m=Vρ

ЗДРАВСТВУЙ, ШКОЛА!

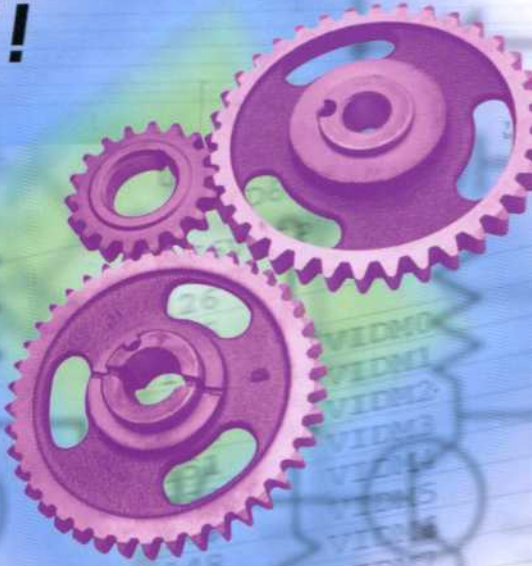
ЭКСПРЕСС-КУРС ФИЗИКИ

для школьников
абитуриентов
студентов

E=mc²

F=ma

СДАЕМ ЭКЗАМЕНЫ НА "ПЯТЬ"!



F=ma

Серия «Здравствуй, школа!»

С. Г. Хорошавина

ЭКСПРЕСС-КУРС ФИЗИКИ

для школьников, абитуриентов, студентов

Издание четвертое, переработанное и дополненное

Ростов-на-Дону
«Феникс»
2011

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
КТК 444
Х82

Светлана Георгиевна Хорошавина
Кандидат технических наук,
автор более 80 научных работ, 7 учебников

Хорошавина С. Г.

Х82 Экспресс-курс физики для школьников, абитуриентов, студентов / С. Г. Хорошавина. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — Ростов н/Д : Феникс, 2011. — 479 с. : ил. — (Здравствуй, школа!)

ISBN 978-5-222-18721-0

Данное справочно-методическое пособие является результатом переработки ранее изданного автором «Справочника по физике» (2002 г.) и «Экспресс-курса по физике» (2005, 2008, 2010 гг.), внесения исправлений и учета новых вопросов, появляющихся в тестовых заданиях централизованного тестирования и ЕГЭ, материал расширен задачами последних тестовых заданий 2010 года.

Справочное пособие по физике предназначено для самостоятельной подготовки школьников и абитуриентов к единому государственному экзамену (ЕГЭ) и к централизованному тестированию по физике, включающему в себя итоговую аттестацию и вступительные экзамены в вузы, а также в помощь преподавателям, использующим в своей работе тестовый контроль знаний.

Представленный материал в краткой и доступной форме полностью отражает все вопросы программы по физике средней школы и программы для поступления в вузы.

Изложены основные законы, формулы, определения, представлены решения наиболее сложных тестовых заданий 1996–2010 гг., предложены варианты задач для самостоятельного решения.

В конце учебника приведены основные формулы и константы, таблицы с единицами физических величин и их размерностей.

УДК 373.167.1:53
ISBN 978-5-222-18721-0 ББК 22.3я721

Учебное издание
ХОРОШАВИНА Светлана Георгиевна, кандидат технических наук

ЭКСПРЕСС-КУРС ФИЗИКИ
ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ, АБИТУРИЕНТОВ, СТУДЕНТОВ

Ответственный редактор *Оксана Морозова*
Технический редактор *Галина Логвинова*
Корректоры *Светлана Кондратенко, Ольга Подопригорина*

Подписано в печать 22.04.2011. Формат 84x108 1/32.
Бумага типографская. Тираж 2 500 экз. Заказ № 229.

ООО «Феникс».
344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ЗАО «Книга».
344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Советская, 57.

Качество печати соответствует предоставленным диапозитивам.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие предназначено для самостоятельной подготовки школьников и абитуриентов к единому государственному экзамену (ЕГЭ) и к централизованному тестированию по физике, включающему в себя итоговую аттестацию и вступительные экзамены в вузы, а также в помощь преподавателям и методистам, использующим в своей работе тестовые способы контроля знаний учащихся.

Представленный в справочнике материал в краткой и доступной форме отражает все вопросы программы по физике средней школы и программы для поступления в вузы, с учетом их уточнений и добавлений.

Физика наряду с математическим и технологическим образованием обеспечивает всестороннее развитие личности, обеспечивая усвоение учащимися основ науки, развитие мыслительных и творческих способностей, формируя научное мировоззрение. Изучение физики является средством, помогающим освоить ту часть человеческой культуры, которая во многом определяет лицо современной цивилизации.

Специфика ЕГЭ и централизованного тестирования, а также вступительные экзамены в этих двух формах требуют глубоких знаний основ теоретического материала, развитого логического мышления, умения сравнивать полученные результаты и делать правильные выводы.

Всё это учитывается в предлагаемом справочном пособии.

Основной материал, необходимый для освоения программы по физике, разделен на десять глав, в которых:

- изложены основные вопросы программы по физике;

- представлены основные законы, формулы, определения;
- приведены методические рекомендации к каждому разделу;
- разобраны по 12 разнообразных наиболее сложных задач каждого раздела;
- предложены 13 вариантов задач для самостоятельного решения из контрольных измерительных материалов 1996–2006 годов по 12 задач в каждом варианте;
- предложены 13 вариантов тестов с двенадцатью задачами, представляющие возможность выбрать правильный ответ.

В конце учебника имеются ответы всех представленных тестов, таблицы с единицами физических величин и их размерностей, таблица десятичных приставок к единицам системы СИ, основные формулы и константы.

В начале справочника:

- приведены буквы, используемые для обозначения величин (латинские, греческие, русские);
- дан алгоритм (методика) решения задач;
- рассмотрены некоторые вопросы, связанные с действиями над векторами, так как физика оперирует скалярными и векторными величинами.

Большое внимание в данном справочнике уделено вопросам, рассматриваемым в 7–8-м классах средней школы: это вопросы статики и гидростатики, которые выделены в отдельные главы.

Задания для самостоятельной работы составлены на основании вариантов тестов и задач для ЕГЭ, предлагаемых центром тестирования Минобразования и науки Российской Федерации в 1996–2010 годах.

Справочник снабжен рисунками, которые позволяют наглядно представить изучаемый материал и помочь в его освоении.

Буквы, используемые для обозначения величин

Латинские буквы

ПРОПИСНЫЕ: *A, B, C, D, E, F, K, L, M, N* и т.д. — для обозначения точек, вершин геометрических фигур и т.п. А также: *A* — работа; *B* — магнитная индукция; *C* — электроемкость конденсатора, теплоемкость; *D* — оптическая сила; *E* — напряженность электрического поля, энергия (в электростатике *W*); *F* — сила, фокус, постоянная Фарадея; *K* — Кельвин, кинетическая энергия; *G* — гравитационная постоянная; *H* — высота, напряженность магнитного поля; *I* — сила электрического тока; *L* — индуктивность, длина; *M* — масса, молярная масса; *N* — мощность, сила реакции опоры, число; *O* — центр; *P* — мощность в электродинамике; *Q* — заряд, количество теплоты; *R* — универсальная газовая постоянная, радиус, электрическое сопротивление; *S* — площадь; *T* — период, температура по Кельвину, натяжение нити; *U* — напряжение, внутренняя энергия; *V* — объем; *X* — ось абсцисс; *У* — ось ординат.

СТРОЧНЫЕ: *a* — ускорение, длина; *b* — длина; *c* — скорость света, удельная теплоемкость; *d* — расстояние от предмета до линзы, диаметр; *e* — заряд электрона; *f* — расстояние от линзы до изображения; *g* — ускорение свободного падения; *h* — высота, постоянная Планка; *i, j* — индексы величин в знаках суммы Σ, обозначения углов, плотность тока; *k* — коэффициент упругости, жесткость пружины, постоянная Больцмана; *l* — длина, путь; *m* — масса; m_e — масса электрона, m_p — масса протона, m_n — масса нейтрона; $\vec{n}$ — нормаль; *n* — число, показатель преломления; *p* — давление, импульс; *q* — заряд; *r* — радиус, удельная теплота парообразования; *s* — путь, перемещение; *t* — время; *t* °C — температура по Цельсию; *υ* — скорость.

Греческие буквы

ПРОПИСНЫЕ: Δ — (дельта) — для обозначения разности: ΔE, ΔT, Δm и т.д.).

СТРОЧНЫЕ: α — (альфа), β — (бета), γ — (гамма), θ — (тета), φ — (фи) — для обозначения углов; угловой путь; θ — (тета) — температура, установившаяся в результате теплообмена; краевой угол; ε — (эпсилон) — диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная; η — (эта) — коэффициент полезного действия; λ — (лямбда) — длина волны, удельная теплота плавления; μ — (мю) — коэффициент трения, магнитная проницаемость; μ_0 — магнитная постоянная; ν — (ню) — частота; π — (пи) — число 3,14; ρ — (ро) — плотность, удельное сопротивление; σ — (сигма) — напряжение в материале, коэффициент поверхностного натяжения, поверхностная плотность заряда; τ — (тау) — время; ω — (омега) — круговая или циклическая частота, угловая скорость; χ — (хи) — химический эквивалент.

Русские буквы

ПРОПИСНЫЕ: *А, Б, В, Г* и т.д. — для обозначения точек.

Единицы величин: А — *Ампер;* В — *Вольт;* Дж — *Джоуль;* Вт — *Ватт;* Гц — *Герц;* К — *Кельвин;* Кл — *Кулон;* Гн — *Генри;* Н — *Ньютон;* Па — *Паскаль;* Ф — *Фарад;* Тл — *Тесла;* Ом.

СТРОЧНЫЕ:

Единицы величин: кг — *масса;* с — *секунда;* м — *метр;* см — *сантиметр;* км — *километр;* рад — *радиан;* т — *тонна;* мин — *минута;* ч — *час;* л — *литр;* эВ — электрон-Вольт.

ПРИСТАВКИ: с — *санти* (см), к — *кило* (км), м — *милли* (мм), М — *Мега* (МВ, МДж), мк — *микро* (мкм), н — *нано* (нм), пк — *пико* (пкФ); Г — *Гига* (ГГц).

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ

При решении задач по физике следует придерживаться такой последовательности:

1. Внимательно прочитать условие задачи и уяснить, какой именно физический процесс или явление в ней описывается.

2. ***Полностью*** записать условие задачи ***в столбик***, включая необходимые константы, используя общепринятые обозначения.

3. Сформулировать и записать вопрос задачи, при этом учитывать, что если в задаче спрашивается:

- как изменится искомая величина, то нужно вопрос представить в виде отношения: $\frac{X_2}{X_1}$ – ?, а когда будет получен ответ, записать, какая величина больше и во сколько раз, например: $X_2 = 3X_1$;
- на сколько изменится искомая величина, вопрос записывается: ΔX – ?

4. Перевести данные в систему СИ.

5. Сделать сопроводительный чертеж или схему, поясняющие задачу.

6. Начать решать задачу можно:

- с вопроса задачи;
- с записи основного закона, которому посвящена данная задача;
- если в задаче дан КПД, то с записи КПД.

7. Используя физические законы и формулы, решить задачу в общем виде, не делая промежуточных вычислений, то есть получить конечную формулу в буквенном выражении.

8. Сделать проверку по размерности, одновременно проверив правильность полученной формулы: подставить в полученную формулу единицы измерения всех входящих в

нее величин в системе СИ, произвести над ними соответствующие действия и получить в результате правильную единицу измерения искомой величины.

9. Подставить в полученную формулу значения всех заданных величин, выраженных в системе СИ, произвести расчет, используя калькулятор. Точность полученного результата не должна превышать точности исходных данных задачи.

10. Оценить ответ на физическую реальность.

ИНСТРУКЦИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЕГЭ ПО ФИЗИКЕ

Экзаменационная работа по физике содержит 3 части: А, В и С. Решения задач в части А и В аналогично решению тестовых вариантов. Задания С1–С5 требуют развернутого ответа, включающего:

- название законов;
- ссылки на определения физических величин, соответствующих используемым уравнениям и формулам.

Для выполнения заданий ЕГЭ необходимо:

1. Провести предварительное решение всех заданий на черновике, чтобы при записи в бланке ответов решение уместилось примерно на половине страницы бланка.

2. Снабдить решение схематическим рисунком, поясняющим данную задачу.

3. На чертеже все векторы должны иметь значки векторов, проставлены оси и указаны проекции векторов на оси, а поясняющие формы записи должны быть представлены в векторной и в скалярной формах.

4. Выстроить логический алгоритм решения задачи с поэтапным указанием применения законов и определяющих положений (стараться не совмещать этапы решения).

5. Произвести все необходимые преобразования, устанавливающие связи между величинами.

6. Получить конечную формулу для искомой величины.

7. Используя приведенные в начальной части задания константы, произвести математические расчеты, приводящие к конечному результату.

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ТЕСТАМ

При выполнении теста по физике ***разрешено*** пользоваться калькулятором.

Во всех тестовых заданиях, ***если специально не оговорено в условии***, сопротивлением воздуха при движении тел следует пренебречь.

Для решения задач в виде тестов необходимо:

1. Приобрести навыки правильной записи условия задачи, с учетом правильного выбора обозначения заданных величин.

2. Научиться находить проекции векторных величин и учитывать знак проекций: если направление вектора совпадает с выбранной осью — положительный, если нет — отрицательный.

3. Учитывать то, что в условии задачи могут быть даны лишние величины, которые при решении не будут использованы или их использование приведет к неверному ответу.

4. Хорошо знать размерности изучаемых величин (процент задач на преобразование размерностей велик).

5. Решив предлагаемые в тесте задачи, нужно выбрать один из предложенных вариантов ответов, затем заполнить таблицу, поставив в нее номер правильного ответа.

6. При выборе ответа быть предельно внимательным: сравнить полученный ответ со ***всеми*** вариантами ответов, а не останавливаться на первом, так как последующие ответы могут быть более развернутыми.

ВЕКТОРЫ

Физика оперирует скалярными и векторными величинами.

Вектор — это величина, определяемая не только численным значением, но и направлением в пространстве, например, векторами являются сила $\vec{F}$, скорость $\vec{v}$, ускорение $\vec{a}$ и т.д.

Скаляр — это величина, определяемая только численным значением, например время t, масса m, путь l.

ДЕЙСТВИЯ С ВЕКТОРАМИ

1. ***Сложение векторов***

а) векторы направлены в одну сторону (рис. 1):

В векторном виде результирующий вектор:

$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$;

в скалярном виде:

$R = F_1 + F_2$.

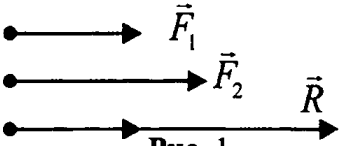


Рис. 1

б) векторы направлены в противоположные стороны (рис. 2):

в векторном виде:

$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$;

в скалярном виде:

$R = F_2 - F_1$.

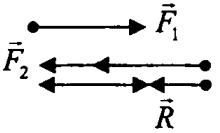


Рис. 2

в) сложение векторов, направленных под углом друг к другу (рис. 3), осуществляется по правилу параллелограмма или треугольника.

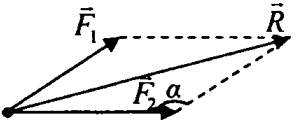


Рис. 3

В векторном виде результирующий вектор:

$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

В скалярном виде для нахождения R необходимо воспользоваться ***теоремой косинусов***: квадрат стороны, лежащей против тупого угла, равен сумме квадратов двух других сторон без удвоенного произведения этих сторон на косинус тупого угла:

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\alpha,$$

где α — тупой угол между вектором $\vec{F}_1$ и перенесенным в конец вектора $\vec{F}_1$ вектором $\vec{F}_2$, а не первоначальный угол между векторами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

В случае, если угол α = 90°, $\cos\alpha = 0$ и теорема косинусов превращается в ***теорему Пифагора***: квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов (рис. 4):

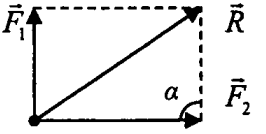


Рис. 4

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2,$$

2. ***Разложение вектора на составляющие***

Разложение вектора на составляющие осуществляется по правилу параллелограмма: разлагаемый вектор является диагональю, а результирующие векторы — сторонами. В частном случае разложение вектора по двум взаимноперпендикулярным направлениям превращает параллелограмм в прямоугольник. Разложив вектор $\vec{F}$ на составляющие по координатным осям X и $У$ (рис. 5), получаем два вектора: $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$, модули которых: $F_x = F\cos\alpha$; $F_y = F\sin\alpha$.

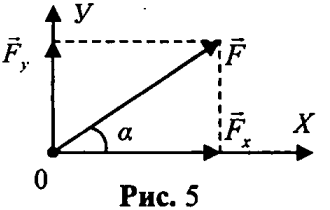


Рис. 5

3. *Проекции векторов на оси*

Проекции векторов на оси ***всегда скаляры*** (рис. 6) ⇒ рисунок 6 отличается от рисунка 5 отсутствием значков векторов и стрелок на осях:

$F_x = F\cos\alpha$; $F_y = F\sin\alpha$.

Если направление вектора совпадает с направлением оси, проекция положительна, если нет — отрицательна.

