жидкости.

2. Пузырьки в жидкости начнут увеличиваться в объеме при увеличении давления пара внутри пузырька по отношению ко внешнему давлению жидкости. Пузырьки увеличиваются при всплытии, потому что внешнее давление на них со стороны жидкости с уменьшением глубины также уменьшается.

3. При определенной температуре, называемой температурой кипения.

4. Жидкость кипит при такой температуре, при которой давление насыщенного пара жидкости начинает превышать внешнее давление на жидкость. Чем больше теплоты подводится к жидкости, тем больше лопается всплывающих на поверхность пузырьков. Чем выше давление над жидкостью, тем выше температура кипения.

5. Перегретой жидкостью называется жидкость, температура которой выше температуры ее кипения в нормальных условиях.

§ 64.Поверхностное натяжение

ВОПРОСЫ

1. При увеличении площади поверхности жидкости число молекул на единицу поверхности не меняется, потому что они приходят из внутренних слоев.

2. Молекулы с поверхности притягиваются молекулами внутренних слоев. На поверхности остается лишь то число молекул, при котором при данном объеме площадь поверхности будет наименьшей.

3. Давление внутри мыльного пузыря несколько больше атмосферного, потому что давление воздуха в пузыре компенсирует атмосферное давление и давление, создаваемое силой поверхностного натяжения.

4. Потому что, в среднем, сколько молекул опускается, столько же и поднимается на поверхность. (Молекулы жидкости не движутся именно в среднем, отдельно взятая молекула может и опуститься вниз, и даже покинуть жидкость).

5. Из-за поверхностного натяжения жидкость стремится уменьшить площадь своей свободной поверхности. Она меньше, когда все волоски слипаются, чем когда вода обволакивает каждый волосок кисточки. Поэтому волоски акварельной кисточки слипаются при вынимании ее из воды.

ЗАДАЧИ

№ 1

Объем капли складывается из объемов маленьких капель:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = n\frac{4}{3}\pi r^3 \Rightarrow R^3 = nr^3;\ R = r\sqrt[3]{n}\ .$$

Энергия поверхностного слоя большой капли: $E=\sigma S=\sigma 4\pi R^2$,
суммарная энергия поверхностного слоя мелких капель:
$E_n = n\sigma S_1 = n\sigma 4\pi r^2$.

$$\frac{E}{E_n} = \frac{R^2}{nr^2} = \frac{r^2 n^{2/3}}{nr^2} = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}\ ,$$

так как $n>1$, то $E<E_n$, $\Rightarrow$ энергия при слиянии капель выделяется.

№ 2

Дано:	Решение:
$d = 0{,}1$ м	$A = E_{пов} = \sigma S = \sigma\, 4\pi D^2/4 = 4\cdot 10^{-2}$ Н/м$\cdot 3{,}14\cdot 10^{-2}$ м^2 =
$\sigma = 4\cdot 10^{-2}$ Н/м	$= 1{,}2\cdot 10^{-3}$Дж.
A — ?	Ответ: А = 1,2 мДж.

№ 3

Дано:	Решение:
$d = 5\cdot 10^{-5}$ м	$A = n\sigma S_1$, где n – число капель, S_1 – площадь по-
$\sigma = 7{,}28\cdot 10^{-2}$ Н/м	верхности одной капли.
$m = 0{,}5$ кг	
$\rho = 1000$ кг/м^3.	$n = \dfrac{m}{m_0}$, где $я_0 = \dfrac{4d^3}{3\cdot 8}\pi\rho$– масса одной капли.
A — ?	

$$A = \frac{6m}{\pi d^3 \rho}\sigma\pi d^2 = \frac{6m\sigma}{d\rho} = \frac{6 \cdot 0{,}5У\text{кг} \cdot 7{,}28 \cdot 10^{-2}\ \text{Н/м}}{5 \cdot 10^{-5}\text{м} \cdot 1000\text{кг/м}^3} = 4{,}35\ \text{Дж}.$$

Ответ: A = 4,35 Дж.

№ 4

Дано:	Решение:
$R = 5{\cdot}10^{-2}$ м	$F_1 = \sigma l = \sigma{\cdot}2\pi R$. $F = F_1 + mg = 2\pi R\sigma + mg =$
$\sigma = 7{,}28{\cdot}10^{-2}$ Н/м	$=2{\cdot}3{,}14{\cdot}5{\cdot}10^{-2}\text{м}{\cdot}7{,}28{\cdot}10^{-2}\text{Н/м} + 4{\cdot}10^{-3}\text{кг}{\cdot}9{,}8\text{м/с}^2 = 2{,}7\cdot10^{-2}$ Н
$m = 4{\cdot}10^{-3}$ кг	Ответ: $F = 2{,}7\cdot10^{-2}$ Н.
F — ?	

№ 5

Дано:	Решение:
$l = 20{\cdot}10^{-3}$ м	$F_1 = \rho g V = mg; \Rightarrow V_1 = \dfrac{m}{\rho}; \ell^2 h_1 = \dfrac{m}{\rho}; \Rightarrow h_1 = \dfrac{m}{\rho\ell^2} =$
$\sigma = 7{,}28{\cdot}10^{-2}$ Н/м	$= \dfrac{3\cdot10^{-3}кг}{1000кг/м^3\cdot4\cdot10^{-4}м^2} = 7{,}5\cdot10^{-3}м.$
$m = 3{\cdot}10^{-3}$ кг	$F_1 = \sigma l = \sigma{\cdot}2\pi R$.
$\rho = 1000$ кг/м^3	
h_1, h_2 — ?	

$F = F_1 + mg = 2\pi R\sigma + mg = 2{\cdot}3{,}14{\cdot}5{\cdot}10^{-2}\text{м}{\cdot}7{,}28{\cdot}10^{-2}\text{Н/м} +$
$+4{\cdot}10^{-3}\text{кг}{\cdot}9{,}8\text{м/с}^2 = 2{,}7\cdot10^{-2}$ Н. Ответ: $F = 2{,}7\cdot10^{-2}$ Н.

§ 65.Смачивание. Капиллярность

ВОПРОСЫ

1. Явление смачивания состоит в том, что поверхность жидкости у поверхности твердого тела искривляется из-за взаимодействия молекул жидкости и твердого тела. Жидкость смачивает поверхность твердого тела, если сила притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше силы притяжения между молекулами жидкости. Жидкость не смачивает поверхность твердого тела, если сила притяжения между молекулами жидкости и твердого тела меньше силы притяжения между молекулами жидкости.

2. Явление поднимания или опускания жидкости в тонких ттрубках (капиллярах) называется капиллярностью. Смачивающая жидкость образует в капилляре вогнутый мениск (потому что сила притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше силы притяжения между молекулами жидкости). Несмачивающая жидкость образует в капилляре выпуклый мениск (потому что сила притяжения между молекулами жидкости и твердого тела меньше силы притяжения между молекулами жидкости).

3. Высота подъема жидкости в капилляре обратно пропорциональна диаметру капилляра.

4. Вода не смачивает жировой слой на перьях водоплавающих птиц, и после выхода на сушу птица остается сухой.

5. Вспахивание и боронование земли способствует сохранению влаги в ней, потому что разрушает капиллярные трубки, чем уменьшает испарение с поверхности почвы.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
$h = 1$ м
$\sigma = 72{,}8 \cdot 10^{-2}$ мН/м
$g = 10$ Н/кг
$\rho = 1000$ кг/м^3

d — ?

Решение:
По определению

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\sigma}{\rho g d},$$ следовательно:

$$d = \frac{4\sigma}{\rho g h} = \frac{4 \cdot 72{,}8 \cdot 10^{-2}\ \text{Н/кг}}{1\,\text{м} \cdot 1000\,\text{кг/м}^3 \cdot 10\,\text{Н/кг}} \approx 3 \cdot 10^{-5}\ \text{м} = 0{,}03$$ мм.

Ответ: $d = 0{,}03$ мм.

№ 2

Дано:
$P_{нп} = 1{,}01 \cdot 10^5$ Па
$t = 100°C$
$V_1 = 10$ л; $V_2 = 5$ л

Δh — ?

Решение:

$$h_2 = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\sigma}{\rho g d_1}, \quad h_1 = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\sigma}{\rho g d_2},$$

$\Delta h = h_1 - h_2 = 5{,}6$ см.

Ответ: $\Delta h = 5{,}6$ см.

№ 3

Дано:
$d = 2 \cdot 10^{-4}$ м
$h = 0{,}1$ м
$\sigma = 7{,}28 \cdot 10^{-2}$ Н/м

h_1, m_1 — ?

Решение:

$$h_1 = \frac{2\sigma}{\rho g r} - h = \frac{4\sigma}{\rho g d} - h =$$

$$= \frac{4 \cdot 7{,}28 \cdot 10^{-2}\ \text{Н/м}}{1000\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}\,\text{м}} - 0{,}1\,\text{м} =$$

$= 0{,}048$ м $= 4{,}8$ см.

$$m_1 = V_1\rho = Sh\rho = \pi r^2 h\rho = \frac{\pi d^2 \rho h}{4} = 4\frac{\pi d^2 \rho 4\sigma}{\rho g d} = \frac{\pi d\sigma}{g} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot 2 \cdot 10^{-4}\ \text{м} \cdot 7{,}28 \cdot 10^{-2}\ \text{Н/м}}{9{,}8\ \text{м/с}^2} = 4{,}6 \cdot 10^{-6}\ \text{кг} = 4{,}6\ \text{мг}.$$

Ответ: $h_1 = 4{,}8$ см, $m_1 = 4{,}6$ мг.

№ 4

$$P_1 = \frac{F}{S} = \frac{\sigma l}{S} = \frac{\sigma \cdot 2\pi r}{\pi r^2} = \frac{2\sigma}{r} = \frac{4\sigma}{d}, \quad P = \rho g(h + h_1) + P_1 = \rho g h + \frac{4\sigma}{d} =$$

$$= 1000\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 0{,}1\ \text{м} + \frac{4 \cdot 7{,}28 \cdot 10^{-2}\ \text{Н/м}}{2 \cdot 10^{-4}\ \text{м}} = 2906\ \text{Па} = 2{,}9\ \text{кПа}.$$

Ответ: P=2,9 кПа.

№ 5

Дано:	Решение:
σ ρ	$A = Fh = \sigma l \cdot \frac{2\sigma}{\rho g r} = \sigma \cdot 2\pi r \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\pi\sigma^2}{\rho g} = \frac{4 \cdot 3{,}14 \cdot (7{,}28 \cdot 10^{-3}\ \text{Н/м})^2}{1000\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2} =$
A — ?	$=6{,}79 \cdot 10^{-6}$ Дж $\approx$ 6,8 мкДж. Ответ: А = 6,8 Дж.

11 Твердое тело

§ 66.Кристаллизация и плавление твердых тел

ВОПРОСЫ

1. Кристаллизация происходит, когда из-за охлаждения жидкости молекулы начинают останавливаться около положения устойчивого равновесия (т.е. когда прекращаются перескоки молекул жидкости из одного положения устойчивого равновесия в другое).

2. Молекулы жидкости упорядочены на расстояниях не более двух-трех слоев молекул (ближний порядок расположения молекул). Они совершают перескоки из одного положения устойчивого равновесия в другое. При переходе вещества из жидкого состояния в твердое перескоки прекращаются, и молекулы начинают колебаться около положения устойчивого равновесия. При этом расположение молекул упорядочивается, появляется дальний порядок расположения молекул.

3. Кристаллизация происходит при определенной температуре, так как энергия выделяется в этом случае за счет изменения потенциальной энергии взаимодействия молекул. Плавление происходит при одной температуре, потому что получаемая телом энергия тратится на разрушение кристаллической решетки, а это происходит практически одновременно.

4. Парафин — это аморфное тело (с точки зрения внутреннего строения — очень вязкая жидкость). Затвердевший парафин не является телом — в нем не образуется кристаллическая решетка. Жидкость уменьшается в объеме при уменьшении температуры. Значит, при затвердевании жидкого парафина его объем уменьшается.

5. Вода замерзает только на поверхности, но не по всему объему водоемов, потому что требуется отобрать у воды очень большую энергию, а так низко температура не опускается.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$m_1 = 1$	$Q_1 = cm_1(t_2 - t_1)$ – количество теплоты,которое отдает гиря при нагревании.
$t_1 = 500\ ^0\text{C}$	
$t_2 = 0\ ^0\text{C}$	$Q_2 = \lambda m_2$ – количество теплоты, которое необходимо для плавления льда.
m_2 — ?	

$Q_2 = Q_1$; $cm_1(t_2\text{-}t_1) = \lambda m_2 \Rightarrow m_2 = cm_1/\lambda\ (t_2 - t_1)$;

$$m_2 = \frac{0{,}4\cdot 10^3\ \text{Дж/кг}\cdot K\cdot 1\ \text{кг}\cdot 500\ {}^0C}{330\cdot 10^3\ \text{Дж/кг}} = 0{,}6\ \text{кг}.$$ Ответ $m_2 = 0{,}6$ кг.

№ 2

Дано:	Решение:
S= 2 м^2 = 10^{-2}м	m = Shρ;
h =500 ^{0}C	$m\lambda = E\Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{m\lambda}{E} = \frac{Sh\rho\lambda}{ES} =$
t_1 =0 ^{0}C	$= \frac{350\cdot 10^3\ \text{Дж/кг}\cdot {}^{o}\text{C}\cdot 10^{-2}\ м\cdot 900\text{кг/м}^2}{350\text{Вт/м}^2} =$
E = 350 Вт/м^2	= 8485,7 с = 2,4 г.
Δt — ?	Ответ: Δt =2,4 г

№ 3

Дано:	Решение:
m_1 = 1 кг	$Q_1 = \lambda_1 m_1(t - t_1)$ — количество теплоты, необходимое
t_1 = – 10 ^{0}C	для нагревания льда до 0 ^{0}C. $Q_2 = \lambda_1 m_1$ — количество
t_2 = 110 ^{0}C	теплоты, необходимое для плавления льда.
Q — ?	

$Q_3 = cm_1(t_3 - t)$ — количество теплоты, необходимое для нагревания воды от 0 ^{0}C до 100 ^{0}C. $Q_4 = rm$ — количество теплоты, необходимое для испарения воды. $Q_5 = c_3m(t_2 - t_3)$ — количество теплоты, необходимое для нагревания пара.

$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$; Q =
= 2100Дж/кг · К · 1 кг · 10 ^{0}C + 330 · 10^3 Дж/кг · К · 1 кг+
+4200 Дж/кг · К · 1 кг · 100 ^{0}C + 2260 · 10^3 Дж/кг · 1кг + 2 · 10 ^{0}C =
= 3,1 · 10^6 Дж = 3,1 МДж. Ответ: 3,1 МДж.

№ 4

Дано:	Решение:
c = 2,1 · 10^3 Дж/кг · К	$cm(t - t_1) + m\lambda = \frac{2mV^2}{2}$; $c(t - t_1) + \lambda = V^2 \Rightarrow$
λ= 330 · 10^3 Дж/кг	$V = \sqrt{c(t - t_1) + \lambda}$;
t_1 = – 10 ^{0}C	$V = \sqrt{2{,}1\cdot 10^3\ \text{Дж/кг}\cdot\text{К}\cdot 10\ {}^{o}\text{C} + 330\cdot 10^3\ \text{Дж/кг}} =$
$V = V_1 = V_2$ — ?	$= 10^2\sqrt{35{,}1} = 5{,}9\cdot 10^2$ м/с.
	Ответ: V = 0,59 км/с

§ 67.Структура твердых тел

ВОПРОСЫ

1. Твердые тела разделяются на несколько видов: кристаллические тела, аморфные тела и композиты. Принадлежность к каждому из вышеперечисленных видов определяется химическим составом и степенью упорядоченностью молекул в твердом теле.

2. Расположение частиц в кристаллической решетке периодическое, регулярное.

Узлами кристаллической решетки называются положения устойчивого равновесия, около которых колеблются молекулы.

3. Твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку называется монокристаллом.

Твердое тело, состоящее из большого числа беспорядочно располагающихся монокристаллов, называется поликристаллом.

4. К аморфным телам относятся твердые тела, в которых частицы в пространстве расположены неупорядоченно. (Например, стекло, различные смолы, пластмассы и т.д.).

5. К композитам относятся твердые тела, в которых частицы упорядоченны в некоторой области пространства, но эта упорядоченность не повторяется периодически. (Например, дерево, бетон и.д.).

§ 68.Кристаллическая решетка

ВОПРОСЫ

1. Основные типы кристаллических решеток: кубическая, тетрагональная, орторомбическая, моноклинная, триклинная, тригональная, гексагональная.

2. В кубической решетке атомы заполняют 52% пространства, в кубической центрированной — 68%, в гранецентрированной и гексагональной — 74%.

3. Примера полиморфизма могут служить три состояния твердого углерода (графит, алмаз и фулерен), а также несколько модификаций льда.

4. Независимость физических свойств вещества от направления называется изотропией. Зависимость физических свойств вещества от направления называется анизотропией.

5. Большинство монокристаллов анизотропны, все поликристаллы изотропны.

§ 69. Механические свойства твердых тел

ВОПРОСЫ

1. Изменение под действием внешней силы размеров и формы твердого тела называется деформацией.

2. Деформация называется упругой, если она исчезает после прекращения действия силы (малое растяжение пружины). Деформация называется неупругой, если она остается после прекращения действия силы (изменение формы куска пластилина).

3. Отношение силы упругости $F_{упр}$, возникающей в теле при деформации, к площади S сечения тела называется напряжением:

$$\sigma = \frac{F_{упр}}{S}.$$

Напряжение измеряется в Паскалях (1 Па).

Закон Гука:

Напряжение σ при упругой деформации пропорционально относительному удлинению ε: $\sigma = E\varepsilon$, где коэффициент пропорциональности E, зависящий от вещества, называется модулем Юнга.

4. Максимальное напряжение в веществе, при котором деформация еще остается упругой, называется пределом упругости.

5. Предел упругости при сжатии больше предела упругости при растяжении, потому что силы молекулярного отталкивания растут быстрее при уменьшения расстояния между молекулами, чем силы молекулярного притяжения при увеличении расстояния между молекулами.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
ρ	$F_{упр} = \sigma S = mg = h g \rho$, поэтому:
σ	$h = \sigma / g \rho = 170$ м.
h — ?	Ответ: $h = \sigma / g \rho = 170$ м.

№ 2

Дано:	Решение:
σ, m	$F_{упр} = \sigma S = \sigma \pi r^2 = mg$, поэтому:
d — ?	$r^2 = mg / \sigma \pi$.
	$d = r / 2 = 2$ см.
	Ответ: $\Delta d = r / 2 = 2$ см.

№ 3

Дано:	Решение:
E, l, d, m	$F_{упр} = \sigma\ S = mg = \mathrm{S\ E}\ \varepsilon = S\ E\ \Delta l\ /\ l,$ поэтому:
Δl – ?	$\Delta l = mg\ l\ /\ S\ E.$ Ответ: $\Delta l = mg\ l\ /\ S\ E.$

№ 4

Дано:	Решение:
R_1, R_2, S, σ	$F_{упр} = \sigma\ S = mg$, поэтому:
E –?	$m = \sigma\ S\ /\ g = \sigma\pi\ (R_1^2 - R_2^{\ 2}) = 4{,}9$ т.
	Ответ: $m = \sigma\ S\ /\ g = \sigma\pi\ (R_1^2 - R_2^{\ 2}) = 4{,}9$ т.

№ 5

Дано:	Решение:
F, ε, S	$F = \sigma\ S = mg = S\ E\ \varepsilon$. Отсюда получаем:
E – ?	$E = m\ g\ /\ \varepsilon\ S = 24$ Мпа. Ответ: $E = m\ g\ /\ \varepsilon\ S = 24$ Мпа.

12 Механические и звуковые волны

§ 70.Распространение волн в упругой среде

ВОПРОСЫ

1. Перенос частиц и перенос энергии.

2. Перенос энергии и импульса, при котором не происходит переноса вещества, называется волновым процессом.

Механические волны могут распространяться только в упругой среде.

3. Волна называется продольной, если в ней направления движение частиц среды совпадает с направлением распространения волны.

Возьмем сосуд с газом под поршнем. Немого вдвинем поршень в сосуд, давление газа в окрестности поршня станет больше среднего давления газа в сосуде. В результате этого частицы из этой области придут в движение, чтобы уменьшить давление, и передадут свой импульс соседней области. С этими частицами произойдет то же самое, и они передадут свой импульс дальше молекулам газа. Этот процесс продолжается дальше, и так происходит распространение продольной волны в газе. В твердом теле происходит все аналогично, но для образования в нем продольной волны нужно сильно ударить по телу. При этом также образуется и поперечная волна.

4. Волна называется поперечной, если в ней направление движения частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны. Возьмем твердое тело, которое несколько деформировано. После прекращения деформации молекулы тела начнут колебаться, а затем передадут свой импульс соседям, те своим соседям и т.д. При этом образуются обычно и продольная, и поперечная волны.

5. Если конец шнура не закреплен, то отраженная от этого конца волна будет в фазе с падающей, если закреплен, то в противофазе.

§ 71.Периодические волны

ВОПРОСЫ

1. Волна называется гармонической, если она возникает под действием гармонических колебаний.

2. Возьмем сосуд с газом под поршнем. Будем перемещать поршень по гармоническому закону. При этом давление газа около поршня будет расти, когда мы будем вдвигать поршень, и уменьшаться, когда выдвигать. Чтобы скомпенсировать давление газа, большее или меньшее среднего, молекулы газа будут перемещаться, изменяя давление в разных точках сосуда. Так образуется продольная гармоническая волна.

3. Расстояние, на которое распространится гармоническая волна за один период, называется длиной волны λ: $\lambda = vT$, где v — скорость волны.

4. Под действием внешних условий возможно распространение волн только в определенных направлениях.

Плоскость поляризации можно определить как плоскость, в которой частицы среды в волне совершают колебания.

5. Поляризатором называется устройство, предназначенное для выделения волны со строго определенной поляризацией.