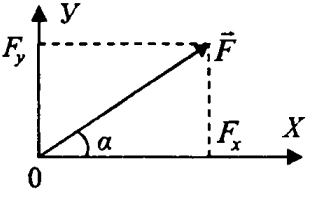


Рис. 6

ГЛАВА 1. МЕХАНИКА

Программа по кинематике содержит следующие вопросы:

Механическое движение. Относительность движения. Система отсчета. Материальная точка. Траектория. Путь и перемещение. Мгновенная и средняя скорость. Ускорение.

Равномерное и равноускоренное прямолинейное движение. Относительность движения. Сложение скоростей. Графическое представление движения. Графики зависимости кинематических величин от времени при равномерном и равноускоренном движении. Свободное падение тел. Ускорение свободного падения. Уравнение прямолинейного равноускоренного движения.

Криволинейное движение точки на примере движения по окружности с постоянной по модулю скоростью. Ускорение при равномерном движении тел по окружности (центростремительное ускорение).

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Механика — это раздел физики, изучающий механическое движение.

Механическое движение — это перемещение тела в пространстве с течением времени.

Механика подразделяется на кинематику, динамику и статику.

Кинематика — это раздел механики, изучающий механическое движение без учета причин, это движение вызвавших. Здесь не рассматриваются ни действующие силы, ни действующие массы.

Динамика — это раздел механики, изучающий механическое движение с учетом причин, это движение вызвавших. Здесь уже рассматриваются действующие силы и действующие массы.

Статика — это раздел механики, изучающий равновесие тел.

1.1. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Абсолютно твердое тело — это такое тело, взаимное расположение частиц которого при движении не меняется.

Часто, рассматривая движение тела, можно пренебречь его размерами и особенностями формы. В таких случаях движение абсолютно твердого тела можно заменить изучением движения материальной точки.

Материальной точкой называется тело, размерами которого ***в данной задаче*** можно пренебречь.

Положение тела в пространстве определяется только относительно других тел. Поэтому, когда идет речь о движении, то имеется в виду относительное движение и вводится система отсчета.

Система отсчета — это совокупность тела отсчета, системы координат и способа измерения времени.

Тело отсчета — это тело, ***условно*** принятое за неподвижное.

Если движение происходит в пространстве, то выбирается прямоугольная система координат, представляющая собой совокупность трех взаимно перпендикулярных осей: OX, OY, OZ (рис. 7, а), если изучаемое движение происходит в одной плоскости, то достаточно двух координатных осей: OX и OY (рис. 7, б), если тело движется вдоль прямой, то достаточно одной оси координат: OX, OY или OZ (рис. 7, в).

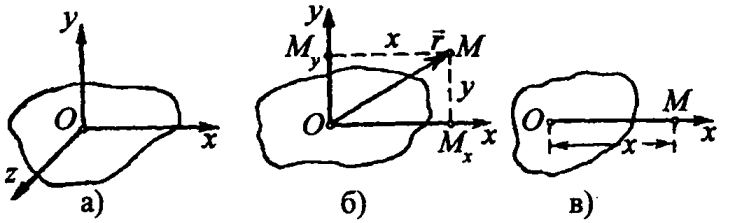


Рис. 7

Положение точки в системе отсчета определяется радиус-вектором ОМ ($\vec{r}$).

1.1.1. Параметры механического движения

1. ***Траектория*** — это линия, вдоль которой движется тело.

В зависимости от траектории движение бывает прямолинейным и криволинейным.

Движение, при котором все точки тела движутся по ***одинаковым*** траекториям, называется ***поступательным***.

2. ***Перемещение*** $\vec{s}$ — вектор, соединяющий начало и конец движения. $[s]$ = м.

Перемещение ***может быть отрицательным*** и ***обращаться в нуль***.

3. ***Пройденный путь*** l — это скалярная величина, численно равная длине траектории, пройденной телом за данный промежуток времени.

$[l]$ = м.

Пройденный путь все время суммируется, поэтому он ***не может быть отрицательным и обращаться в нуль***.

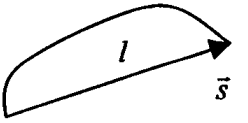


Рис. 8

В случае прямолинейного движения путь и перемещение совпадают по величине в отличие от криволинейного (рис. 8).

Рисунок 9 иллюстрирует различие пути и перемещения. Если человек стоит на автобусной остановке и ходит то в одну, то в другую сторону, то путь все время увеличивается, а перемещение дважды обращается в нуль.

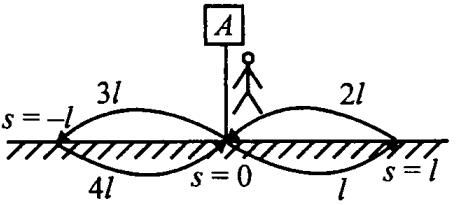


Рис. 9

4. ***Скорость*** — векторная величина, характеризующая направление и быстроту перемещения материальной точки и численно равная:

$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}, \ [\upsilon] = \frac{м}{с}.$$

Если скорость представлена в $\frac{км}{ч}$, то для перевода ее в СИ нужно ее величину разделить на 3,6:

$$1\frac{км}{ч} = \frac{1000}{3600}\frac{м}{с} = \frac{1}{3,6}\frac{м}{с}.$$

Наиболее часто встречаемые значения скорости:

$36\frac{км}{ч} = 10\frac{м}{с}$	$18\frac{км}{ч} = 5\frac{м}{с}$	$144\frac{км}{ч} = 40\frac{м}{с}$
$72\frac{км}{ч} = 20\frac{м}{с}$	$54\frac{км}{ч} = 15\frac{м}{с}$	$108\frac{км}{ч} = 30\frac{м}{с}$

Скорость является ***мерой*** движения. В зависимости от скорости движение бывает равномерным и равнопеременным.

5. ***Ускорение*** — векторная величина, характеризующая направление и быстроту изменения скорости:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{\upsilon}}{\Delta t}, \ [a] = \frac{м}{с^2}.$$

Ускорение бывает положительным (равноускоренное движение) и отрицательным (равнозамедленное движение).

1.1.2. Прямолинейное равномерное движение

Равномерным прямолинейным движением называется движение, при котором тело за ***любые*** равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Равномерное прямолинейное движение — это движение с постоянной по модулю и направлению скоростью:

$\vec{\upsilon} =$ const.

Основные параметры равномерного ***движения***:

- $\vec{s}$ — вектор перемещения;
- $\vec{\upsilon}$ — вектор скорости;
- l — пройденный путь;
- x — координата;
- t — время.

Для прямолинейного движения модуль перемещения равен пути, пройденному телом.

Уравнением движения называется зависимость от времени пути, перемещения или координаты.

Кинематические уравнения движения записываются в векторном виде, в алгебраической форме через проекции на какую-то избранную ось X или в модульном виде:

- ***уравнение перемещения:***

$\vec{s} = \vec{\upsilon} t$; $s_x = \upsilon_x t$; $s = \upsilon t$;

- ***уравнение пути:***

$l = \upsilon t$;

- ***уравнение координаты:***

$x = x_0 + \upsilon t$,

где x — координата точки в момент времени t;

x_0 — начальная координата.

Графическое представление равномерного движения

На рисунке 10 представлены графики скорости — (а) и координаты — (б) (аналогичным будет график пути) при равномерном движении.

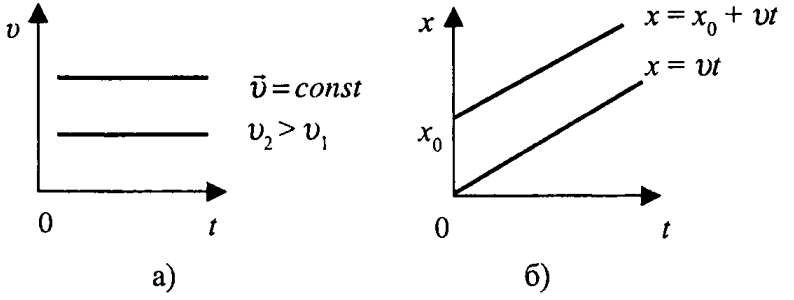


Рис.10

1.1.3. Неравномерное движение

Переменным, или ***неравномерным, движением*** называется движение, при котором скорость тела меняется во времени.

Мгновенная скорость — скорость в данный момент времени (или просто скорость). Мгновенную скорость указывает стрелка спидометра. Вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории движения.

Средняя скорость — скалярная величина, численно равная отношению всего пути $l_{общ}$, пройденного телом за данный промежуток времени $t_{общ}$, к этому промежутку:

$$v_{ср} = \frac{l_{общ}}{t_{общ}}.$$

Средняя скорость указывается на дорожных знаках.

1.1.4. Равнопеременное движение

Равнопеременным, или ***равноускоренным, движением*** называется движение с постоянным по модулю и направлению ускорением:

$\vec{a} = const.$

Если υ_0 — начальная скорость, υ_t — конечная скорость, то при решении задач:

- ***ускорение*** можно рассчитывать по формуле:

$$\vec{a} = \frac{\vec{\upsilon}_t - \vec{\upsilon}_0}{t}, \quad a = \frac{\upsilon_t - \upsilon_0}{t};$$

- ***формула конечной скорости:***

$$\vec{\upsilon}_t = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}t; \quad \upsilon_{tx} = \upsilon_{0x} + a_x t; \quad \upsilon_t = \upsilon_0 + at;$$

- ***средняя скорость*** (только для равноускоренного движения):

$$\upsilon_{cp} = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_t}{2}.$$

Кинематические уравнения равнопеременного движения:

- ***уравнение перемещения:***

$$\vec{s} = \vec{\upsilon}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}; \quad s_x = \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}; \quad s = \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2};$$

- ***уравнение пути:***

$$l = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2};$$

- ***уравнение координаты:***

$$x = x_0 + s_x = x_0 + \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2}.$$

Здесь знак «+» соответствует случаю, когда скорость увеличивается, а движение называют ***равноускоренным.***

Знак «–» соответствует случаю, когда скорость уменьшается — ***равнозамедленное*** движение.

- ***Формула разности квадратов скоростей*** (связывает путь, скорость и ускорение):

$\upsilon_t^2 - \upsilon_0^2 = 2as$ — равноускоренное движение;

$\upsilon_t^2 - \upsilon_0^2 = -2as$ — равнозамедленное движение.

Эта формула применяется, когда в задаче ***не дано время***.

Для прямолинейного движения модуль перемещения равен пути, пройденному телом.

Графическое представление равноускоренного движения

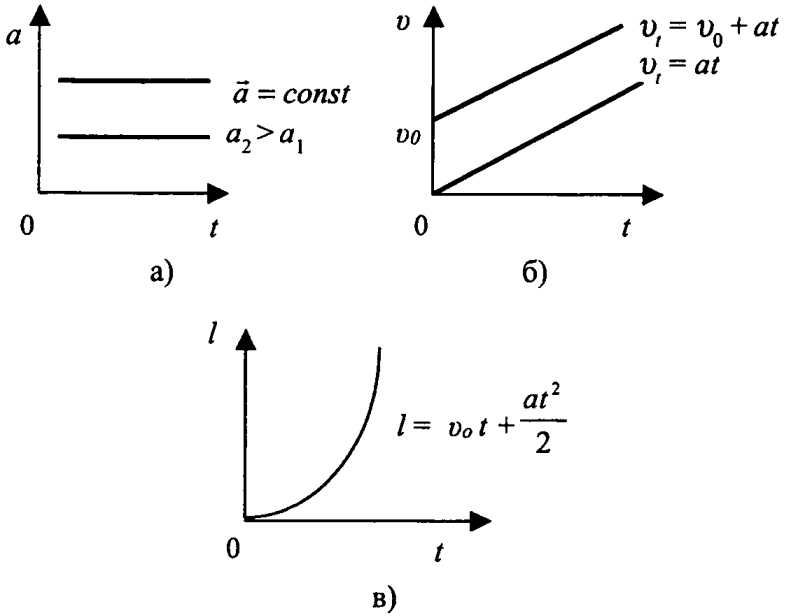


Рис. 11

На рисунке 11 представлены графики зависимости от времени: а) — ускорения; б) — скорости; в) — пути при равноускоренном движении.

Если на графике скорости для равноускоренного движения посчитаем площадь фигуры, ограниченной графиком и осью времени (рис. 12), то:

$$S_{трап} = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_t}{2} t = l \Rightarrow$$

по графику скорости можно определить путь, рассчитав площадь фигуры, образовавшейся между графиком скорости и осью времени.

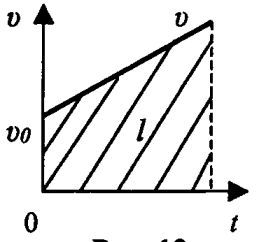


Рис. 12

В кинематике имеет место ***принцип независимости движений***: если тело одновременно участвует в двух движениях, то результирующее перемещение равно векторной сумме перемещений:

$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$.

Закон сложения скоростей: скорость $\vec{\upsilon}$ движения тела относительно неподвижной системы отсчета равна векторной сумме скорости $\vec{\upsilon}_1$ тела относительно неподвижной системы отсчета и скорости $\vec{\upsilon}_2$ самой подвижной системы относительно неподвижной.

Если тело одновременно участвует в двух равномерных движениях по разным направлениям, то результирующая скорость находится по правилу сложения векторов, например, по правилу параллелограмма (рис. 13).

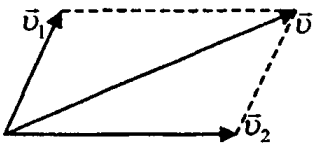


Рис. 13

1.1.5. Свободное падение

Свободное падение — это движение тела в безвоздушном пространстве под действием силы тяжести, то есть по вертикали, с ускорением свободного падения $g = 9{,}8\ \frac{м}{с^2}$,

($g \approx 10\ \frac{м}{с^2}$), направленным к Земле. При этом $\upsilon_o = 0$, h — высота, с которой тело начинает падение, или максимальная высота, на которую поднимается тело, брошенное вертикально вверх (тогда $\upsilon_t = 0$).

Ускорение свободного падения в различных точках Земли различно. Причины различия (рис. 14):

- Земля сплюснута у полюсов и имеет форму не шара, а, скорее, тыквы;
- Земля вращается вокруг своей оси, и все точки, кроме полюсов, обладают цетростремительным ускорением (см. п. 1.1.8), на величину которого g уменьшается по мере перехода от полюса (g_n) к экватору ($g_э$):

$$g_n = 9{,}83\ \frac{м}{с^2},\ g_э = 9{,}78\ \frac{м}{с^2}.$$

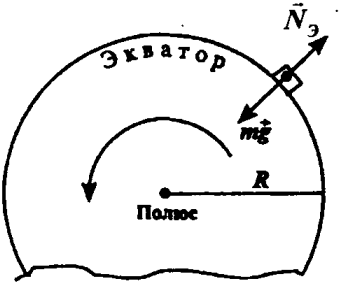


Рис. 14

Равноускоренное движение	Свободное падение $\upsilon_o = 0$, $a \Rightarrow g$; $s \Rightarrow h$	Движение тела, брошенного вертикально вверх ↑
$a = \frac{\upsilon_t - \upsilon_0}{t}$	$g = \frac{\upsilon_t}{t}$	$-g = -\frac{\upsilon_0}{t}$
$\upsilon_t = \upsilon_o + at$	$\upsilon_t = gt$	$-\upsilon_o = -gt$
$s = \upsilon_o t \pm \frac{at^2}{2}$	$h = \frac{gt^2}{2}$	$h = \upsilon_o t - \frac{gt^2}{2}$
$\upsilon_t^2 - \upsilon_o^2 = \pm 2as$	$\upsilon_t^2 = 2gh$	$-\upsilon^2 = -2gh$
	$h_{max} = \frac{\upsilon_t^2}{2g}$	$h_{max} = \frac{\upsilon_0^2}{2g}$

$$\Rightarrow \upsilon_t\downarrow = \upsilon_0\uparrow;\ t\downarrow = t\uparrow$$

Пути, проходимые телом, движущимся с ускорением, в равные, последовательные промежутки времени пропорциональны ряду нечетных чисел:

$s_1 : s_2 : s_3 : \ldots : s_n = 1 : 3 : 5 : \ldots : (2n - 1)$.

Путь, проходимый телом в первую секунду падения, равен половине ускорения свободного падения:

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{9{,}8}{2} \text{ м} = 4{,}9 \text{ м} \approx 5 \text{ м}.$$

1.1.6. Движение тела, брошенного горизонтально

Движение тела, брошенного горизонтально, — криволинейное движение, траектория которого — парабола (рис. 15).

Исходя из принципа независимости движений, сложное движение по параболе можно разложить на два простых:

1) по горизонтали на тело не действуют никакие силы, $\Rightarrow$ оно движется равномерно:

$\vec{\upsilon}_0 = const \Rightarrow s = \upsilon_0 t;$

2) по вертикали:

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

В любой точке траектории:

$$\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2},$$

где $\upsilon_x = \upsilon_0$; $\upsilon_y = gt$.

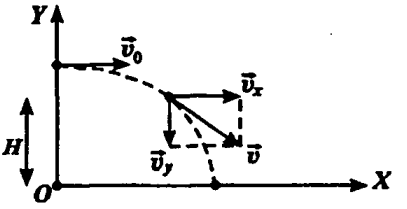


Рис. 15

1.1.7. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Движение тела, брошенного под углом к горизонту, — тоже криволинейное движение, траектория которого — парабола, имеющая две ветви: подъема – I и спуска – II (рис. 16).

Исходя из принципа независимости движений, и в этом случае сложное движение по параболе можно разложить на два простых:

1) по горизонтали на тело не действуют никакие силы $\Rightarrow \vec{\upsilon}_{0x} = const \Rightarrow s = \upsilon_{0x}\, t;\ \upsilon_{0x} = \upsilon_0 \cos\alpha;$

2) по вертикали: $h = \upsilon_{0y} t - \dfrac{gt^2}{2};\ \upsilon_{0y} = \upsilon_0 \sin\alpha;$

Обычно в условии задачи приводятся угол наклона к горизонту и начальная скорость, а определить нужно время, дальность и максимальную высоту полета тела. Этих двух уравнений не достаточно для нахождения трех неизвестных. Поэтому рассмотрим:

3) в момент падения: $h = 0 \Rightarrow \upsilon_{0y} t = \dfrac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \dfrac{2\upsilon_0 \sin\alpha}{g};$

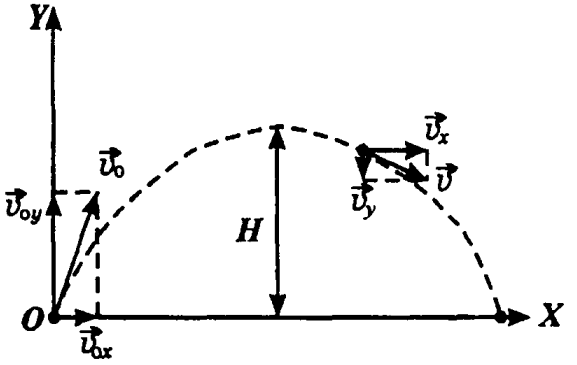


Рис. 16

4) учитывая то, что обе ветви параболы одинаковы, время подъема и время спуска тоже будет одинаково и равно половине времени всего движения:

$$t_{под} = t_{сп} = \frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g} \Rightarrow$$

$$h_{max} = H = \frac{g t_{сп}^{\ 2}}{2} = \frac{\upsilon_0^2 \sin^2\alpha}{2g} = \frac{g t^2}{8}.$$

1.1.8. Вращательное движение

Вращательным называется движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения (рис. 17).

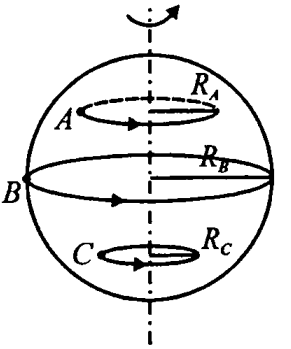


Рис. 17

Параметры вращательного движения:

- s — путь, пройденный точкой по окружности, $[s]$ = м;
- φ — ***угловой путь*** — угол поворота радиус-вектора R:

$$\varphi = \frac{s}{R},\ [\varphi] = рад;$$

- ***частота*** ν — число оборотов n в единицу времени t:

$$\nu = \frac{n}{t},\ [\nu] = c^{-1};$$

- ***период*** T — время одного полного оборота, $[T] = c$. $T \cdot \nu = 1 \Rightarrow$ период и частота — взаимообратимые величины:

$$T = \frac{1}{\nu};\ \nu = \frac{1}{T};$$

- ***угловая скорость*** — угол поворота радиус-вектора в единицу времени:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}, \ [\omega] = \frac{рад}{с} = с^{-1};$$

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

- ***линейная скорость движения точки по окружности:***

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \omega R, \ [\upsilon] = \frac{м}{с}.$$

В любой точке она направлена по касательной к окружности (рис. 18).

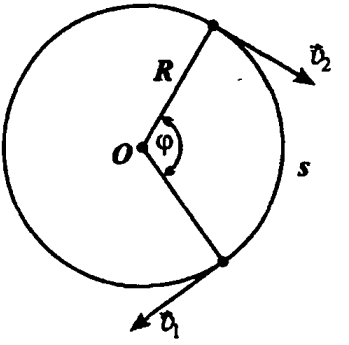


Рис. 18

Равномерным вращательным движением называется движение, при котором $\omega = const$, $\upsilon = const$, а $\vec{\upsilon} \neq const$, так как направление вектора скорости от точки к точке меняется ⇒ появляется ускорение, называемое

- ***центростремительным ускорением*** $a_ц$ (направлено по радиусу к центру окружности), или *нормальным* a_n (направлено перпендикулярно скорости):

$$a_ц = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2 R\nu^2.$$

Указания к решению задач по кинематике

При решении задач данного класса необходимо:

1. Распознать класс, к которому относится данная задача, так как среди разнообразных кинематических задач можно выделить задачи:

- на прямолинейное равномерное движение одной точки и системы точек;
- сложение движений, когда системы отсчета движутся вдоль одной прямой и во взаимно перпендикулярных направлениях;
- прямолинейное равнопеременное движение, когда по начальным условиям определяется последующее состояние точки;
- свободное падение тела в поле силы тяжести;
- равномерное криволинейное движение.

2. Выбрать оптимальную систему отсчета ⇒

- наиболее простым способом определить начальные условия;
- описать движение наиболее простым путем.

3. Определить вид движения вдоль каждой из осей и написать кинематические уравнения движения вдоль каждой оси.

Примеры решения задач

Задача 1.

Два автомобиля движутся прямолинейно в одну сторону с постоянными скоростями υ_1 и υ_2 ($\upsilon_1 > \upsilon_2$), и в некоторый момент времени расстояние между ними равно s. Через сколько времени и в каком месте первый автомобиль догонит второй?

Дано:
υ_1
υ_2
s

t – ?
x_t –?

Решение:

Выбираем систему отсчета с началом в точке 0, за положительное направление оси — направление движения; выбираем за начальный момент времени — (рис. 19) момент t, когда автомобили находились на расстоянии s.

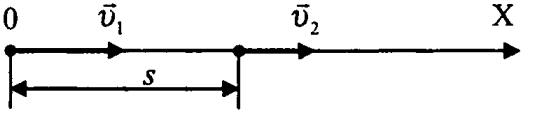


Рис. 19

Оба автомобиля движутся равномерно и прямолинейно ⇒ их движения описываются уравнениями:

$x_1 = x_{01} + \upsilon_1 t;\ x_2 = x_{02} + \upsilon_2 t.$

Начальные координаты:

$x_{01} = 0;\ x_{02} = s \Rightarrow x_1 = \upsilon_1 t;\ x_2 = s + \upsilon_2 t.$

В момент времени $t = t_1$ их координаты были одинаковы:

$$x_1 = x_2 = x_t \Rightarrow x_t = \upsilon_1 t_1;\ x_t = s + \upsilon_2 t_1 \Rightarrow$$

$$t_1 = \frac{s}{\upsilon_1 - \upsilon_2};\ x_t = \frac{\upsilon_1 s}{\upsilon_1 - \upsilon_2}.$$

Ответ: $t_1 = \dfrac{s}{\upsilon_1 - \upsilon_2}$; $x_t = \dfrac{\upsilon_1 s}{\upsilon_1 - \upsilon_2}$.

Задача 2.

Моторная лодка, имеющая в системе отсчета, связанной с водой, скорость 6 $\frac{м}{с}$, должна переправиться через реку по кратчайшему пути. В каком направлении она должна двигаться при переправе, если скорость течения реки 2 $\frac{м}{с}$? Какова скорость лодки относительно земли?

Дано:

$\upsilon_л = 6\frac{м}{с}$

$\upsilon_р = 2\frac{м}{с}$

$\upsilon_{рез} - ?$

$\alpha - ?$

Решение:

Скорость лодки можно найти по теореме Пифагора:

$$\upsilon_{рез} = \sqrt{\upsilon_л^2 - \upsilon_р^2} = 5{,}7\ \frac{м}{с},$$

$$\sin\alpha = \frac{\upsilon_р}{\upsilon_л} = 0{,}33 \Rightarrow \alpha = 19{,}5^\circ \text{ (рис. 20).}$$

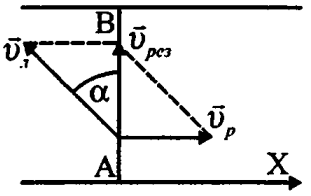


Рис. 20

Если бы в задаче спрашивался курс относительно берега, то он был бы равен дополнительному углу: 70,5°.

Ответ: $\upsilon_{рез} = 5{,}7\ \frac{м}{с}$; $\alpha = 19{,}5^\circ$.

Задача 3.

Движение тела вдоль оси X описывается уравнением: $x = 3 + 2t + t^2$ (м). Чему равна средняя скорость его за вторую секунду?

Дано:

$t' = 2c$

$x = 3 + 2t + t^2$

$\upsilon_{ср} - ?$

Решение:

По виду уравнения можно сказать, что оно описывает равноускоренное движение:

$$x = x_0 + \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2}$$

$$x_0 = 3\ м,\ \upsilon_0 = 2\ \frac{м}{с},\ a = 2\frac{м}{с^2}.$$

Для равноускоренного движения средняя скорость равна:

$$\upsilon_{ср} = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_t}{2} = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{2},$$

где υ_1 и υ_2 соответственно скорости в конце первой и второй секунды:

$$\upsilon_1 = \upsilon_o + at_1 = 2 + 2\cdot 1 = 4\ (\frac{м}{с});$$

$$\upsilon_2 = \upsilon_o + at_2 = 2 + 2\cdot 2 = 6\ (\frac{м}{с}) \Rightarrow \upsilon_{ср} = 5\ \frac{м}{с}.$$

Ответ: $\upsilon_{ср} = 5\ \frac{м}{с}$.

Задача 4.

Чему равен путь, пройденный телом, скорость которого изменяется с течением времени, как показано на рисунке 21?

Решение:

Путь по графику скорости можно рассчитать как площадь фигуры между осью времени и графиком. В данном случае она представляет собой два одинаковых треугольника, квадрат и трапецию ⇒

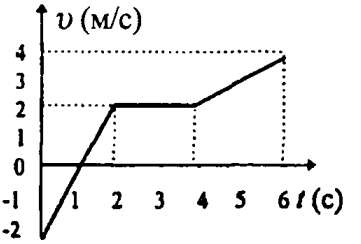


Рис. 21

$$l = 2S_{тр} + S_{кв} + S_{трап} = 2 + 4 + \frac{1}{2}2\cdot(2+4) = 12\ (м).$$

Ответ: $l = 12$ м.

Задача 5.

Чему равно отношение максимальных высот поднятия тел, брошенных под одним и тем же углом к горизонту с начальными скоростями υ_0 и $2\upsilon_0$, над первоначальным уровнем?

Дано:	**Решение:**
υ_0 $2\upsilon_0$	Исходя из принципа независимости движений, сложное движение по параболе можно разложить на два простых:
$\frac{h_1}{h_2}$ – ?	1) по горизонтали (рис. 22):

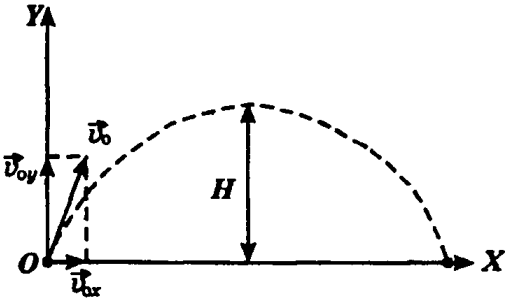


Рис. 22

$\vec{v}_{0x} = const \Rightarrow s = v_{0x}t;\ v_{0x} = v_0 \cos\alpha;$

2) по вертикали:

$$v_{0y} = v_0 \sin\alpha;\ h = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2};$$

3) в момент падения:

$$h = 0 \Rightarrow t = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g};$$

4) время подъема и время спуска тел одинаково и равно половине времени всего движения:

$$t_{под} = t_{сп} = \frac{t}{2} = \frac{v_0 \sin\alpha}{g} \Rightarrow$$

$$h_{max} = H = \frac{gt_{сп}^2}{2} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} \Rightarrow$$

h_{max} прямо пропорциональна квадрату скорости $\Rightarrow$ $h_2 = 4h_1$.

Ответ: $h_2 = 4h_1$.

Задача 6.

Каковы линейная и угловая скорости движения точек земной поверхности на широте Санкт-Петербурга ($\varphi = 60°$) при суточном вращении Земли?

Дано:	СИ
$\varphi = 60°$	
$R = 6400$ км	$= 64 \cdot 10^5$ м
$T = 24$ ч	$= 24 \cdot 36 \cdot 10^2$ с
$\upsilon - ?$ $\omega - ?$	

Решение:

Точка на широте Санкт-Петербурга вращается по окружности радиуса R_1:

$R_1 = R\cos\varphi$ (рис. 23) $\Rightarrow$

$$\upsilon = \frac{2\pi R\cos\varphi}{T} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 64 \cdot 10^5}{2 \cdot 24 \cdot 36 \cdot 10^2} =$$

$$= 233\ (\frac{м}{с}),$$

$$\omega = \frac{\upsilon}{R_1} = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3{,}14}{24 \cdot 36 \cdot 10^2} =$$

$$= 7 \cdot 10^5\ (\frac{рад}{с}).$$

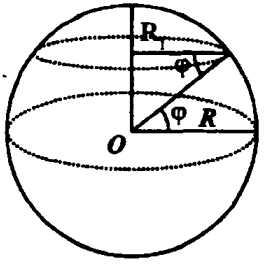


Рис. 23

Ответ: $\upsilon = 230\ \frac{м}{с}$, $\omega = 7 \cdot 10^5\ \frac{рад}{с}$.

Задача 7.

Какой путь пройдет тело, начавшее двигаться равноускоренно из состояния покоя, за восьмую секунду, если за первую секунду оно прошло путь s?

Дано:
$s_1 = s$
$t = 8$ с
$s_8 - ?$

Решение:

Так как тело движется равноускоренно, то пути, проходимые телом в равные, последовательные промежутки времени, пропорциональны ряду нечетных чисел:

$$s_1 : s_2 : s_3 : \ldots : s_n = 1 : 3 : 5 : \ldots : (2n - 1) \Rightarrow$$

$$\frac{s_1}{s_8} = \frac{1}{(2n-1)} = \frac{1}{2 \cdot 8 - 1} = \frac{1}{15} \Rightarrow s_8 = 15\ s.$$

Ответ: $s_8 = 15\ s$.

Задача 8.

Автомобиль движется по прямому шоссе, вдоль которого направлена координатная ось X. Начальная координата автомобиля равна нулю. На рисунке 24 представлен график зависимости проекции скорости x_x автомобиля от времени t. Определите конечную координату автомобиля.

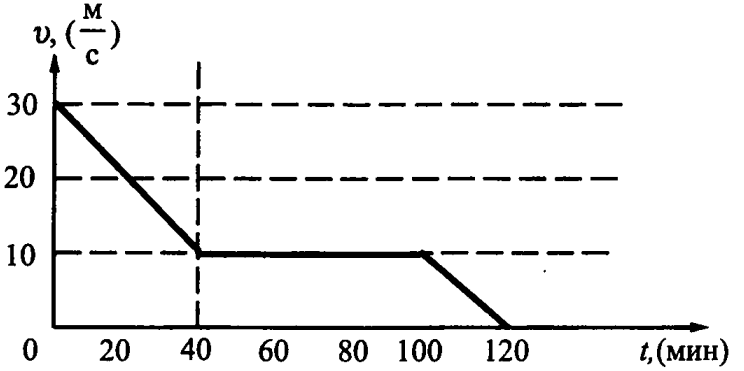


Рис. 24

Решение:

Так как автомобиль движется по ***прямому*** шоссе, вдоль которого направлена координатная ось X, то координата, путь и перемещение совпадают по величине ⇒ путь можно рассчитать как площадь фигуры между осью X и графиком скорости и приравнять его координате, причем время в минутах нужно перевести в секунды:

$$l = S_{трап1} + S_{трап2} = \frac{1}{2}(30 + 10) \cdot 40 \cdot 60 + \frac{1}{2} \cdot [60 \cdot (120 - 40) +$$
$$+ 60 \cdot (100 - 40)] \cdot 10 = 9 \cdot 10^4 \text{ (м)} = 90 \text{ (км)}.$$

Ответ: 90 км.

Задача 9.

Вертикально вверх подбросили шарик. На одной и той же высоте шарик побывал дважды: через 1,5 с и через 3,5 с

после начала движения. Чему равна начальная скорость шарика?

Дано:	Решение:
$t_1 = 1{,}5$ с $t_2 = 3{,}5$ с	Так как на одной и той же высоте шарик побывал дважды с интервалом $\Delta t = 3{,}5 - 1{,}5 = 2$ (с), а время $t\downarrow = t\uparrow$, то время спуска $t\downarrow = 1$с.
$\upsilon_0 - ?$	

Зная, что $\upsilon_0\uparrow = \upsilon_t\downarrow$ можно найти $\upsilon_0\uparrow = \upsilon_t\downarrow = gt = 10\ (\frac{м}{с})$.

Ответ: $10\ \frac{м}{с}$.

Задача 10.

Два велосипедиста едут навстречу друг другу: один из них, имея скорость $18\ \frac{км}{ч}$, поднимается в гору с ускорением $-20\ \frac{см}{с^2}$, а другой, имея скорость $5{,}4\ \frac{км}{ч}$, спускается с горы с ускорением $0{,}2\ \frac{м}{с^2}$. Через сколько времени они встретятся и какое расстояние до встречи прошел каждый, если расстояние между ними в начальный момент равно 130 м?