Рассмотрим поляризатор для механических волн. Пусть мы создали механическую волну в шнуре. Пропустим теперь этот шнур через тонкую щель. При этом волна будет поляризована в перпендикулярном щели направлении.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$v = 1498$ м/с $\lambda = 3$ м	$\lambda = vT;\ T = \dfrac{1}{\nu}$, отсюда мы получаем:
ν — ?	$\nu = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{1498\text{ м/с}}{3{,}4\text{ м}} \approx 440$ Гц. Ответ: $\nu \approx 440$ Гц.

№ 2

Дано:	Решение:
$T = 5\cdot10^{-3}$ с $\lambda = 3$ м	По формуле: $\lambda = vT$, поэтому мы получаем:
v — ?	$v = \dfrac{\lambda}{T} = \dfrac{3\text{ м}}{0{,}5\cdot10^{-3}\text{ с}} = 6\cdot10^3$ м/с=6 км/с. Ответ: $v = 6$ км/с.

№ 3

Дано:	Решение:
$\lambda_1 = \lambda$ $\lambda_1 = 2\lambda$ ν	Так как $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$, то при $\nu = \text{const}$ мы получаем:
$\frac{v_1}{v_2}$ — ?	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\lambda}{2\lambda} = 0{,}5$. Ответ: $\frac{v_1}{v_2} = 0{,}5$.

§ 72.Стоячие волны

ВОПРОСЫ

1. Волна, которая образованна в результате сложения двух гармонических волн с одинаковой поляризацией, частотой и амплитудой, распространяющихся навстречу друг другу, называется стоячей.

Сложение двух синусоид (с одинаковой амплитудой) дает синусоиду с увеличенной вдвое амплитудой.

2. Каждая точка стоячей поперечной волны колеблется в перпендикулярном направлении к направлению распространения волн, породивших данную стоячую волну, по гармоническому закону, с определенным периодом внешнего возмущения и некоторой определенной амплитудой.

3. Положения точек стоячей волны, в которых амплитуда колебаний наибольшая, называются пучностями стоячей волны.

Положения неподвижных точек стоячей волны, в которых амплитуда колебаний равна нулю, называются узлами стоячей волны.

4. Если на длине струны укладывается целое число полуволн.

5. Частота ν_n колебаний в стоячей волны длиной l равна :

$\nu_n = \frac{v}{2l} n$, где v — скорость волны. Тогда первой гармоникой называется мода колебаний с частотой ν_1, n-ым обертоном — мода колебаний с частотой ν_n.

ЗАДАЧИ

№ 1

$$y_1 = A\cos\omega(t - x/v) = A\cos\left[\omega t - \omega\frac{x}{v}\right],$$

$y_2 = A\cos\omega(t + x/v) = = A\cos\left[\omega t + \omega\frac{x}{v}\right].$

$y_1 + y_2 = \text{y} = = A\cos\left[\omega t - \omega\frac{x}{v}\right] + A\cos\left[\omega t + \omega\frac{x}{v}\right] =$

$= A\cos\omega t \cdot \cos\omega\frac{x}{v} + A\sin\omega t \cdot \sin\omega\frac{x}{v} + A\cos\omega t \cdot \cos\omega\frac{x}{v} - A\sin\omega t \cdot \sin\omega\frac{x}{v} =$

$= 2A\cos\omega t \cdot \cos\omega\frac{x}{v}.\quad y = 2A\cos\frac{\omega x}{v}\cos\omega t.$

№ 2

Так как: $\omega = \frac{2\pi}{T}$ и $v = \frac{\lambda}{T}$, то, подставляя в уравнение

$y = 2A\cos\frac{\omega x}{v}\cos\omega t$ получаем: $y = 2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\frac{2\pi t}{T}.$

№ 3

Для узлов стоячей волны по формуле:

$y = 0 = 2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\frac{2\pi t}{T} \Rightarrow \cos\frac{2\pi x}{\lambda} = 0.\quad \frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{\pi}{2} + \pi n;\ n \in \mathrm{Z}.$

$x = \frac{\lambda}{2\pi}\left(\frac{\pi}{2} + \pi n\right) = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2}n;\ n \in \mathrm{Z}.$

Для того, чтобы получить стоячую волну:

$y = 2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\frac{2\pi t}{T} \Rightarrow \cos\frac{2\pi x}{\lambda} = 1.\quad \frac{2\pi x}{\lambda} = \pi n;$

$n \in \mathrm{Z} \Rightarrow \cos\frac{2\pi x}{\lambda} = 1.$

№ 4

Дано:	Решение:
$L_{41} = 0{,}6$ м	Расстояние между двумя пучностями равно половине длины волны: $l = \frac{1}{2}\lambda.$
λ — ?	Также: $l = \frac{L_{41}}{4-1}$,

поэтому: $\lambda = \frac{2}{3}L_{41} = \frac{2}{3}\cdot 0{,}6$ м $= 0{,}4$ м. Ответ: $\lambda = 0{,}4$ м.

№ 5

Дано:	Решение:
$l = 0,5$ м $v = 3500$ м/с $n = 1$	Для частоты n-й моды колебаний получаем: $\nu_n = = \frac{v}{2l} n = \frac{3500\text{ м/с}}{2 \cdot 0,5\text{ м}} \cdot 1 = 3500$ Гц $= 3,5$ кГц.
ν_1 — ?	Ответ: $\nu_1 = 3,5$ кГц.

§ 73.Звуковые волны

ВОПРОСЫ

1. Звуком называются упругие волны в среде, которые воспринимаются человеческим ухом.

2. Колеблющееся тело, которое создает последовательные области низкого и высокого давлений воздуха (звуковую волну), является источником звука. Звук вызывает колебания с определенной частотой, Доходя до человеческого уха. Эти колебания и воспринимаются человеком.

3. К инфразвуковым относятся волны с частотой меньше 16 Гц, к звуковым — с частотой от 16 Гц до 20 кГц, к ультразвуковым — с частотой больше 20 кГц.

4. Размеры источника, генерирующих инфразвуковые волны, порядка десятков метров, ультразвуковые волны — порядка нескольких миллиметров, звуковые — от нескольких миллиметров до нескольких метров.

5. Скорость звука в жидкости меньше скорости звука в твердом теле и больше скорости звука в газах.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$V = 343$ м/с $v_1 = 16$ Гц $v_2 = 20$ кГц	$\lambda = V / v$; $\lambda_1 = \frac{343\text{ м/с}}{16\text{ Гц}} = 21,4$ м ;
λ_1, λ_2 — ?	$\lambda_2 = \frac{343\text{ м/с}}{20 \cdot 10^3\text{ Гц}} = 17,1 \cdot 10^{-3}$ м ≈ 17 мм . Ответ: $\lambda_1 = 21,4$ мм, $\lambda_2 = 17$мм

№ 2

Дано:	Решение:
$h = 686$ м/с $V = 343$ м/с	$h = V_0 t - \dfrac{gt^2}{2}$; $t = \dfrac{h}{V} \Rightarrow h = V_0 \cdot \dfrac{h}{V} - \dfrac{gh^2}{2V^2}$,
V_0 — ?	

откуда $V_0 = V + \dfrac{gh}{2V} = 343$ м/с $+ \dfrac{9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 686\ \text{м}}{2 \cdot 343\ \text{м/с}} = 353$ м/с

Ответ: $\lambda_1 = 21{,}4$ мм, $\lambda_2 = 17$мм

№ 3

Дано:	Решение:
$\nu_1 =$ 100 кГц $\nu_2 = 1$ МГц	$\lambda = \dfrac{V}{\nu}$; $\lambda_1 = \dfrac{V_1}{\nu_1} = \dfrac{1531\ \text{м/с}}{10^6\ \text{Гц}} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м
λ_1, λ_2 — ?	$\lambda_2 = \dfrac{V_2}{\nu_2} = \dfrac{343\ \text{м/с}}{10^5\ \text{Гц}} = 3{,}43 \cdot 10^{-3}$ м. Ответ: $\lambda_1 = 1{,}5$ мм, $\lambda_2 = 3{,}43$ мм

№ 4.

Дано:	Решение:
$t = 0{,}01$с $V = 1531$ м/с	$h = V \cdot t / 2$; h=1531 м/с $\cdot$ 0,005 с=7,6 м. Ответ: h=7,6 м
h — ?	

№ 5

Дано:	Решение:
$\tau = 3$ с $V_1 = 343$м/с $V_2 = 1500$ м/с	$l = V_2 t \Rightarrow t = l / V_2$; $l = V_1(t + \tau) = V_1(l / V_2 + \tau)$; $l = \dfrac{V_1 l}{V_2} + V_1\tau \Rightarrow l = \dfrac{V_1 V_2}{V_2 - V_1}\tau = \dfrac{343\text{м/с} \cdot 1500\ \text{м/с}}{1500\ \text{м/с} - 343\ \text{м/с}} \cdot 3\text{с} = 1103\text{м}$. Ответ: $l = 1103$ м

§ 74.Высота, тембр и громкость звука

ВОПРОСЫ

1. Частота колебаний источника звука определяет высоту звука.

2. Отличие тембров звука одной частоты зависит от формы звуковых колебаний.

3. Порогом слышимости называется минимальное давление воздуха, которое еще может воспринять человеческое ухо.

При пороге слышимости интенсивность звука равна
$I_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2.

4. Болевым порогом называется максимальное давление воздуха, которое еще может воспринять человеческое ухо.

При болевом пороге интенсивность звука равна $I_{БП} = 1$ Вт/м^2.

5. Интенсивности звука I оценивается как отношение падающей на поверхность S мощности P звуковых волн к площади этой поверхности: $I = \frac{P}{S}$. Интенсивность в СИ измеряется в ваттах на квадратный метр (Вт/ м^2).

ЗАДАЧИ

№ 1.

Дано:
$l = 60$ см $= 0{,}6$м
$\nu = 1$ кГц $= 10^3$ Гц
$V = 343$ м/с
n, V_c – ?

Решение:

$n = \frac{l}{\lambda/2}$, где $\lambda = \frac{V}{\nu}$ $n = \frac{2\nu l}{V} = \frac{2\cdot 10^3\,\text{Гц}\cdot 0{,}6\text{м}}{343\text{ м/с}} = 3{,}5 \Rightarrow$

$n = 1; 2; 3.$

$V_c = \frac{2\nu l}{n} = \frac{2\cdot 10^3\,\text{Гц}\cdot 0{,}6\text{м}}{1} = 1200\text{м/с}$. Ответ: $n = 1; 2; 3$. $V_c = 1200$ м/с.

№ 2

Дано:
$\beta = 69{,}9$ дБ
I – ?

Решение:

$\beta = 10\ \lg\frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{\beta}{10} = \lg\frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{\beta/10} \Rightarrow$

$\Rightarrow I = I_0\cdot 10^{\beta/10} = 10^{-12}\text{В/м}^2\cdot 10^{69{,}9/10} = 10\text{мк Вт/м}^2$. Ответ: $\beta = 10\text{мк}\cdot\text{Вт/м}^2$

№ 3

Дано:
$\kappa = 0$
$I_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2
I – ?