Дано:	СИ	Решение:
$\upsilon_1 = 18\ \frac{км}{ч}$	$= 5\frac{м}{с}$	Запишем уравнения движения $l = \upsilon_o t \pm \frac{at^2}{2}$ для каждого тела в числовом виде:
$\upsilon_2 = 5{,}4\ \frac{км}{ч}$	$= 1{,}5\frac{м}{с}$	
$a_1 = -20\ \frac{см}{с^2}$	$= -0{,}2\frac{м}{с^2}$	
$a_2 = 0{,}2\frac{м}{с^2}$		
$l = 130$ м		
$l_1 - ?\ l_2 - ?\ t - ?$		

$$\begin{cases} l_1 = 5t - \frac{0{,}2t^2}{2} \\ + \\ l_2 = 1{,}5\,t + \frac{0{,}2t^2}{2}, \end{cases}$$

сложив которые, получим:

$l = 6{,}5t \Rightarrow t = 20$ с;

$$l_1 = 5 \cdot 20 - \frac{0,2 \cdot 20 \cdot 20}{2} = 60 \text{ (м)};$$

$$l_2 = 1,5 \cdot 20 + \frac{0,2 \cdot 20 \cdot 20}{2} = 70 \text{ (м)}.$$

Ответ: $l_1 = 60$ м; $l_2 = 70$ м.

Задача 11.

Колесо катится без проскальзывания с постоянной скоростью по горизонтальному участку дороги. Отношение скорости υ_A точки А на ободе колеса к скорости υ_C точки С на ободе колеса равно (рис. 25):

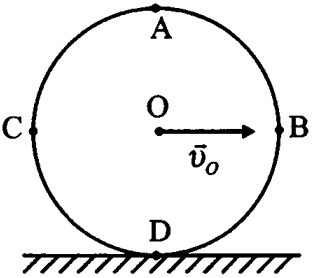


Рис. 25

1) $\frac{1}{2}$; 2) $\frac{1}{\sqrt{2}}$; 3) 1; 4) $\sqrt{2}$; 5) 2.

Решение:

Дано: υ_0

$\frac{\upsilon_A}{\upsilon_C}$ –?

Рассмотрим, чему равны скорости всех точек на ободе колеса: А, В, С, Д, чтобы на примере решания этой задачи получить решение всех аналогичных задач.

Так как колесо катится без проскальзывания, точки на ободе колеса участвуют как в поступательном движении, так и во вращательном. При этом верхняя точка А имеет скорость поступательного движения υ, такую же, как и точки О и Д. Точка Д за счет вращения приобретает еще такую же скорость, но противоположно направленную.

В результате относительно полотна дороги скорость точки Д равна нулю, а скорость точки А равна 2υ: скорость поступательного движения + скорость вращательного (рис. 26).

Точка С участвует в поступательном движении — скорость υ, а по касательной направлена скорость вращательного движения — тоже υ (рис. 27).

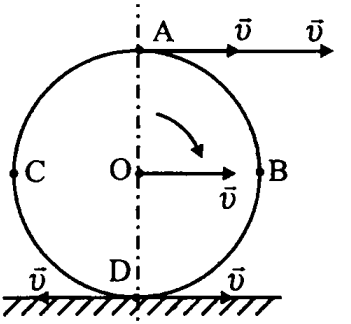


Рис. 26

Сложив эти две скорости по правилу параллелограмма, получаем υ_C — диагональ квадрата:

$$\upsilon_C = \upsilon\sqrt{2}.$$

Тогда $\dfrac{\upsilon_A}{\upsilon_C} = \dfrac{2\upsilon}{\upsilon\sqrt{2}} = \sqrt{2}$.

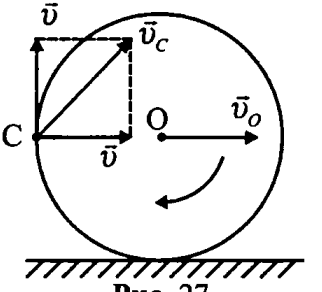


Рис. 27

Скорость точки В, так же, как и скорость точки С, равна

$$\upsilon_B = \upsilon\sqrt{2}.$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ 4.

Ответ: 4.

Задача 12.

Два грузовых автомобиля движутся вдоль одной прямой. Их координаты с течением времени меняются по законам: $x_1(t) = 25t$, $x_2(t) = 280 - 20t$ (в системе СИ). Скорость второго автомобиля относительно первого равна:

1) $-45\ \frac{м}{с}$ 2) $-20\ \frac{м}{с}$ 3) $5\ \frac{м}{с}$ 4) $25\ \frac{м}{с}$ 5) $45\ \frac{м}{с}$

Дано:	**Решение:**
$x_1(t) = 25t$ $x_2(t) = 280 - 20t$	Запишем уравнение координаты для равномерного движения:
$\upsilon_{2,1}$ – ?	$x(t) = x_0 + \upsilon t \Rightarrow$

$$x_{01} = 0\ м,\ \upsilon_1 = 25\ \frac{м}{с},\ x_{02} = 280\ м,\ \upsilon_2 = -20\ \frac{м}{с}.$$

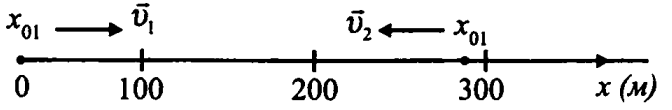


Рис. 28

На рисунке 28 изобразим движение автомобилей. Из рисунка видно, что автомобили движутся навстречу друг другу ⇒ их относительные скорости складываются, но при этом второй автомобиль движется в сторону, противоположную выбранной положительной оси, ⇒ его скорость будет отрицательной ⇒

$$\upsilon_{2,1} = -45\ \frac{м}{с}.$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 1.

Ответ: № 1.

Задача 13.

Вертолет опускается вертикально вниз с некоторой скоростью υ. Когда он находится на высоте $H = 210$ м, от него отделяется груз. Если время падения груза на землю равно 6 с, то скорость υ равна:

1) $5\ \frac{м}{с}$ 2) $6\ \frac{м}{с}$ 3) $8\ \frac{м}{с}$ 4) $10\ \frac{м}{с}$ 5) $16\ \frac{м}{с}$

Дано:

$H = 210$ м

$g = 10\ \frac{м}{с^2}$

$t = 6$ с

$\upsilon - ?$

Решение:

Запишем уравнение для высоты:

$$H = \upsilon_0 t + \frac{gt^2}{2} \Rightarrow \upsilon = \frac{H}{t} - \frac{gt^2}{2} =$$

$$= \frac{210}{6} - \frac{10 \cdot 6}{2} = 35 - 30 = 5\ (\frac{м}{с}).$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 1.

Ответ: № 1.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 1

Задача 1.

Первую половину пути человек шел со скоростью $5\ \frac{км}{ч}$, а вторую — бежал со скоростью $10\ \frac{км}{ч}$. Определить среднюю скорость человека на всем пути.

Ответ: $6{,}7\ \frac{км}{ч}$.

Задача 2.

За первую половину времени равноускоренного прямолинейного движения от остановки автомобиль проехал $S = 100$ м. Какой путь он проехал за вторую половину времени?

Ответ: 300 м.

Задача 3.

По двум параллельным путям равномерно движутся два поезда: грузовой длиной 630 м со скоростью $48\ \frac{км}{ч}$ и пассажирский длиной 120 м со скоростью $102\ \frac{км}{ч}$. Какова относительная скорость движения поездов, если они движутся в одном направлении? В противоположных направлениях? В течение какого времени один поезд проходит мимо другого?

Ответ: $54\ \frac{км}{ч}$; $150\ \frac{км}{ч}$; 50 с; 18 с.

Задача 4.

Через 40 с после отхода теплохода вдогонку за ним от той же пристани отправился глиссер с постоянным ускорением 0,5 $\frac{м}{с^2}$. Если теплоход двигался равномерно со скоростью 18 $\frac{км}{ч}$, то на какое расстояние отойдет от пристани глиссер, когда догонит теплоход?

Ответ: 400 м.

Задача 5.

Две материальные точки движутся по окружности радиусами R_1 и R_2, причем $R_1 = 2R_2$. Сравнить их центростремительные ускорения в случаях: а) равенства их скоростей; б) равенства их периодов.

Ответ: а) 1:2; б) 2:1.

Задача 6.

Если на высоте 15 м камень бросить вертикально вверх со скоростью 10 $\frac{м}{с}$, то через сколько времени он упадет на землю?

Ответ: 3 с.

Задача 7.

Минутная стрелка ручных часов вдвое длиннее секундной. Каково соотношение между линейными скоростями концов минутной ($\upsilon_м$) и секундной ($\upsilon_с$) стрелок?

Ответ: $\upsilon_с = 30\ \upsilon_м$.

Задача 8.

График зависимости скорости движения тела от времени представлен на рисунке 29. Какой

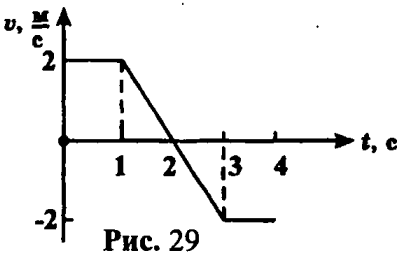


Рис. 29

путь прошло тело за 4 с и каково его перемещение при этом?

Ответ: 6 м; 0.

Задача 9.

Грузовик при прямолинейном равномерном движении за $t = 10$ с проезжает расстояние $s = 400$ метров. Если его колеса вращаются без проскальзывания с частотой $\nu = 16\ \frac{об}{с}$, то чему равен их радиус?

Ответ: 0,4 м.

Задача 10.

Тело бросили с поверхности Земли под углом 45° к горизонту с начальной скоростью $\upsilon = 7\ \frac{м}{с}$. Чему равна дальность полета тела?

Ответ: 4,9 м.

Задача 11.

Вертолет летит со скоростью $50\ \frac{м}{с}$ на высоте 45 м. С вертолета нужно сбросить груз на баржу, движущуюся встречным курсом со скоростью $5\ \frac{м}{с}$. За сколько метров, не долетев до баржи, летчик должен освободить крепеж, держащий груз?

Ответ: 165 м.

Задача 12.

Вертолет должен пролететь за 2 часа точно на север 216 км. Во время полета дует восточный ветер со скоростью $11{,}5\ \frac{м}{с}$. С какой скоростью должен лететь вертолет относительно воздуха, чтобы прибыть в назначенное время?

Ответ: $32{,}1\ \frac{м}{с}$.

Тест № 1

Задача 1.

Эскалатор метро поднимает неподвижно стоящего на нем пассажира в течение 1 мин. По неподвижному эскалатору пассажир поднимается за 3 мин. Сколько времени будет подниматься идущий вверх пассажир по движущемуся эскалатору?

1) 15 с; 2) 30 с; 3) 40 с; 4) 45 с; 5) 50 с.

Задача 2.

Если расход воды в канале за секунду составляет 0,27 м^3, то при ширине канала 1,5 м и глубине 0,6 м ее скорость составляет:

1) 0,1 $\frac{м}{с}$; 2) 0,2 $\frac{м}{с}$; 3) 0,3 $\frac{м}{с}$; 4) 0,4 $\frac{м}{с}$; 5) 0,5 $\frac{м}{с}$.

Задача 3.

Если два тела брошены под одним и тем же углом к горизонту с начальными скоростями, соответственно, первое — υ_o, второе — $3\upsilon_o$, то отношение дальностей полетов $\frac{s_2}{s_1}$ равно:

1) 9; 2) $3\sqrt{3}$; 3) 3; 4) $\sqrt{3}$; 5) $\frac{1}{9}$.

Задача 4.

Скорость прямолинейного движения материальной точки подчиняется закону $\upsilon = 2t$. Определить время, необходимое для смещения тела на 9 м из точки старта.

1) 6 с; 2) 9 с; 3) 18 с; 4) 3 с; 5) 12 с.

Задача 5.

Если мяч, брошенный вертикально вверх, упал на землю через 3 с, то величина скорости мяча в момент падения равна:

1) $5\ \frac{м}{с}$; 2) $10\ \frac{м}{с}$; 3) $15\ \frac{м}{с}$; 4) $20\ \frac{м}{с}$; 5) $30\ \frac{м}{с}$.

Задача 6.

Тело, двигаясь по окружности с постоянной по модулю скоростью, равной $10\ \frac{м}{с}$, переместилось из точки 1 в точку 2 по дуге с углом раствора 60°. Найти модуль изменения скорости тела.

1) $5\ \frac{м}{с}$; 2) 0; 3) $10\ \frac{м}{с}$; 4) $20\ \frac{м}{с}$; 5) $17{,}3\ \frac{м}{с}$.

Задача 7.

Движение материальной точки по окружности с постоянной по величине скоростью следует считать:

1) равноускоренным движением
2) равномерным движением
3) движением с переменным ускорением
4) движением, при котором $\vec{a}$ = const
5) движением, при котором $\vec{\upsilon}$ = const

Задача 8.

Из графика зависимости скорости материальной точки от времени (рис. 30) следует, что средняя скорость за 5 с движения равна

1) $2{,}0\ \frac{м}{с}$; 2) $2{,}6\ \frac{м}{с}$; 3) $1{,}5\ \frac{м}{с}$;

4) $2{,}4\ \frac{м}{с}$; 5) $3{,}0\ \frac{м}{с}$.

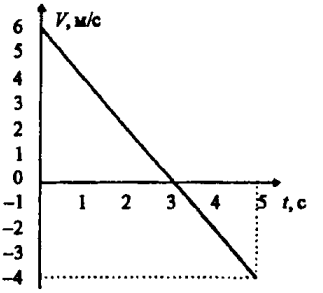


Рис. 30

Задача 9.

Ускорение a тела, брошенного вертикально вверх, с учетом сопротивления воздуха

1) $a > g$
2) $a = g$
3) $a < g$
4) $a > g$ на участке подъема, $a < g$ на участке спуска
5) $a < g$ на участке подъема, $a > g$ на участке спуска

Задача 10.

Путь, пройденный материальной точкой, скорость которой изменяется по закону $x = 2 - 2t\ (\frac{м}{с})$, за 4 секунды от начала движения равен:

1) 8 м; 2) 4 м; 3) 16 м; 4) 0; 5) 10 м.

Задача 11.

Вертолет летит горизонтально со скоростью 40 $\frac{м}{с}$ на высоте 45 м. С вертолета нужно сбросить груз на баржу, движущуюся в том же направлении со скоростью 2 $\frac{м}{с}$. Летчик должен освободить крепеж груза, не долетев до баржи:

1) 81 м; 2) 114 м; 3) 138 м; 4) 162 м; 5) 171 м.

Задача 12.

Колесо катится без проскальзывания с постоянной скоростью по горизонтальному участку дороги (рис. 31). Отношение скорости υ_B точки B на ободе колеса к скорости υ_C точки C на ободе колеса равно:

1) $\frac{1}{2}$; 2) $\frac{1}{\sqrt{2}}$; 3) 1; 4) $\sqrt{2}$; 5) 2.

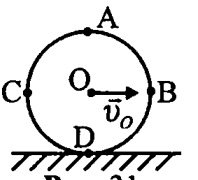


Рис. 31

1.2. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

Программа по динамике содержит следующие вопросы: Инерция. Первый закон Ньютона. Инерциальная система отсчета.

Взаимодействие тел. Масса. Импульс. Сила. Второй закон Ньютона. Принцип суперпозиции сил. Принцип относительности Галилея.

Третий закон Ньютона.

Силы в природе. Сила тяготения. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Вес тела. Движение тела под действием силы тяжести. Движение искусственных спутников. Невесомость. Первая космическая скорость.

Сила упругости. Закон Гука.

Сила трения. Трение покоя. Трение скольжения. Коэффициент трения. Закон трения скольжения. Движение тела с учетом силы трения.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Динамикой называется раздел механики, изучающий механическое движение с учетом причин, это движение вызвавших.

В динамике изучаются законы взаимодействия тел, вводятся новые понятия: ***сила*** и ***масса тела***.

Сила — это векторная величина, характеризующая действие одного тела на другое и сообщающая ускорение или деформацию последнему.

$$[F] = H = \frac{кгм}{c^2} = \text{кг·м·с}^{-2}.$$

Масса тела — это мера его инертности и гравитации.

$[m]$ = кг. Инертная масса характеризует динамические свойства тела.

Инертность (бездействие) тел не позволяет им мгновенно изменять свою скорость и характеризует способность тел сохранять свое предыдущее состояние: тело сохраняет неизменным состояние своего движения или покоя по отношению к ***инерциальной системе отсчета*** (см. п. 1.2.1).

Тела, имеющие одинаковые объемы, но состоящие из разных веществ, обладают различной массой. Отношение массы тела к его объему называется ***плотностью*** ρ:

$$\rho = \frac{m}{V} \cdot [\rho] = \frac{кг}{м^3} .$$

Плотность — это масса единицы объема.

1.2.1. Законы Ньютона

Основными законами динамики являются ***законы Ньютона***.

Первый закон Ньютона (закон инерции): существуют такие системы отсчета, относительно которых тело движется равномерно и прямолинейно или находится в покое, если на него не действует сила или действие сил скомпенсировано:

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0 \Rightarrow \vec{\upsilon} = const , \Rightarrow \vec{a} = 0 .$$

Инерциальной системой отсчета называется система отсчета, в которой справедлив закон инерции.

При переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой в классической механике Ньютона справедлив ***принцип относительности Галилея,*** утверждающий равноправие всех инерциальных систем отсчета: никакими механическими опытами, проведенными в инерциальной системе отсчета, невозможно определить, покоится ли данная система или движется равномерно и прямолинейно.

В любой инерциальной системе отсчета справедливы также второй закон Ньютона и закон сохранения импульса (см. п. 1.3.1).

***Применение первого закона Ньютона*:**

- Движение в транспорте по инерции: при резкой остановке движущегося транспорта все находящиеся в нем тела движутся по инерции вперед, так как сила торможения приложена к колесам транспортного средства, а находящиеся в нем тела продолжают сохранять предыдущее состояние.
- Опускание столбика ртути при встряхивании медицинского термометра.
- Вымолачивание зерна барабаном комбайна.
- В спорте: ослабление силы удара при ловле тяжелого мяча за счет движения руки в направлении удара; прыжки с разбега в песок.