Решение:

$\kappa = \lg\frac{I}{I_0} \Rightarrow 10^\kappa = \frac{I}{I_0} \Rightarrow I = I_0\cdot 10^\kappa = 10^{-12}\text{В/м}^2\cdot 10^0 =$

$= 10^{-12}\ \text{Вт/м}^2$. Ответ: к = 10^{-12} Вт/м^2.

№ 4

Дано:
$\beta_1 = 110$ дБ
$I = 2\,I_1$
I – ?

Решение:

$\beta_2 = 10\lg\frac{I}{I_0} = 10\lg\frac{2I}{I_0}$; $\beta_1 = 10\lg\frac{I_1}{I_0} \Rightarrow I_1 = I_0\cdot 10^{\beta_1/10}$;

$$\beta_2 = 10\lg\frac{2I_0 10^{\beta_1/10}}{I_0} = 10\lg 2\cdot 10^{\beta_1/10} = 10(\lg 2 + \lg 10^{\beta_1/10}) =$$

$$= 10\left(\frac{\ln 2}{\ln 10} + \frac{\beta_1}{10}\right) = 10\ (0{,}4343\cdot 2{,}9957 + 11) = 123 \text{ дБ}.$$ Ответ: β_2=123 дБ

№ 5

Дано:	Решение:
$S = 10$ см^2 = 10^{-3}м^2 $\beta = 80$дБ	$\beta = 10\lg\frac{I}{I_0}$; $80 = 10\lg\frac{I}{I_0} \Rightarrow \lg\frac{I}{I_0} = 8$, $\frac{I}{I_0} = 10^8$,
E – ?	

$I = I_0\cdot 10^8$, $I = 10^{-12}$ Вт / м$^2\cdot 10^8 = 10^{-4}$ Вт / м^2;

$N = I\cdot S = 10^{-3}$ м$^2\cdot 10^{-4}$ Вт/м^2 = 10^{-7} Вт, $E = N\cdot t = 10^{-7}$ Вт$\cdot$ 1 с = 10^{-7}.

Ответ: E =10^{-7} Дж.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

13 Силы электромагнитного взаимодействия неподвижных зарядов

§ 75. Электрический заряд. Квантование заряда

ВОПРОСЫ

1. Существование тел стабильных размеров объясняется не только гравитационным, но и электромагнитным взаимодействием.

Гравитационные силы – силы притяжения. Если бы не было сил иной природы, то тела стремились бы сжаться в одну точку.

2. Электрический заряд характеризует способность тела к электромагнитным взаимодействиям.

3. Наименьшим зарядом (известным в наше время) обладает электрон $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Другие элементарные частицы (кварки) могут обладать еще меньшим зарядом $\frac{2}{3}e$, $\frac{1}{3}e$, но они не наблюдались экспериментально в свободном стабильном состоянии.

4. Любой электрический заряд кратен заряду электрона.

5. Потому что заряд кварка, как и заряд электрона, неделим и неизменен. (Если свободные кварки будут экспериментально обнаружены, то изменится только величина минимального заряда, но не принцип квантования зарядов.)

§ 76. Электризация тел. Закон сохранения заряда

ВОПРОСЫ

1. Потому что часть электронов с одного тела переходит на другое тело. На теле с избыточным количеством электронов образуется отрицательный заряд, на отдавшем электроны теле образуется положительный заряд.

2. Так как энергия связи электронов с молекулами шерсти меньше, чем с молекулами дерева, то часть электронов с шерсти перейдет на дерево. При этом дерево зарядится отрицательно, а шерсть кошки положительно.

3. Масса тела при электризации уменьшается, если тело отдает электроны, и увеличивается, если тело их принимает. Электроны обладают массой, но изменение массы настолько мало, что экспериментально не обнаруживается.

4. Магнитофонная пленка, снятая с кассеты, притягивается к различным предметам, поскольку она была наэлектризована трением.

5. *Закон сохранения электрического заряда*:

Алгебраическая сумма зарядов в изолированной системе остается неизменной.

ЗАДАЧИ

№ 1.

Дано:	Решение:
${}^{235}_{92}U$	В атоме рана содержится 92 электрона и столько же протонов, т.е $q_+ = q_- = 92 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл = $= 1{,}47 \cdot 10^{-17}$ Кл. Ответ: $q_+ = q_- = 1{,}47 \cdot 10^{-17}$ Кл
$q_+, q_- - ?$	

№ 2

Дано:	Решение:
$V = 9$ мм^3 $= 9 \cdot 10^{-9}$м^3	Так как капля электронейтральна, то $q_+ = q_-$
$m_0 = 3 \cdot 10^{-26}$ кг	В одной молекуле воды (H_2O) содержится 10 электронов $\Rightarrow$
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	$q = 10 \cdot Ne$, где $N = \dfrac{m}{m_0}$, $m = \rho V$
$q_+, q_- - ?$	

$$\Rightarrow q = 10\frac{\rho Ve}{m_0} = \frac{10 \cdot 1000\ \text{кг/м}^3 \cdot 9 \cdot 10^{-9}\ \text{м}^3 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}}{3 \cdot 10^{-26}\text{кг}} = 480\ \text{Кл}.$$

Ответ: $q_+ = q_- = 480$ Кл.

№ 3

Дано:	Решение:
$q = -4{,}8 \cdot 10^{-13}$ Кл	$N = \dfrac{q}{e} = \dfrac{-4{,}8 \cdot 10^{-13}\text{Кл}}{-1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Кл}} = 3 \cdot 10^6$.
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	
$N - ?$	Ответ: $N = 3 \cdot 10^6$Кл

№ 4

Дано:	Решение:
$q = -1{,}6 \cdot 10^{-21}$ Кл	$N = \dfrac{q}{e} = \dfrac{-1{,}6 \cdot 10^{-21}\text{Кл}}{-1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Кл}} = 10^{-2}$.
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	Ответ: нельзя, так как передается только целое число электронов.
$N - ?$	

№ 5

Дано:	Решение:
$q = 8 \cdot 10^{-12}$ Кл	На шерсти остается заряд $q_ш = -q = -8 \cdot 10^{-12}$ Кл.
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	Так как отрицательный заряд у шерсти, значит,
$q_ш, N - ?$	электроны перешли со стекла на шерсть.

$N = \dfrac{q}{e} = \dfrac{8 \cdot 10^{-12}\text{Кл}}{-1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Кл}} = 5 \cdot 10^{7}$ Кл. Ответ: $N = 5 \cdot 10^{7}$ Кл.

§ 77.Закон Кулона

ВОПРОСЫ

1. Для проведения опытов Кулон использовал крутильные весы. Одноименно заряженные шарики, один из которых был прикреплен к коромыслу весов, начинали отталкиваться, закручивая нить весов. По величине угла поворота коромысла Кулон определял силу взаимодействия зарядов.

2. *Закон Кулона*: Сила взаимодействия $F_{Кл}$ двух зарядов q_1 и q_2, находящихся в вакууме, обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними и прямо пропорциональна произведению модуля этих зарядов: $F_{Кл} = k\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$, где $k = 9 \cdot 10^9\ \dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ — коэффициент пропорциональности в системе СИ.

Сила взаимодействия направлена по прямой, соединяющей заряды.

В таком виде закон Кулона выполняется для материальных точек.

3. Кулоновская сила отталкивания протонов больше силы их гравитационного взаимодействия на 39 порядков.

4. Поскольку обычно их действие скомпенсировано.

5. Кулоновская сила взаимодействия учеников, сидящих за одной партой, если бы доля избыточных электронов в их телах была бы 1% от полного количества электронов тела, была бы порядка веса Земли или 10^{25} Н.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
$q_1 = q_2 = 1$ мк Кл $= 10^{-6}$Кл
$r = 30$ см $= 0{,}3$ м
$F - ?$

Решение:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{9\cdot 10^9\ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot 10^{-2}\,\text{Кл}}{0{,}09\text{м}^2} = 0{,}1\ \text{Н}.$$

Ответ: $F = 0{,}1$ Н.

№ 2

Дано:
$r = 0{,}5$ см.
$F = 3{,}6$ Н
$q - ?$

Решение:

$$F = k\frac{q^2}{r^2} \Rightarrow q = \sqrt{\frac{Fr^2}{k}} = r\sqrt{\frac{F}{k}} = 0{,}5\text{м}\sqrt{\frac{3{,}6\text{Н}}{9\cdot 10^9\ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} =$$

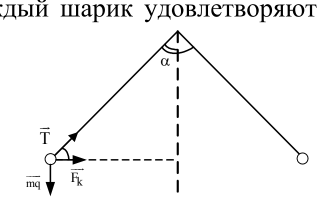
$$= 10^{-5}\,\text{Кл}.$$

Ответ: $F = 10^{-5}$ Кл.

№ 3

Дано:
$m_1 =$
$m_2 = 44{,}1$ г $=$
$= \ 4{,}41\cdot 10^{-4}$ кг
$l = 0{,}5$ м
$\alpha = 90°$
$q - ?$

Решение:
Силы действующие на каждый шарик удовлетворяют условию: $\vec{T} + m\vec{q} + \vec{F_k} = 0$.



$$\begin{cases} T\sin\alpha = mg \\ F_k = T\cos\alpha \end{cases} \Rightarrow F_k = mgtg\alpha$$

$$K\frac{q^2}{r^2} = mgtg\alpha,$$

где $r = 2l\cos\alpha \Rightarrow q = \sqrt{\frac{mg\sin^2\alpha\cdot 2l}{k}} =$

$$\sin\alpha\cdot\sqrt{\frac{2mgl}{k}} = \frac{\sqrt{2}}{2}\cdot\sqrt{\frac{4{,}41\cdot 10^{-4}\,\text{кг}\cdot 9{,}8\text{м/с}\cdot 2\cdot 0{,}5\text{м}}{9\cdot 10^9\ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} = 4{,}9\cdot 10^{-6}\,\text{Кл}.$$

Ответ: $q = 4{,}9$ мкКл.

№ 4

Дано:	Решение:
$r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ м. $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	$\frac{mv^2}{r} = k\frac{q^2}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{kq^2}{rm}} = q\sqrt{\frac{k}{rm}} =$
$T;\ w;\ v - ?$	

$$= 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{Кл}\sqrt{\frac{9 \cdot 10^9\,\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{5{,}3 \cdot 10^{-11}\,\text{м} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{кг}}} = 2{,}2 \cdot 10^{-6}\ \text{м/с}.$$

$$W = \frac{v}{r} = \frac{2{,}2 \cdot 10^{-6}\,\text{м/с}}{5{,}3 \cdot 10^{-11}\,\text{м}} = 4{,}1 \cdot 10^{17}\,\text{рад/с}.$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \cdot 3{,}14}{4{,}1 \cdot 10^{17}\,\text{рад/с}} = 1{,}52 \cdot 10^{-16}\,\text{с}.$$

§ 78.Равновесие статистических зарядов

ВОПРОСЫ

1. Поскольку только в этом случае сумма, сил действующих на этот заряд равна нулю.

2. Поскольку сумма кулоновских сил, действующих на него, равна нулю и не зависит от его знака.

3. Поскольку сумма кулоновских сил, действующих на него, равна нулю и не зависит от его величины.

4. Равновесие отрицательного заряда в точке *A* неустойчиво, поскольку при малейших горизонтальных изменениях положения заряда q_3 равновесие нарушится.

5. Равновесие статических зарядов неустойчиво, так как при малейших изменениях положения зарядов равновесие нарушится.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$l = 1$ м F = 0,576 Н Q = 10 мк Кл	$\begin{cases} F = \kappa\frac{q_1q_2}{l^2} \\ q_1 + q_2 = Q \end{cases}$ $\begin{cases} q_1 = Q - q_2 \\ F = \kappa\frac{(Q - q_2)q_q}{l^2} \end{cases}$; $\frac{Fl^2}{\kappa} = Qq_2 - q_2^2$
q_1, q_2 — ?	

Получили квадратное уравнение $10^{-5}q_2 - q_2^2 - \frac{0,576 \cdot 1}{9 \cdot 10^9} = 0$, решение которого дает два корня q_1 = 8 мк Кл, q_2 = 2 мк Кл.

Ответ: q_1 = 8 мк Кл, q_2 = 2 мк Кл.

№ 2

Дано:	Решение:
q; $2q$; l	Услови равновесия зарядов: $\kappa \frac{Qq}{x^2} = \frac{\kappa \cdot 2qQ}{(l-x)^2} - q_2^2$
x; Q — ?	

Это уравнение решено в § 78: $x = l\frac{\sqrt{q}}{\sqrt{q}+\sqrt{2q}} = \frac{l}{\sqrt{2}+1}$

№ 3

Дано:	Решение:
l = 30 см	$F_1 = F_2$,; $\vec{F_1} + \vec{F_2} = \vec{F}$;
F = 17,3 Н	$F = 2F_1 \cos 30^0$; $F_1 = \kappa \frac{q^2}{l^2}$
q — ?	

$$F = 2\kappa \frac{q^2}{l^2} \cos 30^0 \Rightarrow q = \frac{\sqrt{Fl^2}}{2\kappa \cos 30^0} =$$

$$= \sqrt{\frac{17,3\text{Н} \cdot 0,09\text{м}^2}{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}} = 10^{-5}\,\text{Кл}$$.Ответ: $q = 10^{-5}$Кл.

№ 4

Дано:	Решение:
q = –10мк Кл	$F_1 = F_2$; $F = 2F_1 \cos 30^0$; $F = F'$;
Q — ?	

$$\kappa \frac{2q^2 \cos 30^0}{l^2} = \kappa \frac{qQ}{\left(\frac{l}{2\cos 30^0}\right)^2}$$

$$Q = \frac{2q}{4\cos 30^0} = \frac{q}{\sqrt{3}} = 5,77 \cdot 10^{-6}\,\text{Кл}$$

Ответ: $Q = 5,77 \cdot 10^{-6}\,\text{Кл}$

№ 5

Дано:	Решение:
q	$F_1 = F_2$; $F = 2F_1 \cos 30^0 + F_3$;
Q — ?	

$$\kappa \frac{Qq}{\left(\frac{l\sqrt{2}}{2}\right)^2} = \frac{\kappa \cdot 2q^2 \frac{\sqrt{2}}{2}}{l^2} + \frac{\kappa \cdot q^2}{\left(l\sqrt{2}\right)^2}$$, откуда

$Q = -q\frac{2\sqrt{2}+1}{4}$. Ответ: $Q = -q\frac{2\sqrt{2}+1}{4}$

§ 79.Напряженность электростатического поля

ВОПРОСЫ

1. Для того, чтобы обнаружить электрическое поле в пространстве необходимо внести в это поле пробный заряд.

2. Напряженностью электрического поля E называется векторная величина, которая равна отношению силы Кулона $F_{\text{Кл}}$, действующей на пробный положительный заряд q, помещенный в данное поле, к величине самого этого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{Кл}}}{q}$.

Единицей напряженности в СИ является ньютон на кулон (1 Н/Кл).

3. Напряженность поля обратно пропорциональна квадрату расстояния.

4. Геометрическое место точек с одинаковым модулем напряженности электростатического поля точечного заряда образует сферу.

5. Геометрическое место точек с одинаковым по направлению вектором напряженности электростатического поля точечного заряда представляет собой луч.

З А Д А Ч И

№ 1

Дано:	Решение:
q=–3 мкКл=–3 $\cdot 10^{-6}$ Кл E=$2\cdot 10^{5}$ Н/Кл	$\vec{F} = q\vec{E}$, поэтому направление силы совпадает с направлением напряженности.
F — ?	$F = 2\cdot 10^{5} Н/Кл \cdot 3\cdot 10^{-6} Кл = 0,6 Н$ Ответ: $F = 0,6 Н$.

№ 2

Дано:	Решение:
q=$1,6\cdot 10^{-19}$ Кл r=$5,3\cdot 10^{-11}$м	$E = K\cdot\dfrac{q}{r^2} = 9\cdot 10^9 \dfrac{Н\cdot м^2}{Кл^2}\cdot\dfrac{1,6\cdot 10^{-19} Кл}{(5,3\cdot 10^{-11})^2 м^2} =$
E, F — ?	$= 5,3\cdot 10^{11} Н/К.$

$F = qE = 1,6\cdot 10^{-19} Кл \cdot 5,3\cdot 10^{11} Н/Кл = 8,2\cdot 10^{-8} Н.$

Ответ: $E = 5,3\cdot 10^{11} Н/Кл$, $F = 8,2\cdot 10^{-8} Н.$

№ 3

Дано:	Решение:
E=$1,3\cdot 10^{-11}$Н/Кл q=–$1,6\cdot 10^{-19}$ Кл m=$9,1\cdot 10^{-31}$кг	$ma = qE \Rightarrow a = \dfrac{qE}{m} = \dfrac{1,6\cdot 10^{-19}\ Кл\cdot 1,3\cdot 10^{11}}{9,1\cdot 10^{-31} кг} =$ $= 2,28\cdot 10^{22} м/с^2$
a — ?	Ответ: $a = 2,28\cdot 10^{22} м/с^2$.

№ 4

Дано:	Решение:
$q = 2$ мкКл $F = 9$ Н $r_1 = r/2$	$F_2 = k\dfrac{qQ}{r^2} \Rightarrow \dfrac{Q}{r^2} = \dfrac{F}{kq}$ $E_1 = k\dfrac{Q}{(r/2)^2} = 4k\dfrac{Q}{r^2} \Rightarrow$
E_1 — ?	$\Rightarrow E_1 = \dfrac{4F}{q} = \dfrac{4\cdot 9 Н}{2\cdot 10^{-6} Кл} = 1,8\cdot 10^{-7}$ Н/Кл. Ответ: $E_1 = 1,8\cdot 10^{-7}$ Н/Кл.

№ 5

Дано:

$E_1 = 3,6 \cdot 10^{-5}$ Н/Кл
$E_2 = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Н/Кл
$r_1 = x$
$r_2 = l_{r3} = l/2$

E_3 — ?

Решение:

$$E_1 = k\frac{Q}{x^2} \Rightarrow x = \sqrt{\frac{kQ}{E_1}}$$

$$E_2 = k\frac{Q}{(x+l)^2} \Rightarrow x + l = \sqrt{\frac{kQ}{E_2}} \Rightarrow$$

$$l = \sqrt{\frac{kQ}{E_2}} - \sqrt{\frac{kQ}{E_1}}$$

$$E_3 = k\frac{Q}{(x+l/2)^2} = k\frac{Q}{\left(\sqrt{\frac{kQ}{E_1}} + \frac{\sqrt{\frac{kQ}{E_2}} - \sqrt{\frac{kQ}{E_1}}}{2}\right)^2} = \frac{4E_1E_2}{(\sqrt{E_1} + \sqrt{E_2})^2} =$$

$$= \frac{4 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}\ \text{Н/Кл} \cdot 1/6 \cdot 10^{-5}\ \text{Н/Кл}}{(\sqrt{3,6 \cdot 10^{-5}\ \text{Н/Кл}} + \sqrt{1,6 \cdot 10^{-5}\ \text{Н/Кл}})^2} = 2,3 \cdot 10^{-5}\ \text{Н/Кл}.$$

Ответ: $E_3 = 2,3 \cdot 10^{-5}$ Н/Кл.

§ 80. Линии напряженности электростатического поля

1. Линии, в каждой точке поля касательные к которым совпадают с направлением вектора электрической напряженности, называются линиями напряженности электрического поля.

2. Потому что, если наш заряд положительный, то пробный заряд в любой точке притягивается к нему, а, если отрицательный, то отталкивается.

3. Линии напряженности электрического поля начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных или в бесконечности.

Линии напряженности не пересекаются, потому что в противном случае направление напряженности поля в точке пересечения двух линий напряженности будет неопределенно.

4. Допустим, что N — число линий напряженности поля точечного заряда Q. Пусть также эти линии пронизывают сферу площади S:

$$S = 4\pi r^2.$$

Следовательно, число линий напряженности, приходящихся на площадь S, пропорционально $\frac{1}{r^2}$. Поскольку $E \sim \frac{1}{r^2}$, получаем, что $E \sim N$.

5. Электростатическое поле называется однородным, если в любой точке поля напряженность одинакова как по модулю, так и по направлению.

§ 81. Принцип суперпозиции электростатических полей

ВОПРОСЫ

1. Напряженность поля $\vec{E}$ системы зарядов в некоторой точке равна векторной сумме напряженностей $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, …, $\vec{E}_N$, созданных каждым зарядом системы:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_N.$$

2. Допустим, что l — размер системы зарядов с суммарным зарядом Q. Тогда напряженность электростатического поля E на расстоянии от системы $r >> l$ определяется формулой:

$$E \approx k\frac{Q}{r^2}.$$

3. Обратно пропорциональна расстоянию в кубе:

$$E = k\frac{Ql}{\left(r^2 + (l/r)^2\right)^{3/2}}.$$

4. Напряженность E сферы радиуса R с зарядом Q на расстоянии r ее центра:

$$E = \begin{cases} k\dfrac{Q}{r^2}, \text{ при } r \geq R, \\ 0, \text{ при } r < R. \end{cases}$$

Внутри сферы напряженность равна нулю, потому что на поверхности сферы всегда найдутся два таких заряда, что создаваемые ими напряженности в точке внутри сферы будут равны по модулю и противоположны по направлению.

5. Напряженность заряженной плоскости всегда направлена перпендикулярно этой плоскости, потому что на ее поверхности всегда найдутся два таких заряда, что создаваемые ими напряженности будут равны по модулю, а параллельные плоскости компоненты векторов напряженностей направлены противоположно.

Напряженность заряженной плоскости E равна:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0},$$

где σ — поверхностная плотность заряда, ε_0 — электрическая постоянная.

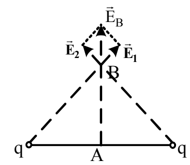
ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
q=10 млКл
l=12 см
r=l/2
$AB = x = 8$ см
E_A; E_B – ?

Решение:

$$E_A = 0;\ \vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_2;\ E_B = 2E_1 \cos 45° = 2K \cdot \frac{q \cos 45°}{(l/2\cos 45°)^2} = 2 \cdot 9 \cdot 10^9\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{10^{-5}\ \text{Кл}}{0{,}36 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}\ \text{м}^2} =$$



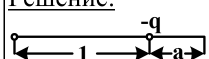
$$= 1{,}44 \cdot 10^7\ \text{Н/Кл}.$$

Ответ: $E_A = 0$; $E_B = 1{,}44 \cdot 10^7$ Н/Кл.