***Второй закон Ньютона*:** если на тело действует сила, то оно движется с ускорением, и это ускорение прямо пропорционально действующей силе, обратно пропорционально его массе и направлено вдоль линии действия силы:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \Rightarrow \vec{F} = m\vec{a}\,.$$

Запись этого закона в проекциях на оси OX, OY, OZ:

$F_x = ma_x$; $F_Y = ma_y$; $F_z = ma_z$.

Основное уравнение динамики*:** если на тело действует не одна, а несколько сил, то ускорение сообщает ***равнодействующая сила:

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i\,.$$

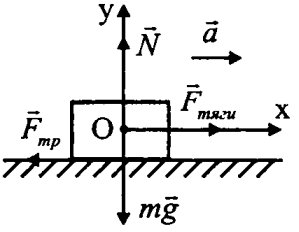


Рис. 32

Для рисунка 32 основное уравнение динамики в векторном виде записывается:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{тяги} + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}.$$

В скалярном виде в проекциях на оси:

ОУ: $0 = N - mg, \Rightarrow N = mg$;

ОХ: $ma = F_{тяги} - F_{тр}$.

Применение второго закона Ньютона:

- Движение в поезде становится более плавным, если к нему прикреплен за локомотивом тяжелогруженный вагон: увеличение массы поезда уменьшает ускорения, сообщаемые ему толчками локомотива.
- Более плавное движение нагруженного автомобиля по булыжной мостовой — по той же причине.
- Танкеры — суда, предназначенные для перевозки нефти, разделены на отдельные отсеки — танки, чтобы при изменении скорости танкера нефть не скапливалась на корме или в носовой части.
- Для забивания гвоздя в фанерную стенку с противоположной стороны стенки помещают массивное тело: масса — мера инертности и стенка будет меньше прогибаться, а ускорение, получаемое ею, будет меньше ускорения гвоздя.

Третий закон Ньютона: силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по величине и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Эти силы не уравновешивают друг друга, так как приложены к разным телам.

Еще одна формулировка ***третьего закона Ньютона***: Сила действия равна силе противодействия.

Применение третьего закона Ньютона:

- Человек сидит на стуле. При этом он давит на стул с такой же силой, как и стул на него.
- Если на весах уравновешен неполный сосуд с водой и в воду опустить палец так, чтобы он не касался

дна, то вода действует на палец с архимедовой силой (см. п. 4.2.2), направленной вертикально вверх, а согласно третьему закону Ньютона палец действует на воду с такой же силой, поэтому равновесие весов нарушится.

1.2.2. Механические силы

1.2.2.1. Сила трения

Сила трения — это сила, препятствующая движению:

$F_{тр} = \mu N,$

где N — сила реакции опоры;

μ — коэффициент трения, зависящий от вещества и качества обработки соприкасающихся поверхностей: $0 < \mu < 1$, т.е. коэффициент трения не может быть отрицательным.

На горизонтальной поверхности

$N = mg, \Rightarrow F_{тр} = \mu mg.$

Существуют:

- ***сила трения покоя*** — самая большая из всех сил трения, поэтому сначала нужно определить, сдвинется ли тело под действием приложенной силы или останется в покое;
- ***сила трения скольжения*** — возникает во время движения одного тела по поверхности другого и объясняется существованием взаимодействия между молекулами и атомами соприкасающихся тел;
- ***сила трения качения*** — самая маленькая из всех сил трения, поэтому все тяжелые предметы устанавливаются на колесики.

1.2.2.2. Сила тяжести и вес тела

Сила тяжести — это сила, действующая на тело вследствие его притяжения к Земле. Это сила всемирного

тяготения между Землей и телами, находящимися около ее поверхности.

Опытным путем установлено, что

$F_T = mg \Rightarrow$

$$mg = G\frac{mM_З}{R_З^2} \Rightarrow$$

Ускорение свободного падения на поверхности Земли:

$$g = G\frac{M_З}{R_З^2} \Rightarrow$$

(g не зависит от массы тела).

$g_h = G\dfrac{M_З}{(R_З + h)^2}$ — ускорение свободного падения на высоте h над поверхностью Земли.

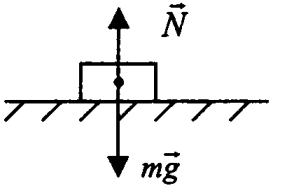


Рис. 33

Вес тела — это сила, с которой тело действует на опору или растягивает подвес.

На рисунке 33 вес тела P на основании третьего закона Ньютона равен силе реакции опоры N, а так как тело покоится, то на основании первого закона Ньютона $N = mg$ (***рычажные весы***).

На рисунке 34 вес тела T равен на основании первого закона Ньютона mg:

$T = mg$ (***безмен***).

Во всех инерциальных системах отсчета вес тела один и тот же и равен силе тяжести (по третьему закону Ньютона равен по модулю и противоположен по направлению силе реакции опоры N или силе натяжения нити T).

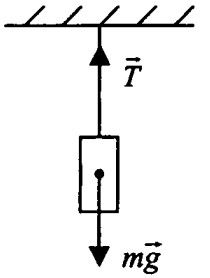


Рис. 34

Но их нельзя отождествлять, так как ***вес тела*** — это сила, приложенная к под-

ставке или подвесу со стороны тела, а ***сила тяжести*** приложена к телу со стороны Земли.

Вес тела не равен mg в следующих случаях:

- при движении тела в лифте с ускорением;
- при движении тела по выпуклому и вогнутому мостам;
- при нахождении тела на наклонной плоскости и движении по ней;
- при подъеме тела высоко над поверхностью Земли;
- при опускании тела глубоко в шахту;
- при погружении тела в жидкость или газ.

1.2.2.3. Движение тела в лифте

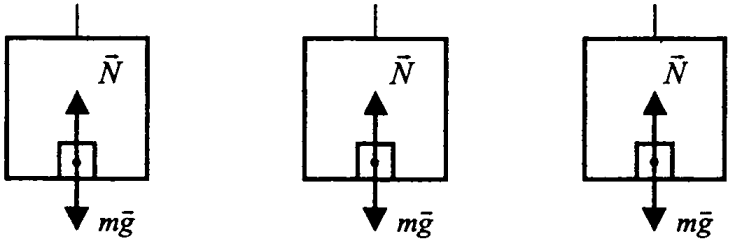


Рис. 35

$\uparrow\downarrow \vec{v} = const$	$\uparrow \vec{a} = const$	$\downarrow \vec{a} = const$
$mg = N \Rightarrow$	$m\vec{a} = \vec{N} + m\vec{g}$	$m\vec{a} = \vec{N} + m\vec{g}$
$P = N = mg.$	$ma = N - mg \Rightarrow$	$ma = mg - N \Rightarrow$
	$N = m(g + a) \Rightarrow$	$N = m(g - a) \Rightarrow$
	$P = N > mg$ — перегрузки.	$P = N < mg.$ Если $a = g \Rightarrow$ $N = 0$ — невесомость.

Обобщив данные к рисунку 35, можно сделать вывод:

- если тело находится в покое или движется равномерно вместе с опорой, то $P = N = mg;$

- если тело движется вертикально вверх вместе с опорой с ускорением a, то:

$P = N = m(g + a)$ — тело испытывает ***перегрузку***.

Значительные перегрузки (в 5–9 раз больше нормального веса) испытывают космонавты при старте;

- если тело движется вертикально вниз вместе с опорой с ускорением a, то:

$P = N = m(g - a)$ — вес тела ***уменьшается***.

Частный случай — тело свободно падает вместе с опорой $\Rightarrow$

$a = g \Rightarrow P = N = 0.$

Явление исчезновения веса называется ***невесомостью***. Ее испытывают космонавты при свободном движении корабля по орбите вокруг Земли.

1.2.2.4. Движение тела по выпуклому и вогнутому мостам

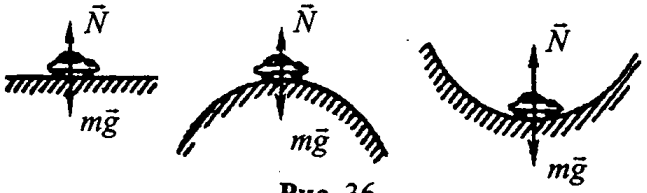


Рис. 36

$mg = N \Rightarrow$
$P = N = mg.$

$m\vec{a}_ц = \vec{N} + m\vec{g}$

$ma_ц = mg - N \Rightarrow$
$N = m(g - a_ц) \Rightarrow$
$P = N < mg.$
Если $a_ц = g \Rightarrow$
$N = 0$ — невесомость.

$m\vec{a}_ц = \vec{N} + m\vec{g}$

$ma_ц = N - mg \Rightarrow$
$N = m(g + a_ц) \Rightarrow$
$P = N > mg.$

Анализируя рисунок 36, можно сделать вывод, что

- при въезде на мост делается ограничение для тяжелогруженого транспорта;

- все мосты делаются выпуклыми;
- при въезде на мост ставится ограничение скорости, так как если $a_ц = \frac{\upsilon^2}{R} = g$, то тело не давит на опору в этой точке и автомобили могут взлететь в воздух.

1.2.2.5. Движение тела по наклонной плоскости

Уклоном горы называется отношение высоты наклонной плоскости к ее длине: $\frac{h}{l} = \sin\alpha$.

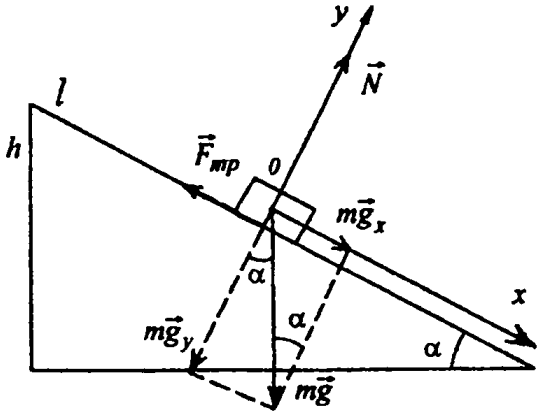


Рис. 37

1. $\downarrow \vec{\upsilon} = const$ — движение вниз по наклонной плоскости с постоянной скоростью (рис. 37).

Основное уравнение динамики для этого случая в векторном виде:

$0 = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}$;

в скалярном виде в проекциях на оси:

ОУ: $0 = N - mg_y$, $mg_y = mg\cos a \Rightarrow N = mg\cos a$;

ОХ: $0 = mg_x - F_{тр} \Rightarrow mg_x = F_{тр}$; $mg_x = mg\sin a$;

$F_{тр} = \mu mg_y = \mu mg\cos a \Rightarrow$

$\mu g \sin a = \mu m g \cos a \Rightarrow$

$\mu = tg\alpha$.

2. $\downarrow \vec{a} = const$ — движение вниз по наклонной плоскости с постоянным ускорением.

Основное уравнение динамики в вектором виде:

$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}$;

в скалярном виде в проекциях на оси:

ОУ: $0 = N - mg_y$, $mg_y = mg\cos\alpha \Rightarrow N = mg\cos\alpha$;

ОХ: $ma = mg_x - F_{тр}$; $mg_x = mg\sin\alpha$;

$F_{тр} = \mu mg_y = \mu mg\cos\alpha$.

3. $\uparrow \vec{\upsilon} = const$ — движение вверх по наклонной плоскости с постоянной скоростью (рис. 38).

Основное уравнение динамики в вектором виде:

$0 = \vec{F} + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}$;

в скалярном виде в проекциях на оси:

ОУ: $0 = N - mg_y$, $mg_y = mg\cos\alpha \Rightarrow$

$N = mg\cos\alpha$;

ОХ: $0 = F - mg_x - F_{тр}$; $mg_x = mg\sin\alpha$;

$F_{тр} = \mu mg_y = \mu mg\cos\alpha$.

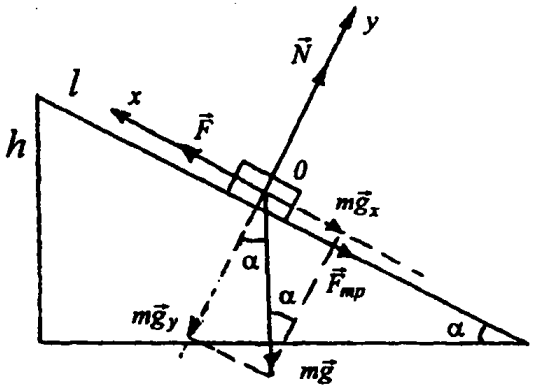


Рис. 38

4. $\uparrow \vec{a} = const$ — движение вверх по наклонной плоскости с постоянным ускорением.

Основное уравнение динамики в векторном виде:

$m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}$;

в скалярном виде в проекциях на оси:

ОУ: $0 = N - mg_y$, $mg_y = mg\cos\alpha \Rightarrow N = mg\cos\alpha$;

ОХ: $ma = F - mg_x - F_{тр}$; $mg_x = mg\sin\alpha$;

$F_{тр} = \mu mg_y = \mu mg\cos\alpha$.

1.2.2.6. Закон всемирного тяготения и гравитационные силы

Закон всемирного тяготения: все тела (две материальные точки) притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс тел, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и направленной вдоль линии, соединяющей центры их масс:

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

где $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{Нм^2}{кг^2}$ — ***гравитационная постоянная;***

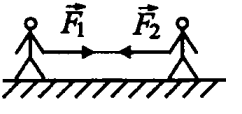


Рис. 39

m_1 и m_2 — массы первого и второго тела;

R — расстояние между телами.

На рисунке 39 $F_1 = F_2$. А в случае небесных тел Земля притягивает Луну с ***такой же силой***, как и Луна Землю.

Если тела имеют большие размеры (Земля, другие планеты), расстояние R нужно брать до их центра.

Силы, посредством которых осуществляется гравитационное взаимодействие тел, называются ***гравитационными силами*** или ***силами тяготения***, а массы, характеризующие это взаимодействие, — ***гравитационными массами.***

Гравитационная масса характеризует свойства тела как источника тяготения. В настоящее время доказана эквивалентность гравитационной и инертной массы, но они характеризуют два различных свойства тела.

Рассмотрим изменение веса тела в разных условиях:

- **Вес тела на других планетах**

Для нахождения его сравним вес тела на Земле (рис. 40):

$$mg_З = G\frac{mM_З}{R_З^2} \Rightarrow g_З = G\frac{M_З}{R_З^2}$$

и вес того же тела на другой планете, например Луне:

$$mg_Л = G\frac{mM_Л}{R_Л^2} \Rightarrow$$

$$g_Л = G\frac{M_Л}{R_Л^2}.$$

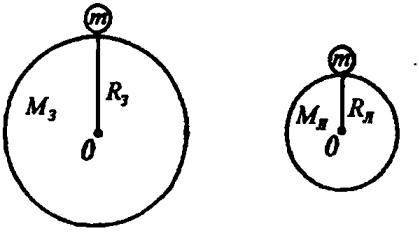


Рис. 40

Разделив $g_З$ на $g_Л$ и подставив соотношение масс и радиусов планет, можно вычислить $g_Л$, а, значит, и вес тела на Луне.

- **Вес тела, поднятого над поверхностью Земли**

Для нахождения веса тела, поднятого над поверхностью Земли (рис. 41), рассмотрим вес тела на поверхности Земли:

$$mg = G\frac{mM}{R^2} \Rightarrow g = G\frac{M}{R^2}$$

и на высоте h:

$$mg_h = G\frac{mM}{(R+h)^2} \Rightarrow$$

$$g_h = G\frac{M}{(R+h)^2}.$$

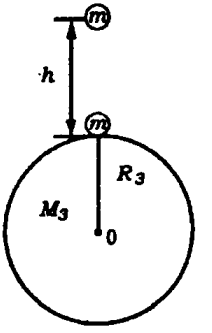


Рис. 41

Разделив g на g_h, найдем g_h, а, следовательно, и вес тела, поднятого над поверхностью Земли.

• **Вес тела при опускании глубоко в шахту**

При опускании тела глубоко в шахту, вес тела тоже изменяется (рис. 42), но не только из-за уменьшения расстояния между центрами. На тело массы m действует только масса M той части Земли, которая заключена внутри сферы радиуса R:

$$mg_{h\downarrow} = G\frac{mM}{(R_з - h)^2} = G\frac{mM}{R^2},$$

$$M = \rho V = \rho\frac{4}{3}\pi R^3 \Rightarrow$$

$$mg_{h\downarrow} = G\frac{m\rho 4\pi R^3}{3R^2} = G\frac{m\rho 4\pi R}{3},$$

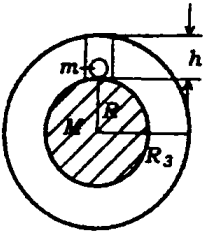


Рис. 42

т.е. вес тела определяется только R, а так как $R < R_з$, то вес тела при опускании глубоко в шахту ***уменьшается***.

1.2.2.7. Закон Гука и сила упругости

Некоторые задачи механики требуют учета деформации тела при действии приложенных к нему сил. В этих случаях модель абсолютно твердого тела неприменима: в них рассматриваются упругие тела.

Относительная деформация:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

где Δl — удлинение или укорочение (рис. 43);

ε — безразмерная величина.

Иногда $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}100\%$.

Деформация связана с возникновением в теле ***напряжения***:

$$\sigma = \frac{F}{S}, [\sigma] = \frac{H}{м^2},$$

где F — приложенная сила;

S — площадь сечения, перпендикулярного к направлению силы.

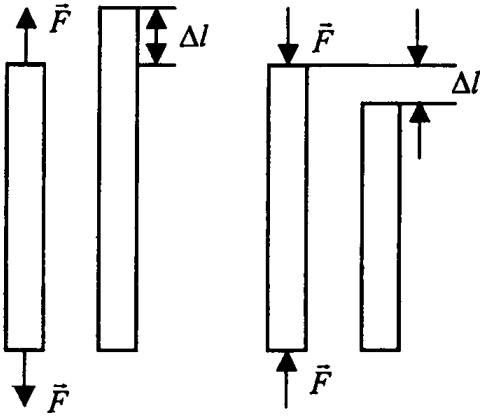


Рис. 43

Сила упругости — сила, возникающая при деформации тела и направленная в сторону, противоположную перемещению частиц или частей тела при деформации. Природа сил упругости объясняется силами отталкивания и притяжения между атомами и молекулами вещества.

Закон Гука устанавливает зависимость между ***упругой деформацией***, т.е. такой деформацией, когда тело восстанавливает первоначальную форму и размеры после прекращения действия силы, и напряжением.

Закон Гука: напряжение, возникающее в материале, прямо пропорционально относительной деформации (рис. 44):

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E — модуль упругости (модуль Юнга). $[E] = \frac{H}{м^2}$.

Расписав значения величин, входящих в закон, получим:

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta l}{l} \Rightarrow$$

$$F = \frac{ES}{l}\Delta l = k\Delta l,$$

где k — коэффициент упругости, или жесткость тела:

$$k = \frac{ES}{l},\ [k] = \frac{H}{м},$$

Рис. 44

т.е. k зависит от упругих свойств, первоначальной длины и сечения ⇒

Закон Гука: сила упругости, возникающая при деформации тела, пропорциональна изменению размеров тела и направлена в сторону, противоположную смещению частиц:

$$F_{упр} = -k\Delta x,$$

где Δx — изменение размера тела.

Или $F_{упр} = -kx$,

где x — смещение от положения равновесия.

Предел упругости — предельная деформация, при которой тело еще сохраняет упругие свойства.

Пластическая деформация — деформация за пределом упругости, когда тело не сохраняет первоначальную форму и размеры после прекращения действия силы.

Виды деформации:

- деформация продольного растяжения;
- деформация продольного сжатия;
- деформация всестороннего сжатия;
- деформация поперечного изгиба;
- деформация продольного изгиба;
- деформация сдвига;
- деформация кручения.

1.2.3. Законы Ньютона при криволинейном движении

При равномерном движении по окружности на тело действует центростремительная сила, сообщающая телу центростремительное ускорение:

$$a_ц = \frac{v^2}{R},$$

которая ***всегда*** является ***равнодействующей*** силой:

$$m a_ц = \frac{mv^2}{R},$$

т.е. если на вращающееся тело действуют несколько сил (например, сила тяжести и сила натяжения нити, на которой вращается тело), в качестве центростремительной силы нужно взять векторную сумму этих сил:

$$\sum_{i-1}^{n} \vec{F}_i = m\vec{a}_ц,$$

или в проекциях на ось X:

$$\sum_{i-1}^{n} F_{ix} = m\frac{v^2}{R}.$$

Ось X рекомендуется направлять от тела по радиусу к центру окружности (рис. 48).

Часто в качестве центростремительной силы выступает сила трения (рис. 45):

$$F_{тр} = ma_ц.$$

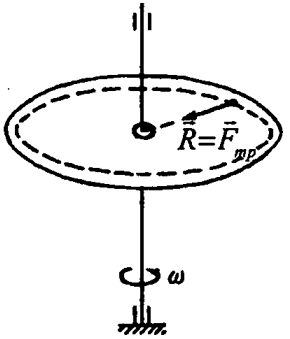


Рис. 45

1.2.4. Космические скорости

При движении спутников и космических кораблей вокруг Земли на них действует единственная сила — сила всемирного тяготения ⇒

$$mg = \frac{m\upsilon^2}{R} \Rightarrow \upsilon_I = \sqrt{gR},$$

где υ_I — ***первая космическая скорость***: $\upsilon_I \approx 8\frac{км}{с}$.

Её же можно рассчитать из формулы:

$$G\frac{mM}{R^2} = \frac{m\upsilon^2}{R} \Rightarrow \upsilon_I = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Второй космической скоростью υ_{II} называется наименьшая скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно, преодолев гравитационное притяжение Земли или другого небесного тела, удалилось бы от него на бесконечно большое расстояние:

$$\upsilon_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR} \approx 11{,}2\ \frac{км}{с}.$$

Таким образом:

- если $\upsilon < \upsilon_I$ — тело упадет на Землю;
- если $\upsilon_I \le \upsilon < \upsilon_{II}$ — тело становится искусственным спутником Земли и движется в случае равенства $\upsilon = \upsilon_I$ по окружности, а в случае $\upsilon > \upsilon_I$ — по эллипсу;
- если $\upsilon \ge \upsilon_{II}$ — тело преодолевает земное тяготение и уходит в космическое пространство по параболе или гиперболе ($\upsilon > \upsilon_{II}$).

Указания к решению задач

При решении задач на динамику необходимо:

1. Построить сопроводительный чертеж, где изобразить все силы, действующие на тело и направление ускорения. Надо помнить, что ускорение ***всегда*** сообщает равнодействующая всех сил.

2. Записать основное уравнение динамики в векторной форме и перейти к скалярной записи, заменив все векторы их проекциями на оси координат.

3. Полученную систему уравнений решить относительно искомых величин.

4. Если в задаче требуется определить положение или скорость точки, то к полученным уравнениям динамики следует добавить кинематические уравнения.

5. Если в задаче рассматривается движение не одного тела, а системы тел (связанные тела), то нужно записать основное уравнение динамики для каждого тела и решать систему уравнений.

6. Если в задаче к телу приложена сила и учитывается трение, то нужно сначала определить, сдвинет ли эта сила данное тело или оно останется в покое, т.е. сравнить силу трения покоя с приложенной силой.

7. Если в задаче нужно найти вес тела в измененных условиях, нужно помнить, что по третьему закону Ньютона он равен по модулю и противоположен по направлению силе реакции опоры N или силе натяжения нити T.

Примеры решения задач

Задача 1.

Два тела одинаковой массы m = 1 кг связаны нитью и движутся по наклонной и горизонтальной плоскости, как показано на рис. 46. Коэффициент трения μ = 0,2, угол α = 45°. Найти ускорение тел. Трением в блоке и массой блока пренебречь.

Дано:
m = 1 кг
m = 0,2
α = 45°
a — ?

Решение:

Запишем в векторном виде основные уравнения динамики для каждого тела:

$$m\vec{a} = \vec{N}_1 + m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_{тр1};$$

$$m\vec{a} = \vec{N}_2 + m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_{тр2}.$$

В скалярном виде в проекциях на ось OX:

$$ma = mg\sin\alpha - T - F_{тр1};$$

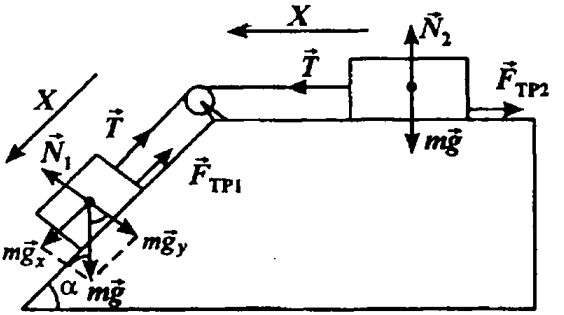


Рис. 46

$ma = T - F_{mp2}$;

$F_{mp1} = \mu N_1 = \mu mg\cos a$;

$F_{mp2} = \mu mg$.

При $\alpha = 45°$ получаем уравнение в скалярном виде:

$$ma = mg\frac{\sqrt{2}}{2} - T - \mu mg\frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{mg}{\sqrt{2}}(1-\mu) - T;$$

$ma = T - \mu mg$.

Складывая почленно эти два уравнения, получим:

$$2ma = \frac{mg}{\sqrt{2}}(1-\mu) - \mu mg \Rightarrow$$

$$a = \frac{g}{2}\left(\frac{1-\mu}{\sqrt{2}} - \mu\right) = \frac{10}{2}\left(\frac{1-0,2}{1,414} - 0,2\right) = 1,8\ (\frac{м}{с^2}).$$

Ответ: 1,8 $\frac{м}{с^2}$.

Задача 2.

Тело массы m движется под действием силы F, направленной под углом α к горизонту. С каким ускорением движется тело, если коэффициент трения равен μ (рис. 47)?

Дано:	**Решение**
m F μ α	Запишем в векторном виде основное уравнение динамики: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{тр}$.
a – ?	

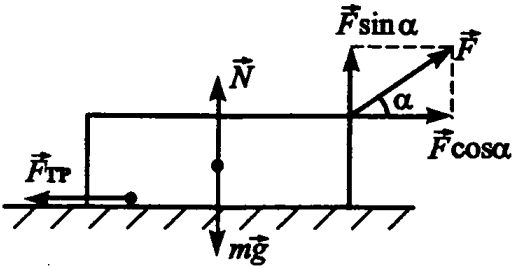


Рис. 47

В проекциях на оси получим:

OX: $ma = F\cos\alpha - F_{тр}$;

OY: $mg = N + F\sin\alpha \Rightarrow N = mg - F\sin\alpha$;

$F_{тр} = \mu N = \mu(mg - F\sin\alpha)$.

$$a = \frac{1}{m}[F\cos\alpha - \mu(mg - F\sin\alpha)].$$

Ответ: $a = \frac{1}{m}[F\cos a - \mu\,(mg - F\sin a)]$.

Задача 3.

Самолет, летящий со скоростью 360 $\frac{км}{ч}$, описывает «мертвую петлю» радиусом 250 м в вертикальной плоскости. Как велика сила, прижимающая летчика к сиденью в высшей и низшей точках петли Нестерова, если масса летчика 70 кг?

Дано:	**СИ**
$m = 70$ кг	
$\upsilon = 360\frac{км}{ч}$	$= 100\frac{м}{с}$
$R = 250$ м	
$N_B - ?\ N_H - ?$	

Решение:

По третьему закону Ньютона сила, с которой летчик давит на сиденье, равна силе реакции опоры.

Запишем основное уравнение динамики в векторном виде для высшей точки:

$$m\vec{a}_ц = m\vec{g} + \vec{N}_B .$$

В скалярном виде:

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = mg + N_B \text{ (рис. 48)} \Rightarrow$$

$$N_B = m\left(\frac{\upsilon^2}{R} - g\right) = 2100 \text{ (Н)}.$$

$$[N] = кг\frac{м^2}{с^2 м} = Н .$$

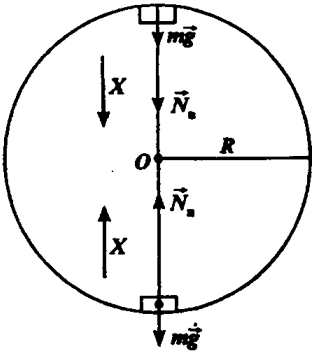


Рис. 48

В низшей точке векторный вид останется тем же:

$$m\vec{a}_ц = m\vec{g} + \vec{N}_H ,$$

а скалярный:

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = N_H - mg \Rightarrow$$

$$N_H = m\left(\frac{\upsilon^2}{R} + g\right) = 3500 \text{ (Н)}.$$

Ответ: $N_B = 2100$ Н; $N_H = 3500$ Н.

Задача 4.

Тяжелый шарик подвешен на нити длиной l. Нить равномерно вращается в пространстве в горизонтальной плоскости, образуя с вертикалью угол α. Сколько оборотов сделает шарик за время t?

Дано:	**Решение:**
l	Выберем систему отсчета, как показано на рисунке 49. Так как шарик движется по окружности, то он имеет центростремительное ускорение, направленное по радиусу к центру окружности, которое ему сообщает результирующая сила.
α	
t	
n – ?	

Запишем в векторном виде основное уравнение динамики:

$$m\vec{a}_ц = m\vec{g} + \vec{T}.$$

В проекциях на оси получим:

OX: $ma_ц = T\sin\alpha$;

OY: $mg = T\cos\alpha$.

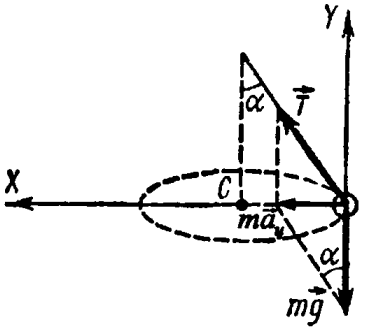


Рис. 49

Разделим одно равенство на другое:

$a_ц = g\mathrm{tg}\alpha$.

$v^2 = Rg\mathrm{tg}\alpha$, $R = l\sin\alpha \Rightarrow v^2 = lg\sin\alpha\,\mathrm{tg}\alpha \Rightarrow$

$$v = \sqrt{\frac{gl\sin^2\alpha}{\cos\alpha}}.$$

Линейная скорость движения точки по окружности

$$v = 2\pi R\nu = 2\pi R\frac{n}{t} = 2\pi l\sin\alpha\frac{n}{t} \Rightarrow$$

$$\sqrt{\frac{gl\sin^2\alpha}{\cos\alpha}} = 2\pi l\sin\alpha\frac{n}{t} \Rightarrow$$

$$n = \frac{t\sqrt{gl}}{2\pi l\sqrt{\cos\alpha}} = \frac{t}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l\cos\alpha}}.\ [\,n\,] = c\sqrt{\frac{м}{c^2 м}} = 1.$$

Ответ: $n = \dfrac{t}{2\pi}\sqrt{\dfrac{g}{l\cos\alpha}}$.

Задача 5.

Чему равно ускорение силы тяжести на поверхности некоторой планеты, радиус которой равен радиусу Земли, а средняя плотность в n раз больше средней плотности Земли?

Дано:	Решение:
$R_П = R_З$ $\rho_П = \rho_З$ $g_З$	Ускорение силы тяжести на поверхности Земли обусловлено силой тяготения:
$g_П - ?$	$mg_З = G\frac{mM_З}{R_З^2} \Rightarrow g_З = G\frac{M_З}{R_З^2}$.

Так как Землю можно рассматривать как сферическое тело, то ее массу можно рассчитать:

$$M_З = \rho_З V = \rho_З \frac{4\pi R_З^3}{3} \Rightarrow$$

$$g_З = G\frac{4\rho_З \pi R_З^3}{3R_З^2} = G\frac{4\rho_З \pi R}{3}.$$

По аналогии:

$$g_П = G\frac{4\rho_П \pi R}{3} = G\frac{4\rho_П n\pi R}{3} = ng_З.$$

Ответ: $g_П = ng_З$.

Задача 6.

Во сколько раз скорость искусственного спутника, вращающегося вокруг Земли по круговой орбите радиуса R, больше скорости спутника, вращающегося по орбите радиуса $2R$?

Дано:	Решение:
$R_1 = R$ $R_2 = 2R$	Первая космическая скорость по второй формуле:
$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} - ?$	$\upsilon_1 = \sqrt{\frac{GM_З}{R}}$.

По аналогии:

$$\upsilon_2 = \sqrt{\frac{GM_З}{2R}} = \frac{\upsilon_1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \upsilon_1 = \sqrt{2}\upsilon_2.$$

Ответ: $\upsilon_1 = \sqrt{2}\upsilon_2$.

Задача 7.

На гладкой горизонтальной поверхности лежит доска массой M, на которой находится тело массы m (рис. 50). Коэффициент трения между телом и доской равен μ. Какую силу нужно приложить к доске, чтобы тело соскользнуло с нее?

Дано:
M
m
μ
$F - ?$

Решение:

При движении тела m вместе с доской M ему не позволяет слететь с доски сила трения покоя $F_{тр}$, направленная в сторону движения тела, поэтому для этого тела:

$$ma = F_{тр},$$

Максимальное значение силы трения покоя равно силе трения скольжения μmg.

С другой стороны:

$$a = \frac{F}{M+m} \Rightarrow$$

$$ma = \mu mg.$$

$$\mu g = \frac{F}{M+m} \Rightarrow$$

$$F = \mu(M+m)g.$$

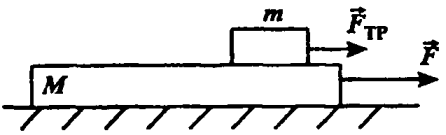


Рис. 50

При $F = \mu(M+m)g$ тело m соскользнет с доски M.

Ответ: $F = \mu(M+m)g$.

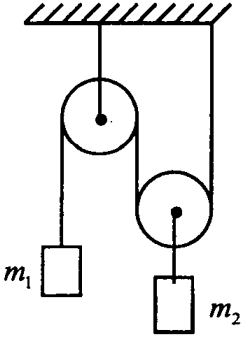


Рис. 51

Задача 8.

Грузы массой m_1= 3кг и m_2 = 5 кг подвешены с помощью системы блоков, как показано на рис. 51. Нить считать невесомой и нерастяжимой, массой блоков пренебречь, трение в блоке не учитывать. Чему равно ускорение второго груза?

Дано:
$m_1 = 3$кг
$m_2 = 5$ кг
$a_2 - ?$

Решение:

Расставим силы, действующие на грузы (рис. 52). Так как второй груз прикреплен к блоку, подвешенному на двух нитях, сила натяжения этих нитей будет в два раза меньше силы натяжения нити, на которой укреплен второй груз, а сила натяжения нити, удерживающий первый груз, будет такой же, поскольку нить одна. При этом перемещение груза m_2 в два раза меньше перемещения груза $m_1 \Rightarrow a_1 = 2a_2$.