№ 2

Дано:
$q=\pm 3{,}2 \cdot 10^{-19}$ Кл
$l=10^{-9}$ м
$a=2{,}5 \cdot 10^{-10}$ м
E — ?

Решение:



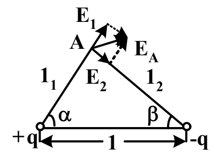
$$E = E_+ + E_- = K \cdot \frac{q}{(l+a)^2} + K \cdot \frac{q}{a^2} =$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}}{(10^{-9} + 2{,}5 \cdot 10^{-10})^2\ \text{м}^2} + \frac{9 \cdot 10^9\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}}{(2{,}5 \cdot 10^{-10})^2\ \text{м}^2} = 4{,}4 \cdot 10^{10}\ \text{Н/Кл}.$$

Ответ: $E = 4{,}4 \cdot 10^{10}$ Н/Кл.

№ 3

Дано:	Решение:
$q = \pm 2$ нКл $l = 10$ см $= 0{,}1$ м $l_1 = 6$ см $= 0{,}06$ м $l_2 = 8$ см $= 0{,}08$ м	$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$; $E_1 = K\dfrac{q}{l_1^2}$, ; $E_2 = K\dfrac{q}{l_2^2}$
E_A — ?	



$$E_A = E_1\cos\alpha + E_2\cos\beta;$$

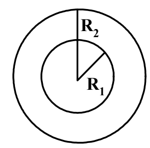
где cosα и cosβ найдены по теореме косинусов:

$$\cos\alpha = \frac{l_2^2 - l_1^2 - l^2}{2ll_1};\quad \cos\beta = \frac{l_1^2 - l_2^2 - l^2}{2ll_2}.\quad E_A = 5{,}74\cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$$

Ответ: $E_A = 5{,}74\cdot 10^3$ Н/Кл .

№ 4

Дано:	Решение:
$R_1 = 2$ см $= 0{,}02$ м $R_2 = 4$ см $= 0{,}04$ м $Q_1 = 1$ нКл $= 10^{-9}$ Кл $Q_2 = -3$ нКл $= 3\cdot 10^{-9}$ Кл $r_1 = 1$ см $= 0{,}01$ м $r_2 = 3$ см $= 0{,}03$ м $r_3 = 5$ см $= 0{,}05$ м	$E_1 = 0$, так как $r_1 < R_1$ $E_2 = K\dfrac{Q_1}{r_2^2} =$ $= 9\cdot 10^9 \dfrac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\dfrac{10^{-9}\text{Кл}^2}{9\cdot 10^{-4}\text{м}^2} =$ $= 10^4$ Н/Кл
E_1; E_2; E_3 — ?	

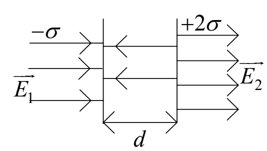


$$E_3 = K\frac{Q_1}{r_3^2} - K\frac{Q_2}{r_3^2} = \frac{K}{r_3^2}(Q_1 - Q_2) = \frac{9\cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{25\cdot 10^{-4}\text{м}^2}(-2\cdot 10^{-9}\text{Кл}) =$$
$$= -7{,}2\cdot 10^3 \text{ Н/Кл}$$

Ответ: $E_1 = 0$, $E_2 = 10^4$ Н/Кл, $E_3 = -7{,}2\cdot 10^3$ Н/Кл.

№ 5

Дано:	Решение:
σ; 2σ; d	
E_1, E_2, E_3 — ?	$E_1 = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$; $E_2 = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \dfrac{2\sigma}{2\varepsilon_0} = \dfrac{3\sigma}{2\varepsilon_0}$; $E_3 = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$.



14 Энергия электромагнитного взаимодействия неподвижных зарядов

§ 82. Работа сил электростатического поля

ВОПРОСЫ

1. Потому что силы гравитационной и электромагнитной природы одинаково зависят от расстояния между телами.

2. Работа электростатического поля зависит только от начального и конечного положений и не зависит от формы траектории.

3. Электростатическое поле потенциально, поскольку его работа зависит только от начального и конечного положений.

4. Потому что сила притяжения в обоих случаях обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

5. Потенциальная энергия W взаимодействия зарядов q_1 и q_2 на расстоянии r равна: $W = k\dfrac{q_1 q_2}{r}$.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$E = 3 \cdot 10^6$ Н/кл $l = 3 \cdot 10^{-9}$ м $\lvert e\rvert = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	По формуле работа равна: $A = Fl = El\lvert e\rvert = 3 \cdot 10^6$ Н/Кл$\cdot 3 \cdot 10^{-9}$ м$\cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл $=$ $= 1{,}44 \cdot 10^{-21}$ Дж, т к. $\Delta E_k = A$. Ответ: $\Delta E_k = 1{,}44 \cdot 10^{-21}$ Дж.
ΔE_k — ?	

№ 2

Дано:	Решение:
e, σ, d, ε_0, m_e	1. Работа электростатического поля рассчитывается по формуле: $A = eEd$; $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0} \Rightarrow A = \dfrac{e\sigma d}{\varepsilon_0}$; $A = \dfrac{mv^2}{2} \Rightarrow$ $\Rightarrow v = \sqrt{\dfrac{2A}{m}} = \sqrt{\dfrac{2e\sigma d}{\varepsilon_0 m}}$. Ответ: $A = \dfrac{e\sigma d}{\varepsilon_0}$, $v = \sqrt{\dfrac{2e\sigma d}{m_e}}$.
A, v — ?	

№ 3

Дано:	Решение:
$r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ м	Электростатическое поле протона совершает над электроном следующую работу:
$\lvert e \rvert = \lvert p \rvert = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	
$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Кл^2/Нм^2	$A_р = W_e = -\dfrac{ep}{4\pi\varepsilon_0 r} =$
$A_р$ — ?	

$$= -\frac{\left(1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Кл}\right)^2}{4\pi\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot 5{,}3\cdot 10^{-11}\ \text{м}} \approx 4{,}35 \cdot 10^{-18}\ \text{Дж.}$$

Ответ: $A_р \approx 4{,}35 \cdot 10^{-18}$ Дж.

№ 4

Дано:	Решение:
$W_1 = 6 \cdot 10^{-4}$ Дж	1. Поскольку потенциальная энергия системы двух заряженных частиц выражается формулой:
$r_1 = \frac{1}{3} r_2$	
$q, Q = \text{const}$	$W = \dfrac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r}$, то $W_2 = \dfrac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r 3r} = \dfrac{1}{3} W_1 =$
W_2, A — ?	

$= \dfrac{1}{3}\cdot 6\cdot 10^{-14}$ Дж $= 2 \cdot 10^{-4}$ Дж.

2. Работа сил электростатического поля равна:

$A = W_2 - W_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ Дж $- 6 \cdot 10^{-4}$ Дж $= -4 \cdot 10^{-4}$ Дж.

Ответ: $W_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ Дж, $A = -4 \cdot 10^{-4}$ Дж.

№ 5

Дано:	Решение:
$q = 1$ мкКл	Работа электростатического поля равна разности потенциальных энергий заряда q:
$r_1 = 5$ см	
$r_2 = 9$ см	$A = W_2 - W_1 = = \dfrac{Q\cdot q}{4\pi\varepsilon_0 r_2} - \dfrac{Q\cdot q}{4\pi\varepsilon_0 r_1} = \dfrac{Q\cdot q\left(r_1 - r_2\right)}{4\pi\varepsilon_0 r_1 r_2}$,
$A = -0{,}4$ Дж	
Q — ?	поэтому:

$$Q = \frac{4\pi\varepsilon_0 A r_1 r_2}{q\left(r_1 - r_2\right)} = \frac{4\cdot\pi\left(-0{,}4\text{Дж}\right)\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \text{Кл}^2/(\text{Н}\cdot\text{м}^2)\cdot 5\cdot 10^{-2}\,\text{м}\cdot 9\cdot 10^{-2}\,\text{м}}{10^{-6}\ \text{Кл}\left(5\cdot 10^{-2}\,\text{м} - 9\cdot 10^{-2}\,\text{м}\right)} \approx$$

$\approx 5\cdot 10^{-6}$ Кл $= 5$мкКл.

Ответ: $Q = 5$мкКл. .

§ 83.Потенциал электростатического поля

ВОПРОСЫ

1. Величина, равная отношению потенциальной энергии взаимодействия *W* электростатического поля к пробному заряду *q,* обладающему этой энергией, называется потенциалом электростатического поля:

$$\varphi = W/q.$$

Потенциал является энергетической характеристикой поля.

Потенциал измеряется в вольтах (1 В).

2. Потенциал, который создан точечным зарядом, обратно пропорционален расстоянию до заряда.

3. Поверхность называется эквипотенциальной, если во всех ее точках потенциал одинаков.

4. Линии напряженности направлены от эквипотенциальной поверхности с большим потенциалом к поверхности с меньшим потенциалом, линии перпендикулярны поверхности.

5. Напряжением (разностью потенциалов) между двумя точками называется величина, которая численно равна работе электростатического поля по перемещению положительного единичного заряда из начальной точки в конечную. Разность потенциалов однородного электрического поля равна:

$U = Ed\cos\alpha$, где α — угол между E и d.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ м $p = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\lvert e\rvert = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл φ_p, E_e — ?	1) потенциал точечного заряда рассчитывается по формуле: $\varphi = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} = \dfrac{p}{4\pi\varepsilon_0 r} = \dfrac{1{,}6\cdot10^{-19}\,\text{Кл}}{4\pi\cdot8{,}85\cdot10^{-12}\,\dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot5{,}3\cdot10^{-11}\,\text{м}} \approx 27{,}16\,\text{В}.$

2) потенциальная энергия электрона равна:

$E_p = e\varphi = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\cdot$ 27,16 В $\approx -4{,}35\ 10^{-18}$ Дж.

Ответ: $\varphi_p \approx 27{,}16$ В; $E_p = -4{,}35 \cdot 10^{-18}$ Дж

№ 2

Дано:	Решение:
d; σ; ε_0	Разность потенциалов (напряжение) определяется по формуле: $\Delta\varphi = Ed$, но, поскольку:
$\Delta\varphi$ — ?	$E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$, то $\Delta\varphi = \dfrac{\sigma d}{\varepsilon_0}$.
	Ответ: $\Delta\varphi = \dfrac{\sigma d}{\varepsilon_0}$.