Запишем основное уравнение динамики для обоих грузов:

$$\begin{cases} m_1 a_1 = m_1 g - \dfrac{T}{2} \\ m_2 a_2 = T - m_2 g \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} 4m_1 a_2 = 2m_1 g - T \\ + \\ m_2 a_2 = T - m_2 g \end{cases} \Rightarrow$$

$$a_2(4m_1 + m_2) = g(2m_1 - m_2) \Rightarrow$$

$$a_2 = \frac{g(2m_1 - m_2)}{4m_1 + m_2} = \frac{10(6-5)}{4 \cdot 3 + 5} =$$

$$0{,}58\ (\frac{м}{с^2}) \approx 0{,}6\ (\frac{м}{с^2}).$$

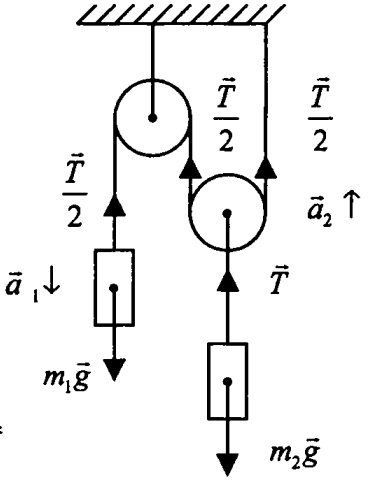


Рис. 52

Ответ: $0{,}6\ (\frac{м}{с^2})$.

Задача 9.

Автомобиль массой 3 т движется с постоянной скоростью 36 $\frac{км}{ч}$ по выпуклому мосту, радиус кривизны которого равен 20 м. С какой силой автомобиль давит на мост в

тот момент, когда линия, соединяющая центр кривизны моста с автомобилем, составляет угол 30° ?

Дано:	**СИ**
$m = 3$ т	$= 3\cdot10^3$ кг
$\upsilon = 36\frac{км}{ч}$	$= 10\frac{м}{с}$
$R = 20$ м	
$\alpha = 30°$	
$N - ?$	

Решение:

По третьему закону Ньютона сила, с которой автомобиль давит на мост, равна силе реакции опоры.

Запишем основное уравнение динамики в векторном виде:

$$m\vec{a}_ц = m\vec{g} + \vec{N}.$$

В скалярном виде нужно брать радиальную составляющую mg (рис. 53):

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = mg\cos\alpha - N \Rightarrow$$

$$N = m\left(g\cos\alpha - \frac{\upsilon^2}{R}\right) =$$

$$= 3\cdot10^3\cdot\left(10\cdot\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{100}{20}\right) =$$

$$= 10{,}98\cdot10^3\ (Н) \approx 11\cdot10^3\ Н = 11\ кН.$$

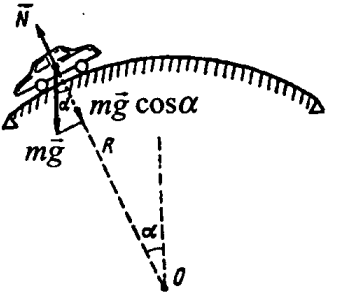


Рис. 53

$$[N] = кг\frac{м^2}{с^2 м} = Н.$$

Ответ: 11 кН.

Задача 10.

Ракета, пущенная с Земли вертикально вверх, поднялась на высоту Н = 1600 км и начала свободно падать с ускорением свободного падения, равным

1) $1{,}6\ \frac{м}{с^2}$ 2) $3{,}2\ \frac{м}{с^2}$ 3) $4{,}8\ \frac{м}{с^2}$ 4) $6{,}4\ \frac{м}{с^2}$ 5) $8{,}0\ \frac{м}{с^2}$

Дано:	СИ
$R = 6400$ км	$= 64 \cdot 10^5$ м
$H = 1600$ км	$= 16 \cdot 10^5$ м
$g = 10\ \frac{м}{с^2}$	
g_H – ?	

Решение

Так как радиус Земли равен 6400 км, то

$$H = \frac{R}{4} \Rightarrow R + H = \frac{5}{4}R.$$

$\Rightarrow$ 1) На поверхности Земли:

$$mg = G\frac{mM}{R^2} \Rightarrow g = G\frac{M}{R^2}.$$

2) На высоте H:

$$mg_H = G\frac{mM}{(R+H)^2} \Rightarrow g_H = G\frac{M}{(R+H)^2} = \frac{M \cdot 16}{25 \cdot R^2}.$$

3) Разделим первое равенство на второе, чтобы избавиться от констант:

$$\frac{g}{g_H} = \frac{25}{16} \Rightarrow g_H = \frac{16}{25}g = \frac{160}{25} = 6{,}4\left(\frac{м}{с^2}\right).$$

$\Rightarrow$ Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ 4.

Ответ: 4.

Задача 11.

Космический корабль совершает вертикальную посадку на планету, при этом его скорость равномерно уменьшается от 110 $\frac{м}{с}$ до нуля. Ускорение свободного падения на планете равно 6 $\frac{м}{с^2}$. Если находящийся в космическом корабле груз массой 900 кг весит 990 Н, то время посадки равно:

1) 22 с; 2) 36 с; 3) 44; 4) 53 с; 5) 74 с.

Дано:

$v_0 = 110\ \frac{м}{с}$

$v_t = 0$

$g_п = 6\ \frac{м}{с^2}$

$m = 90$ кг

$N = 990$ Н

$t - ?$

Решение:

Сделаем рисунок (рис. 54) и согласно ему запишем основное уравнение динамики в векторном виде:

$$m\vec{a} = \vec{N} + m\vec{g}_п.$$

В скалярном виде:

$$ma = N - mg_п \Rightarrow$$

$$a = \frac{N}{m} - g_п = \frac{990}{90} - 6 = 5\ \frac{м}{с^2}.$$

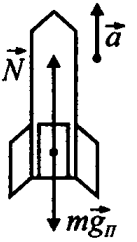


Рис. 54

Так как движение равнозамедленное (рис. 54),

$$-a = \frac{v_t - v_0}{t} \Rightarrow t = -\frac{v_t - v_0}{a} = -\frac{0-110}{5} = 22\ (с).$$

$\Rightarrow$ Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ 1.

Ответ: 1.

Задача 12.

Жесткость стального провода равна $10^4\ \frac{Н}{м}$. Если к концу троса, сплетенного из 10 таких проводов, подвесить груз массой 200 кг, то трос удлинится на

1) 2,5 см; 2) 2,0 см; 3) 1,5 см; 4) 1,0 см; 5) 0,5 см.

Дано:

$k_1 = 10^4\ \frac{Н}{м}$

$n = 10$

$m = 200$ кг

$\Delta l - ?$

Решение:

По закону Гука сила, приложенная к грузу со стороны троса (рис. 55), равна:

$$F = k\Delta l.$$

$$F = mg \Rightarrow$$

$$mg = k\Delta l.$$

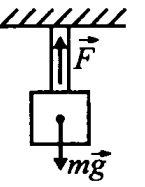


Рис. 55

Так как $k = \frac{ES}{l}$, то при использовании троса из нескольких проводов, его жесткость увеличивается в n раз: $(S = nS_1) \Rightarrow k = nk_1 \Rightarrow mg = nk_1\Delta l \Rightarrow \Delta l = \frac{mg}{nk_1} = \frac{200 \cdot 10}{10 \cdot 10^4} =$ $= 2 \cdot 10^{-2}$ (м) = 2 (см).

$[\Delta l] = \frac{кг \cdot м \cdot м}{c^2 \cdot H} =$ м.

$\Rightarrow$ Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 2.

Ответ: № 2.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 2

Задача 1.

Мальчик тянет за собой с постоянной скоростью санки массой 27 кг за веревку, которая составляет угол 30° с горизонтом. Коэффициент трения равен 0,2. Найти силу натяжения веревки.

Ответ: 56 Н.

Задача 2.

Космический корабль совершает мягкую посадку на Луну, двигаясь замедленно в вертикальном направлении (относительно Луны) с постоянным ускорением 8,38 $\frac{м}{c^2}$. Сколько весит космонавт массой 70 кг, находящийся в этом корабле ($g_Л = \frac{g_З}{6}$)?

Ответ: 700 Н.

Задача 3.

Автомобиль массой $m = 5$ т равномерно со скоростью $\upsilon = 72\ \frac{км}{ч}$ съезжает в вогнутый мост, представляющий собой дугу окружности радиусом $R = 80$ м. Определить, с какой силой автомобиль давит на мост в точке, радиус которой составляет с радиусом впадины моста угол $\alpha = 30°$ (рис. 56).

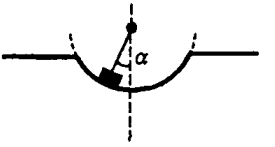


Рис. 56

Ответ: 68,3 кН.

Задача 4.

Какую скорость нужно сообщить искусственному спутнику Земли, чтобы он двигался по круговой орбите на высоте 1000 км над поверхностью Земли?

Ответ: 7,4 $\frac{км}{ч}$.

Задача 5.

Чему равно ускорение свободного падения на планете, радиус которой в 1,3 раза меньше радиуса Земли (массы планет одинаковы)?

Ответ: 17 $\frac{м}{с^2}$.

Задача 6.

Горизонтально расположенный диск вращается вокруг вертикальной оси, делая 25 $\frac{об}{мин}$. На каком расстоянии от оси вращения диска может удержаться тело, находящееся на нем, если коэффициент трения равен 0,2?

Ответ: 29 см.

Задача 7.

С какой наибольшей скоростью может двигаться автомобиль на повороте (радиус кривизны равен 25 м), чтобы его не занесло, если коэффициент трения скольжения равен 0,4?

Ответ: 36 $\frac{км}{ч}$.

Задача 8.

Когда к пружине жесткостью 500 $\frac{Н}{м}$ подвесили груз массой 1 кг, ее длина стала равной 12 см. До какой длины растянется пружина, если к ней подвесить еще один груз массой 1 кг?

Ответ: 14 см.

Задача 9.

На какой высоте будет находиться груз массой 10 кг через 1 с после того, как за трос, привязанный к грузу, потянуть вертикально вверх с силой 300 Н?

Ответ: 10 м.

Задача 10.

Камень, пущенный по поверхности льда со скоростью $\upsilon = 2\ \frac{м}{с}$, прошел до полной остановки расстояние $s = 20{,}4$ м. Найти коэффициент трения камня по льду, считая его постоянным.

Ответ: 0,01.

Задача 11.

Вокруг некоторой планеты по круговой орбите радиуса R летает спутник со скоростью $\upsilon_1 = 20\ \frac{км}{с}$. Если бы

масса планеты была в 4 раза меньше, то с какой скоростью тот же спутник двигался бы по орбите того же радиуса R?

Ответ: 10 $\frac{км}{с}$.

Задача 12.

Тело массой 2 кг движется по плоскости таким образом, что его координата от времени имеет вид: $x(t) = 4t^2 + 5t - 2$, $y(t) = 3t^2 + 4t + 14$ (в системе СИ). Чему равен модуль равнодействующей приложенных к телу сил?

Ответ: 20 Н.

Тест № 2

Задача 1.

Ускорение силы тяжести на поверхности некоторой планеты, радиус которой в n раз больше радиуса Земли и масса в m раз больше массы Земли, равно:

1) $\frac{m}{n^2}g$; 2) $\frac{m}{n}g$; 3) $\frac{n}{m}g$; 4) $\frac{n}{m^2}g$; 5) $\frac{m^2}{n^2}g$.

Задача 2.

На шероховатой горизонтальной поверхности лежит тело массой 2 кг. Если коэффициент трения скольжения тела о поверхность равен 0,3, то при действии на тело горизонтальной силы, равной по модулю 4 Н, ускорение тела будет равно:

1) 0; 2) 1 $\frac{м}{с^2}$; 3) 2 $\frac{м}{с^2}$; 4) 4 $\frac{м}{с^2}$; 5) 6 $\frac{м}{с^2}$.

Задача 3.

Вычислите ускорение свободного падения на расстоянии от центра Земли, вдвое превышающем её радиус, если на поверхности оно равно 10 $\frac{м}{с^2}$.

1) 2,5 $\frac{м}{с^2}$; 2) 4 $\frac{м}{с^2}$; 3) 10 $\frac{м}{с^2}$; 4) 1,5 $\frac{м}{с^2}$; 5) 1 $\frac{м}{с^2}$.

Задача 4.

На концах нити, переброшенной через блок, висят два груза массой $M = 250$ г каждый (рис. 57). Нить считать невесомой и нерастяжимой, массой блока можно пренебречь, трение в блоке не учитывать. Если на один из них положить перегрузок массой m, то грузы начинают двигаться с ускорением $a = 2\ \frac{м}{с^2}$, при этом сила натяжения нити АВ будет равна:

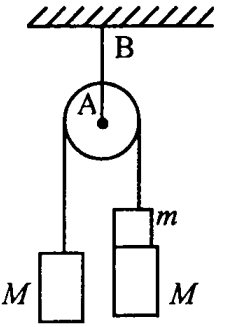


Рис. 57

1) 2,5 Н; 2) 3,0 Н; 3) 4,0 Н; 4) 5,0 Н; 5) 6,0 Н.

Задача 5.

Во сколько раз период обращения вокруг Земли искусственного спутника, движущегося по круговой орбите радиуса $2R$, больше периода обращения спутника, движущегося по орбите радиуса R?

1) $\sqrt{2}$; 2) 4; 3) 2; 4) $2\sqrt{2}$; 5) 8.

Задача 6.

Ракета, пущенная вертикально вверх, поднялась на высоту $H = 3200$ км над Землей и начала падать с ускорением, равным:

1) 2,2 $\frac{м}{с^2}$; 2) 3,3 $\frac{м}{с^2}$; 3) 4,4 $\frac{м}{с^2}$; 4) 5,6 $\frac{м}{с^2}$; 5) 6,7 $\frac{м}{с^2}$.

Задача 7.

Деревянный брусок массой 2 кг тянут равномерно по горизонтальной доске с помощью пружины с жесткостью $100\ \frac{Н}{м}$ так, что упругая сила не имеет вертикальной составляющей. Если коэффициент трения равен 0,3, то пружина удлинится на:

1) 2 см; 2) 3 см; 3) 4 см; 4) 5 см; 5) 6 см.

Задача 8.

К потолку лифта прикреплена невесомая нить с шариком массой 2 кг. Если сила натяжения нити равна 16 Н, то лифт движется с ускорением:

1) $8\ \frac{м}{с^2}$, направленным вниз;

2) $2\ \frac{м}{с^2}$, направленным вниз;

3) без ускорения;

4) $2\ \frac{м}{с^2}$, направленным вверх;

5) $8\ \frac{м}{с^2}$, направленным вверх.

Задача 9.

При буксировке автомобиля массой 1 т результирующая сила сопротивления и трения в 50 раз меньше веса автомобиля. Чему равна жесткость буксирного троса, если при равномерном движении автомобиля трос удлинился на 2 см?

1) $10\ \frac{Н}{м}$; 2) $10^2\ \frac{Н}{м}$; 3) $10^3\ \frac{Н}{м}$; 4) $10^4\ \frac{Н}{м}$; 5) $10^5\ \frac{Н}{м}$.

Задача 10.

Какую скорость должен иметь вагон, движущийся по закруглению радиуса 100 м, чтобы шар, подвешенный на нити к потолку вагона, отклонился от вертикали на угол 45°?

1) 12,2 $\frac{м}{с}$; 2) 24,8 $\frac{м}{с}$; 3) 31,6 $\frac{м}{с}$; 4) 42,1 $\frac{м}{с}$; 5) 48,8 $\frac{м}{с}$.

Задача 11.

Грузовой лифт с находящимся в нем грузом движется равнозамедленно вниз с ускорением 0,12 $\frac{м}{с^2}$. Если вес груза в лифте равен 3036 Н, то масса груза равна:

1) 280 кг; 2) 300 кг; 3) 350 кг; 4) 370 кг; 5) 410 кг.

Задача 12.

Космонавт с Земли прилетел на другую планету, радиус которой в 2 раза больше радиуса Земли, а плотность в 4 раза больше плотности Земли. Отношение силы притяжения, действующей на космонавта на этой планете, к силе притяжения, действующей на Земле, равно:

1) $\frac{1}{8}$; 2) $\frac{1}{2}$; 3) 1; 4) 2; 5) 8.

1.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ. РАБОТА. МОЩНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ

Программа по механике содержит следующие вопросы в этом разделе:

Импульс тела. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Устройство ракеты.

Механическая работа. Мощность. Кинетическая энергия. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике. Простые механизмы. Коэффициент полезного действия механизмов.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.3.1. Импульс. Закон сохранения импульса

Существует два вида импульсов: импульс тела и импульс силы.

Импульс тела — векторная величина, численно равная:

$$m\vec{\upsilon}\,.\ [m\upsilon] = \frac{кг\cdot м}{с} = кг\cdot м\cdot с^{-1}.$$

Импульс силы — векторная величина, численно равная произведению силы на время ее действия:

$$\vec{F}t\,.\ [Ft] = \frac{кг\cdot м}{с} = кг\cdot м\cdot с^{-1}.$$

Закон сохранения импульса: геометрическая сумма импульсов замкнутой системы есть величина постоянная:

$$m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + ... + m\vec{\upsilon}_n = const\,.$$

Замкнутой (изолированной) называется ***система***, на которую не действуют внешние силы.