№ 3

Дано:	Решение:
$\varphi_1 = 125$ В	Работа поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2 равна:
$\varphi_2 = 75$ В	$A = q\,(\varphi_1 - \varphi_2) \Rightarrow q = \dfrac{A}{\varphi_1 - \varphi_2} =$
$A = 1$ мДж	$= \dfrac{10^{-3}\text{Дж}}{125\text{В} - 75\text{В}} = 2\ 10^{-5}$ Кл = 20 мкКл.
q — ?	Ответ: $q = 20$ мкКл

№ 4

Дано:	Решение:
$U = 10$кВ	работа поля по перемещению электрона от катода к аноду пойдет на сообщение электрону кинетической энергии:
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг	
$\lvert e\rvert = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	
V — ?	

$$A = U\lvert e\rvert = \frac{m_e V^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2U\lvert e\rvert}{m_e}} = \sqrt{\frac{2\cdot 10^4\,\text{В}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}\,\text{Кл}}{9{,}1\cdot 10^{-31}\,\text{кг}}} \approx 5{,}91\ 10^7\ \text{м/с}.$$

Ответ: $V \approx 5{,}91\ 10^7$ м/с.

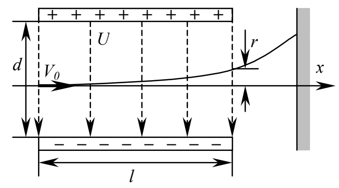
№ 5

Дано:	Решение:
$V_0 = 6\cdot 10^7$ м/с	За все время $t = l\,/V_0$, которое электрон пролетает между пластинами, на него действует сила: $F = \lvert e\rvert E$. Зная, что $U = Ed$, запишем выражение для силы:
$l = 5$ см	$$F = \frac{\lvert e\rvert \cdot U}{d}.$$
$d = 2$ см	
$U = 650$кВ	
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг	
$\lvert e\rvert = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	
r — ?	

Согласно второму закону Ньютона, эта сила сообщает электрону ускорение:

$$a = \frac{|e| \cdot U}{d \cdot m_e}.$$

Поскольку изначально электроны не обладают вертикальной скоростью, из кинематической формулы определим r:



$$\frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{|e| \cdot U \cdot l^2}{2d \cdot m_e \cdot V_0^2} =$$

$$= \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \cdot 650\ \text{В} \left(5 \cdot 10^{-2}\ \text{м}\right)^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}\,\text{м} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\text{кг} \left(6 \cdot 10^7\,\text{м/с}\right)^2} \approx$$

$$\approx 0{,}002\ \text{м} = 2\ \text{мм}.$$

Ответ: r = 2 мм.

§ 84. Электрическое поле в веществе

ВОПРОСЫ

1. Все вещества по степени мобильности электрических зарядов делят на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Подвижность частиц (заряженных) в веществе определяется строением и расположением атомов вещества.

2. Заряженные частицы называются свободными, они могут перемещаться под действием электрического поля.

Вещество является проводником, если содержащиеся в нем свободные заряды способны перемещаться по всему объему вещества. Например, металлы, растворы кислот, солей и щелочей и многие другие вещества.

3. Заряды разного знака, которые входят в состав атомов или молекул, называются связанными, если они не могут перемещаться отдельно друг от друга под действием электрического поля.

Вещество называется диэлектриком, если все заряды, содержащиеся в нем, являются связанными.

Диэлектрики — очень хорошие изоляторы, потому что они практически не проводят ток (в них нет свободных зарядов). Например, дистиллированная вода, стекла, пластмассы, бензол, масла, слюда, фарфор и многие другие вещества.

4. Вещество называется полупроводником, если содержание в нем свободных зарядов находится в зависимости от внешних условий (температуры, напряженности электрического поля, влияния различных излучений). Например, германий, кремний, многие оксиды, сульфиды, минералы, селен и т.д.

5. Энергия связи электрона с атомом полупроводника меньше, чем с атомом диэлектрика, но больше энергии взаимодействия электрона с атомом проводника.

§ 85. Диэлектрики в электростатическом поле

ВОПРОСЫ

1. Молекулы вещества делят на полярные (в них центры распределения положительного и отрицательного зарядов находятся на некотором расстоянии) и неполярные (в них центры распределения положительного и отрицательного зарядов совпадают).

2. При действии электрического поля на молекулы полярного диэлектрика, расположенные хаотически, они ориентируются по полю.

3. При действии электрического поля на молекулы неполярного диэлектрика в них происходит разделение центров положительного и отрицательного зарядов, и после этого молекулы поворачиваются по полю.

4. Диэлектрик ослабляет внешнее электрическое поле $E_{вн}$ в ε раз в связи с поляризацией, возникающей при повороте. Электрическое поле E в среде рассчитывается по формуле:

$$E = E_{вн}/\varepsilon .$$

Величина ε называется диэлектрической проницаемостью. Она показывает, во сколько раз поле в веществе меньше, чем поле в вакууме.

5. В электростатическом фильтре поляризованная пыль притягивается к заряженным электродам и по достижении некоторой критической массы пыль осыпается с электродов. При этом на выходе электростатического фильтра получается очищенный газ.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_2 = 80$ $R = 6400$ км $Q = -5{,}7 \cdot 10^5$ Кл	Напряженность электрического поля, создаваемого Землей у поверхности равна:
$E_{1,2}$ — ?	$$E = \frac{\lvert Q\rvert}{4\pi\varepsilon_0 R^2}.$$

В диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ε напряженность поля уменьшается:

$$E_\varepsilon = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R^2}.$$

Поэтому:

$$E_1 = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_1 R^2} = \frac{5,7\cdot 10^5\,\text{Кл}}{4\cdot\pi\cdot 1\cdot 8,85\cdot 10^{-12}\,\dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}(6,4\cdot 10^6\,\text{м})^2} \approx 125,2\text{В/м}.$$

$$E_2 = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2 R^2} = = \frac{5,7\cdot 10^5\,\text{Кл}}{4\cdot\pi\cdot 80\cdot 8,85\cdot 10^{-12}\,\dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}(6,4\cdot 10^6\,\text{м})^2} \approx 1,56\text{В/м}.$$

Ответ: $E_1 \approx 125,2$ В/м; $E_2 \approx 1,56$ В/м.

№ 2

Дано:	Решение:
$U_1 = 200$ В $U_2 = 8$ В $\varepsilon_1 = 1$	Так как $U \sim E \sim 1/\varepsilon$, то: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \Rightarrow \varepsilon_2 = \frac{U_1\cdot\varepsilon_1}{U_2} = \frac{200\text{ В}\cdot 1}{8\text{ В}} = 25.$
ε_2 — ?	Ответ: ε_2=25.

№ 3

Дано:	Решение:
$E = 400$ кВ/м $d = 0,5$ см $g = 10$ Н/м $\rho_1 = 11,3\cdot 10^3$ кг/м^3 $\rho_1 = 1,26\cdot 10^3$ кг/м^3	На шарик действуют три силы: сила Архимеда: $F_А = Vg\rho_1$; сила тяжести: $F_т = mg$ и сила со стороны поля: $F_п = qE$. В силу того, что $F_Т = F_А + F_П$, то $qE = mg - \rho_2 gV \Rightarrow$ $\Rightarrow q = \frac{g}{E}(m - \rho_2 V).$
q — ?	Т.к. объем шара $V = \frac{1}{6}\pi d^3$ и $m = \rho V$, то заряд равен

$$q = \frac{\pi d^3 g}{6E}(\rho_1 - \rho_2) = \frac{\pi\cdot 125\cdot 10^{-9}\,\text{м}^3\cdot 10\dfrac{\text{Н}}{\text{кг}}}{6\cdot 4\cdot 10^5\,\text{В/м}}\left(11,3\cdot 10^3\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - 1,26\cdot 10^3\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right) \approx$$

$\approx 1,64\cdot 10^{-9}$ Кл = 1,64 нКл.

Ответ: $q = 1,64$ нКл.

№ 4

Дано:	Решение:
$Q = 1$ мкКл $\varepsilon = 2$ $\sigma = 25$ см^2	$F = Q\dfrac{E}{\varepsilon} = Q\dfrac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$, потому что поверхностная плотность заряда: $\sigma = \dfrac{Q}{S}$, то
F — ?	

$$F = \frac{Q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{10^{-12}\ \text{Кл}^2}{2\cdot 2\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3}\ \text{м}^2} \approx 11{,}3\ \text{Н}.$$

Ответ: $F \approx 11{,}3$ Н.

№ 5

Дано:	Решение:
$\rho_1 = 0{,}8\ \dfrac{\text{г}}{\text{см}^3}$ $\varepsilon_1 = 2$; $\varepsilon_2 = 1$	Угол, на который расходятся шарики, не изменился, поэтому $\dfrac{\rho_1}{\rho_2} = \dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \Rightarrow \rho_2 = \dfrac{\rho_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 800$ кг/м$^3 \cdot 2 =$
ρ_2 — ?	$= 1600$ кг/м^3. Ответ: $\rho_2 = 1600$ кг/м^3.

§ 86. Проводники в электростатическом поле

ВОПРОСЫ

1. Суммарный заряд незаряженного проводника равен нулю.

2. Избыточный заряд при отсутствии внешнего поля распределяется по поверхности проводника.

3. Напряженность внутри проводника в электрическом поле равна нулю.

4. Электрическое поле не проникает внутрь проводника потому что при внесении проводника в электрическое поле оно будет скомпенсировано полем, которое возникает в связи с перемещением свободных зарядов. Электростатическая защита состоит в том, что измерительные приборы помещают в металлические корпуса, чтобы на них не действовали электростатические поля.

5. На ближней к телу стороне сферы возникает противоположный телу заряд, а на дальней — отрицательный, поэтому любое заряженное тело будет притягиваться металлической сферой.

§ 87. Распределение зарядов по поверхности проводника

ВОПРОСЫ

1. Электронейтральный проводник заряжается при соприкосновении с заряженным, потому что с одного проводника на другой перетекают свободные заряды (обычно электроны).

2. При соединении двух проводящих сфер заряд начнет перераспределяться пропорционально их радиусам. Радиус Земли намного больше размеров практически любого обычного тела, поэтому весь заряд уйдет в Землю.

3. Потенциал проводника неизменен, поэтому поверхность заряженного проводника является.

4. Все сферы одинаковы, поэтому на каждой сфере будет заряд $Q/3$.

5. Приведем две незаряженные сферы в контакт и поднесем к ним заряженную. В связи с появлением электромагнитной индукции на одной из этих сфер возникает положительный заряд, а на другой — отрицательный. Теперь раздвинем сферы. При этом на одной сфере будет положительный, а на другой отрицательный заряд.

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:	Решение:
$n = 8$ φ_1, q_1, r_1 φ — ?	После слияния капель заряд большой капли стал равен $Q = 8q$. Объем капли должен быть равен сумме объемов маленьких капель: $\frac{4}{3}\pi R^3 = 8\frac{4}{3}\pi r^3$. $R = 2r$, поэтому $\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{4q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1} = 4\varphi_1$. Ответ: $\varphi = 4\varphi_1$.

№ 2

Дано:	Решение:
$\varphi_1, \varphi_2, R_1, R_2$. φ'_1, φ'_2 — ?	При соединении сфер заряд на них будет перераспределяться до тех пор, пока их потенциалы не сравняются: $\varphi'_1 = \varphi'_2$.

Потенциалы сфер до соединения:

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1};\ \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} \Rightarrow q_1 = \frac{\varphi_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1};\ q_2 = \frac{\varphi_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2}$$

По закону сохранения заряда $q_1 + q_2 = q_1' + q_2'$, тогда $\frac{\varphi_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \frac{\varphi_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} = \frac{\varphi_1'}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \frac{\varphi_1'}{4\pi\varepsilon_0 R_2}$. Поскольку $4\pi\varepsilon_0 \neq 0$, можно на это число каждое число поделить: $\frac{\varphi_1}{R_1} + \frac{\varphi_2}{R_2} = \frac{\varphi_1'}{R_1} + \frac{\varphi_1'}{R_2}$. Так как $\varphi'_1 = \varphi'_2$; $\frac{\varphi_1 R_2 + \varphi_2 R_1}{R_1 R_2} = \frac{\varphi_1'(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$ откуда получаем, что

$\varphi'_1 = \varphi'_2 = \frac{\varphi_1 R_2 + \varphi_2 R_1}{R_1 + R_2}$. Ответ: $\varphi' = \frac{\varphi_1 R_2 + \varphi_2 R_1}{R_1 + R_2}$

№ 3

Дано:	Решение:
S, Q, d_1, $d = d_1/3$	Без пластины напряженность поля равна $E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Qd_1}{\varepsilon_0 S}$, а разность потенциалов:
φ — ?	

$\varphi_1 = Ed_1 = \frac{Qd_1}{S\varepsilon_0}$. С пластиной напряжение уменьшилось в 2/3 раза (потому что $d = d_1/3$): $\varphi = 2/3\varphi_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{Qd_1}{S\varepsilon_0} = \frac{2Qd_1}{3S\varepsilon_0}$.

Ответ: $\varphi = \frac{2Qd_1}{3S\varepsilon_0}$.

№ 4

Дано:	Решение:
$R_1 = 2$ см $= 2 \cdot 10^{-2}$м $R_2 = 3$ см $= 3 \cdot 10^{-2}$м $R_3 = 4$ см $=4 \cdot 10^{-2}$м $Q = 4$ мкКл $= 4 \cdot 10^{-6}$м	По принципу распределения зарядов на внутренней и внешней поверхности сферической оболочки мы получим: $Q = Q_2 = Q_3$.
σ_2, σ_3 — ?	Так как $\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2}$, то

$$\sigma_2 = \frac{Q}{4\pi R_2^2} = \frac{4 \cdot 10^{-6}\ \text{Кл}}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2} \approx 3{,}54 \cdot 10^{-4}\ \text{Кл/м}^2,$$

$$\sigma_3 = \frac{Q}{4\pi R_3^2} = \frac{4 \cdot 10^{-6}\ \text{Кл}}{4\pi \cdot 16 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2} \approx 2 \cdot 10^{-4}\ \text{Кл/м}^2.$$

Ответ: $\sigma_2 \approx 3{,}54 \cdot 10^{-4}$ Кл/м^2, $\sigma_3 \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Кл/м^2.

№ 5

Дано:	Решение:
$S = 900$ см^2 $E = 4 \cdot 10^5$ В/м Q — ?	Воспользуемся формулой: $E = \dfrac{Q}{S\varepsilon_0} \Rightarrow Q = \varepsilon_0 ES =$ $= 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \dfrac{\text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 4 \cdot 10^5\ \dfrac{\text{В}}{\text{м}} \cdot 9 \cdot 10^{-2}\ \text{м}^2 \approx$ $\approx 3{,}19 \cdot 10^{-7}$ Кл. Ответ: $Q \approx 3{,}19 \cdot 10^{-7}$ Кл.

§ 88.Электроемкость уединенного проводника

ВОПРОСЫ

1. Масса жидкости ведет себя как электрический заряд, поскольку, если мы соединим два сосуда с жидкостью, то она перетечет из одного сосуда в другой, но общая масса жидкости при этом остается постоянной.

2. Давление жидкости ведет себя как электрический потенциал, потому что, если мы соединим два сосуда с жидкостью, то она будет перетекать из сосуда с большим давлением в сосуд с меньшим давлением.

3. Отношение заряда уединенного проводника к потенциалу этого проводника называется электрической емкостью C уединенного проводника:

$$C = Q/\varphi.$$

Электроемкость измеряется в фарадах (1 Ф).

4. Потенциал сферы пропорционален ее заряду, следовательно, ее электроемкость не зависит от заряда.

5. Большой заряд не может удерживаться на сфере малого радиуса, потому что в этом случае потенциал сферы станет очень большим, и заряд начнет стекать с нее.

§ 89.Электроемкость конденсатора

ВОПРОСЫ

1. Система из двух проводников, имеющих противоположные по знаку и равные по модулю заряды называется конденсатором.

Емкостью конденсатора называется отношение заряда (модуля) одного из проводников к напряжению U между проводниками:

$$C = Q/U.$$

2. Емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна плоскости пластин и обратно пропорционально расстоянию между ними.

3. Введение диэлектрика в конденсатор увеличивает значение его емкости, поскольку электроемкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, которая заполняет пространство между пластинами конденсатора.

4. Если ввести в конденсатор диэлектрик с проницаемостью среды ε, то его емкость увеличивается в ε раз.

5. Электроемкость конденсатора не зависит от внешних электростатических полей так как это его внутренняя характеристика, определяемая только параметрами конденсатора.

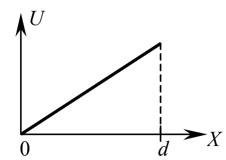
ЗАДАЧИ

№ 1.

Дано:	Решение:
$U = 200$ В $Q = 6 \cdot 10^{-4}$ Кл	$C = \frac{Q}{U} = \frac{6 \cdot 10^{-4}\ \text{Кл}}{200\ \text{В}} = 3 \cdot 10^{-6}$ Ф $= 3$ мкФ.
C — ?	Ответ: $C = 3$ мкФ.

№ 2

Смотри рисунок.



№ 3

Дано:	Решение:
$C = 1$ пФ $d = 0{,}5$ мм $\varepsilon_1 = 1$ $\varepsilon_2 = 7$	Емкость плоского конденсатора определяется по формуле: $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \Rightarrow S = \frac{Cd}{\varepsilon\varepsilon_0}$
S_1, S_2 — ?	$S_1 = \frac{Cd}{\varepsilon_1\varepsilon_0} = \frac{10^{-12}\ \Phi \cdot 5 \cdot 10^{-4}\ \text{м}}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}} \approx 56{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2 = 56{,}5\ \text{мм}^2.$

$$S_2 = \frac{Cd}{\varepsilon_2\varepsilon_0} = \frac{10^{-12}\ \Phi\cdot 5\cdot 10^{-4}\ \text{м}}{8{,}85\cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot 7} \approx 8{,}1\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2 = 8{,}1\ \text{мм}.$$

Ответ: $S_1 = 56{,}5$ мм^2, $S_2 = 8{,}1$ мм^2.

№ 4

Дано:
$C = 12$ пФ
$S = 1$ см^2
$E = 3$ МВ/м
$\varepsilon_1 = 1$
U — ?

Решение:
$U = Ed$. Для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \Rightarrow U = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SE}{C} =$$

$$= \frac{8{,}85\cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot 1\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2\cdot 3\cdot 10^6\ \text{В/м}}{12\cdot 10^{-12}\ \Phi} \approx 220\ \text{В}.$$

Ответ: $U \approx 220$ В.

№ 5.

Дано:
$d_1 = 0{,}7$ мм
$\varepsilon_1 = 7$; $d_2 = 0{,}4$ мм
$\varepsilon_2 = 2$; $S = 1{,}25$ см^2
C — ?

Решение:

$$C = C_1 + C_2;\ C_1 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_0 S}{d_1};\ \ C_2 = \frac{\varepsilon_2\varepsilon_0 S}{d_2};$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 S\left(d_2\varepsilon_1 + d_1\varepsilon_2\right)}{d_1 d_2} =$$

$$= \frac{8{,}85\cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot\left(4\cdot 10^{-4}\ \text{м}\cdot 7 + 7\cdot 10^{-4}\ \text{м}\cdot 2\right)\cdot 1{,}25\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2}{4\cdot 10^{-4}\ \text{м}\cdot 7\cdot 10^{-4}\ \text{м}} \approx$$

$\approx 16{,}6\cdot 10^{-12}$ Ф $= 1{,}66$ пФ. Ответ: $C = 1{,}66$ пФ.

§ 90. Энергия электростатического поля

ВОПРОСЫ

1. Если предоставить их самим себе, то пластины плоского конденсатора будут схлопываются из-за того, что на них находятся заряды противоположного знака, которые притягиваются под действием кулоновских сил.

2. Энергия электростатического поля, которая запасена конденсатором, зависит от емкости конденсатора, а также от заряда, запасенного на каждой пластине.

3. Отношение энергии поля в объеме к величине этого объема называется объемной плотностью энергии электростатического поля w: $w = W/V$.

4. Объемная плотность энергии электростатического поля прямо пропорциональна квадрату напряженности.

5. Например, принцип действия фотовспышки. (Запасенная в конденсаторе энергия поля превращается в световую энергию вспышки).

ЗАДАЧИ

№ 1

Дано:
$C = 0{,}1$ мкФ
$U = 220$ В
$W - ?$

Решение:
Энергия заряженного конденсатора равна:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{0{,}1\cdot 10^{-6}\ \text{Ф}\cdot 4\cdot 10^4\ \text{В}}{2} = 2\cdot 10^{-3}\ \text{Дж} = 2\ \text{мДж}.$$

Ответ: $W = 2$ мДж.

№ 2

Дано:
$W = 2$ мДж
$d = 0{,}5$ см
F — ?

Решение:
По формуле: $A = Fd$, $A = W \Rightarrow W = Fd \Rightarrow$

$$F = \frac{W}{d} = \frac{2\cdot 10^{-3}\ \text{Дж}}{5\cdot 10^{-4}\ \text{м}} = 4\ \text{Н}.$$ Ответ: $F = 4$ Н.

№ 3

Дано:
$Q =$const
$C = C_1$
$d_1 = 1/3\ d_2$
A_{12} — ?

Решение:

$$W_2 = \frac{3Q^2}{2C}\left[W \sim d\right],$$ то:

$$A_{12} = W_2 - W_1 = \frac{3Q^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{C}.$$ Ответ: $A_{12} = \frac{Q^2}{c}$

№ 4

Дано:
ε
$C = C_1$
$\Delta C, \Delta W$ — ?

Решение:

$$\Delta C = C_2 - C_1,\ C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d};\ C_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{d};$$

$$C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}(1-\varepsilon) = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}C.\ \Delta W = W_2 - W_1.$$

$$W_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{d};\ W_2 = \frac{\varepsilon_0 SU^2}{d};\quad W_2 - W_1 = \frac{\varepsilon_0 SU^2}{d}(1-\varepsilon) = \frac{Q^2}{2C}(\varepsilon - 1).$$

Ответ: $\Delta C = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}C,\ \Delta W = \frac{Q^2}{2C}(\varepsilon - 1).$

№ 5

Дано:	Решение:
$E = 3 \cdot 10^6$ В/м	Воспользуемся формулой:
$\varepsilon = 1$	
W — ?	$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{1 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2} \cdot 9 \cdot 10^{12}\ \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}}{2} \approx 39{,}8$ Дж/м^3.
	Ответ: $W \approx 39{,}8$ Дж/м^3.