Закон сохранения импульса может быть также сформулирован: в изолированной системе геометрическая сумма импульсов тел до взаимодействия равна геометрической сумме импульсов тел после взаимодействия (рис. 58).

В векторной форме закон сохранения импульса для этого случая:

$$m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 = (m_1 + m_2)\vec{\upsilon}';$$

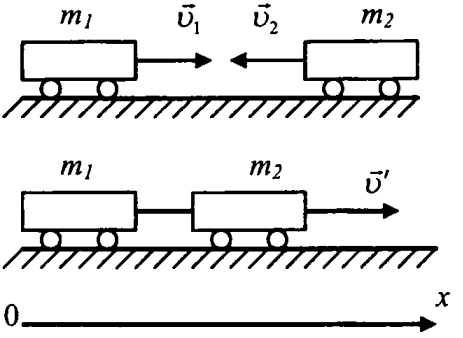


Рис. 58

в скалярной форме с учетом знаков проекций на выбранную ось OX:

$$m_1\upsilon_1 - m_2\upsilon_2 = (m_1 + m_2)\upsilon'.$$

***Применение закона сохранения импульса*:**

- Принцип реактивного движения: импульс вылетающих из сопла двигателя продуктов сгорания топлива равен импульсу, получаемому ракетой при ее движении.
- Разрыв снаряда на несколько осколков: геометрическая (векторная) сумма импульсов всех осколков равна импульсу снаряда до разрыва.
- Направленный взрыв при строительстве тоннелей в гористой местности.
- Игра в бильярд.
- Человек идет по земле, отталкиваясь от нее ногами. Сила, с которой Земля действует на человека, равна по величине силе действия человека на Землю (действие третьего закона Ньютона и закона сохранения импульса).

Изменение импульса тела постоянной массы может происходить только в результате изменения скорости и всегда обусловлено действием силы.

Если сила $\vec{F}$ действует на тело с массой m в течение промежутка времени Δt, то можно рассмотреть ***второй закон Ньютона в импульсной форме:***

$\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{\upsilon}) \Rightarrow$

изменение импульса тела $\Delta(m\vec{\upsilon})$ за промежуток времени Δt равно импульсу приложенной силы $\vec{F}\Delta t$ и направлено в сторону действия силы.

1.3.1.1. Упругое соударение

Соударение — это столкновение тел. При соударении тела обмениваются энергией и импульсом. После соударения они двигаются со скоростями, которые отличаются по направлению и величине от их скоростей до соударения.

При лобовом ***центральном*** соударении центры масс обоих тел двигаются вдоль одной линии. При упругом соударении (рис. 59) на протяжении кратковременного соприкосновения тела будут двигаться с общей скоростью, а затем разлетаются и продолжают двигаться с разными скоростями.

Если применить к такой системе тел закон сохранения импульса, то полный импульс системы будет равен ***алгебраической сумме*** импульсов обоих тел:

$m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = m_1\upsilon_1' + m_2\upsilon_2' \Rightarrow$

$m_1(\upsilon_1 - \upsilon_1') = m_2(\upsilon_2' - \upsilon_2)$.

Применив закон сохранения энергии (см. п. 1.3.3), $\Rightarrow$ при ***лобовом соударении*** тел сумма скоростей до и после соударения одинакова: $(\upsilon_1 + \upsilon_1') = (\upsilon_2 + \upsilon_2')$.

При противоположном направлении движения скорость считается отрицательной.

Если тела имеют одинаковую массу (например,

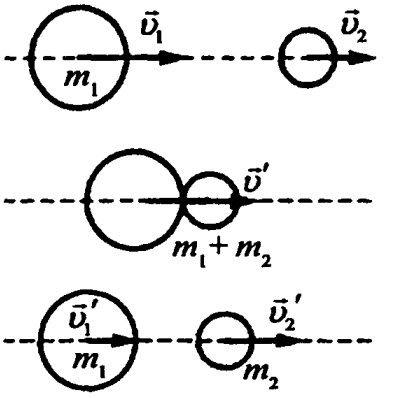


Рис. 59

бильярдные шары), то после ***упругого центрального удара*** они ***обмениваются скоростями***; после ***упругого нецентрального удара*** — разлетаются под углом 90°.

1.3.1.2. Неупругое соударение

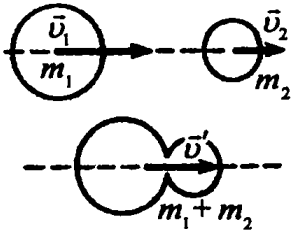


Рис. 60

Если происходит неупругое соударение тел, то они деформируются и затем двигаются с общей скоростью (рис. 60):

$$m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = (m_1 + m_2)\upsilon' \Rightarrow$$

$$\upsilon' = \frac{m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2}{m_1 + m_2}.$$

При противоположном направлении движения скорость считается отрицательной.

К этому выводу можно прийти, записав закон сохранения импульса в векторной форме, выбрав ось X и взяв проекции на эту ось с соответствующими знаками.

1.3.2. Механическая работа

Работа постоянной механической силы равна скалярному произведению вектора силы $\vec{F}$ на вектор перемещения $\vec{s}$, которое, в свою очередь, равно произведению модуля силы F и модуля перемещения s, умноженному на косинус угла α между векторами силы и перемещения:

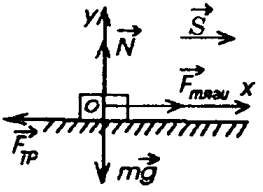


Рис. 61

$$A = \left(\vec{F}\cdot\vec{s}\right) = Fs\cos\alpha.$$

$$[A] = \text{Н·м} = \text{Дж} =$$

$$= \frac{кг\cdot м\cdot м}{c^2} = \text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}.$$

В зависимости от значения $\cos\alpha$ работа может быть:

- положительной (например, работа движущих сил: $\angle\alpha$ между векторами силы F и перемещения s равен нулю (рис. 61) $\Rightarrow \cos\alpha = 1 \Rightarrow A = Fs > 0$);
- отрицательной (например, работа силы трения или сопротивления $\angle\alpha = 180^\circ \Rightarrow \cos\alpha = -1 \Rightarrow A = -Fs < 0$: ***работа силы трения всегда отрицательна***);
- равной нулю, когда вектор силы перпендикулярен вектору перемещения (например, ***работа силы тяжести при горизонтальном перемещении тела равна 0***:
  $\angle\alpha = 90^\circ \Rightarrow \cos\alpha = 0 \Rightarrow A_{mg} = 0 \Rightarrow$ сила не производит работы, если тело перемещается в направлении, перпендикулярном к направлению действия силы).

Если на тело действует несколько сил, каждая из которых совершает над ним работу, то вся произведенная работа равна алгебраической сумме работ отдельных сил:

$$A = \sum_{i=1}^{n} A_i .$$

При совпадении направления перемещения с направлением вектора силы величина работы численно равна ***площади под графиком зависимости между силой и перемещением*** (рис. 62).

Работа силы тяжести — работа по подъему тела массы m с высоты h_1 на высоту h_2:

$A = -(mgh_2 - mgh_1)$.

Консервативными называются ***силы***, работа которых не зависит от вида траектории, а определяется только начальным и конечным положением тела $\Rightarrow$ ***работа консервативных сил по замкнутому контуру равна нулю***.

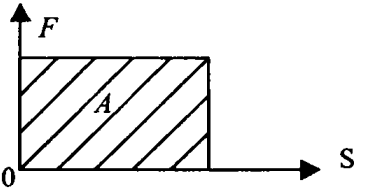


Рис. 62

Гравитационные силы принадлежат к числу консер-

вативных ⇒ ***работа силы тяжести по замкнутому контуру равна нулю***.

Работа силы упругости:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right).$$

1.3.3. Мощность

Мощность характеризует быстроту выполнения работы. ***Мощность*** равна отношению работы к промежутку времени, за который она была совершена:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{F_{тяги} \cdot S}{t} = F_{тяги} \upsilon_{ср}.$$

$$[N] = \text{Вт} = \frac{Дж}{с} = \frac{кг \cdot м^2}{с^3} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}.$$

Внесистемная единица мощности — 1 лошадиная сила:

1 л.с. = 735,6 Вт.

Из формулы $N = \frac{A}{t} \Rightarrow A = N \cdot t \Rightarrow$ Дж = Вт · с.

Иногда употребляются ***внесистемные единицы работы***:

- 1 ватт-час = 1 Вт-час = $3{,}6 \cdot 10^3$ Дж;
- 1 гектоватт-час = 1 гВт-час = $3{,}6 \cdot 10^5$ Дж;
- 1 киловатт-час = 1 кВт-час = $3{,}6 \cdot 10^6$ Дж.

1.3.4. Энергия. Закон сохранения энергии

Энергия — это величина, характеризующая способность тела совершать работу. Она бывает кинетической и потенциальной.

Кинетическая энергия — это энергия движущегося тела, имеющего массу m и скорость υ, равна:

$$E_к = \frac{m\upsilon^2}{2},\ [E_к] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = Дж.$$

Изменение этой величины равно работе силы, приложенной к телу.

Потенциальной энергией тела или системы тел называется энергия, обусловленная взаимодействием этих тел. Формулы для потенциальной энергии имеют разный вид в зависимости от характера действующих сил.

Потенциальная энергия тела массы m, поднятого на высоту h над поверхностью Земли или каким-то другим нулевым уровнем, равна:

$$E_п = mgh,\ [E_п] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = Дж.$$

Это физическая величина, характеризующая взаимодействие тела и Земли; изменение этой величины равно работе силы тяжести, действующей на тело:

$$A = -(E_{п2} - E_{п1}) = -(mgh_2 - mgh_1).$$

Знак «–» указывает на то, что при падении потенциальная энергия тела уменьшается. Выбор нулевого уровня зависит от человека (Земля, пол в помещении и т.д.). Поэтому физический смысл имеет изменение потенциальной энергии — оно не зависит от выбора нулевого уровня. В отличие от кинетической энергии, тело может обладать потенциальной энергией, находясь как в покое, так и в движении.

$$[E_п] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = Дж.$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела равна работе, произведенной при ее деформации:

$$E_п = \frac{kx^2}{2},$$

где k — ***коэффициент упругости,*** или ***жесткость пружины***;

x — величина деформации.

Жесткость пружины зависит от материала тела и его размеров.

$$[E_n] = \frac{Н \cdot м^2}{м} = Н{\cdot}м = Дж.$$

Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, остается неизменной:

$E = E_k + E_n = const.$

Когда система не замкнута, ее полная механическая энергия изменяется на величину работы внешних сил.

Всеобщий закон сохранения энергии: во всех процессах, происходящих в природе, энергия не исчезает и не возникает из ничего: она лишь переходит из одного вида в другой в эквивалентных количествах.

1.3.5. Коэффициент полезного действия

Работу машин и механизмов характеризует ***коэффициент полезного действия — КПД*** или η — величина, измеряемая отношением полезной работы, совершенной машиной, к полной или затраченной работе:

$$\eta = \frac{A_{пол}}{A_{затр}} 100\%;$$

или отношением полезной мощности к мощности затраченной:

$$\eta = \frac{N_{пол}}{N_{затр}} 100\%.$$

Указания к решению задач

При решении задач на ***закон сохранения импульса*** необходимо:

1. Сделать сопроводительный чертеж (до взаимодействия тел и после взаимодействия).
2. Выбрать направление оси OX или OY.
3. Записать закон сохранения импульса в векторной, а затем в скалярной форме, с учетом знака проекции на выбранную ось, если система замкнута.
4. Решить уравнение относительно искомой величины.

При решении задач на ***закон сохранения механической энергии*** необходимо:

1. Выбрать нулевой уровень отсчета потенциальной энергии.
2. Если на тело замкнутой системы действуют только консервативные силы $\Rightarrow$ записать закон сохранения механической энергии в виде:
   $E_1 = E_2$,
   где E_1 и E_2 — энергии системы в выбранных состояниях.
3. Расписать значения энергии в каждом состоянии и, подставив их в уравнение закона сохранения энергии, решить уравнение относительно искомой величины.
4. Если на тело действуют неконсервативные силы, записать закон изменения механической энергии в виде:
   $\Delta E = E_1 - E_2 = A$,
   где E_1 и E_2 — значения энергии в каждом из выбранных состояний; A — значение работы.
5. В задачах с использованием ***КПД*** необходимо правильно выбрать формулу для его расчета, а затем четко определить, какая из выбранных величин является полезной, а какая — затраченной.

Примеры решения задач

Задача 1.

Автомобиль массой m = 2 т движется в гору, угол наклона которой к горизонту равен $\beta = 30^\circ$ (рис. 63). Какую работу совершила сила тяги на пути 3 км, если известно, что автомобиль двигался с ускорением $a = 0{,}2\ \frac{м}{с^2}$? Коэффициент трения $\mu = 0{,}1$.

Дано:	СИ
$m = 2$ т	$= 2\cdot10^3$ кг
$s = 3$ км	$= 3\cdot10^3$ м
$a = 0{,}2\ \frac{м}{с^2}$	
$\beta = 30^\circ$	
$\mu = 0{,}1$	
A – ?	

Решение:

Запишем основное уравнение динамики в векторном виде:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_T + \vec{F}_{тр}.$$

В проекциях на оси получим:

OX: $ma = F_T - mg\sin\beta - F_{тр}$;

OY: $mg\cos\beta = N$,

где $mg\sin\beta$ — проекция mg на ось X, $mg\cos\beta$ — проекция mg на ось Y.

$$F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\beta. \Rightarrow F_T = ma + mg\sin\beta + \mu mg\cos\beta.$$

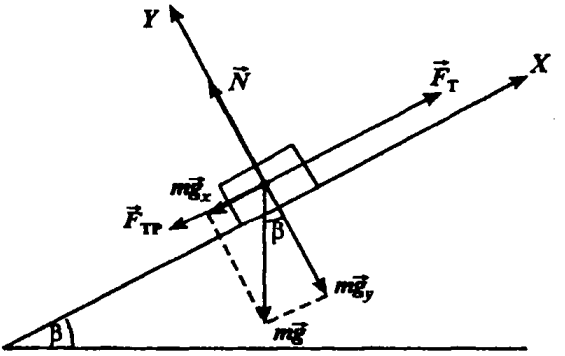


Рис. 63

$A = F_T \cdot s\cos\alpha$,

но в данном случае $\alpha = 0 \Rightarrow$

$A = F_T \cdot s = (ma + mg\sin\beta + \mu mg\cos\beta)s =$

$= ms(a + g\sin\beta + \mu g\cos\beta)$.

$$[A] = \frac{кг \cdot м \cdot м}{c^2} = Дж.$$

$$A = 2 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^3(0{,}2 + 10 \cdot 0{,}5 + 0{,}1 \cdot 10\frac{\sqrt{3}}{2}) =$$

$= 36{,}4 \cdot 10^6$ Дж $= 36{,}4$ МДж.

Ответ: $A = 34{,}6$ МДж.

Задача 2.

Для определения скорости пули применяется баллистический маятник, состоящий из деревянного шара массой M, подвешенного на легком стержне. При выстреле в горизонтальном направлении пуля массой m попадает в шар и застревает в нем. Какова была скорость пули, если маятник поднимается на высоту h?

Дано:
M
m
h

$\upsilon_0 - ?$

Решение:

Система взаимодействующих тел — пуля и шар, следовательно, применяем закон сохранения импульса.

До взаимодействия импульс шара 0, импульс пули — $m\vec{\upsilon}_0$;

после взаимодействия: импульс системы равен:

$(m+M)\vec{\upsilon}'$,

так как удар абсолютно неупругий.

По закону сохранения импульса:

$m\vec{\upsilon}_0 = (m + M)\ \vec{\upsilon}'$.

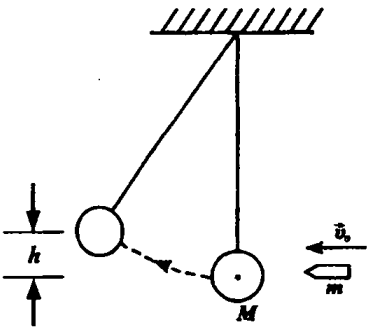


Рис. 64

Здесь $\vec{\upsilon}'$ — скорость шара с застрявшей в нем пулей.

Если ось системы координат направлена вдоль полета пули, то в скалярном виде:

$$m\upsilon_0 = (m+M)\upsilon' \Rightarrow \upsilon_0 = \frac{m+M}{m}\upsilon'.$$

Для нахождения скорости шара с пулей после удара υ' используем закон сохранения энергии, выбрав в качестве первого состояния то, в котором находится шар с застрявшей в нем пулей и имеющий скорость υ', а в качестве второго состояния то, в котором находится шар с пулей, поднявшись на высоту h (рис. 63).

Отсчет потенциальной энергии будем вести от начального положения шара.

Закон сохранения энергии: $E_к = E_п$. Или:

$$\frac{(m+M)\upsilon'^2}{2} = (m+M)gh \Rightarrow$$

$$\upsilon' = \sqrt{2gh} \Rightarrow \upsilon_0 = \frac{m+M}{m}\sqrt{2gh}.$$

Ответ: $\upsilon_0 = \frac{m+M}{m}\sqrt{2gh}$.

Задача 3.

Молекула массой $4{,}65\cdot10^{-26}$ кг, летящая со скоростью $600\ \frac{м}{с}$, ударяется о стенку сосуда под углом 60° к нормали и под таким же углом упруго отскакивает от нее без потери скорости. Найти импульс силы, полученной стенкой за время удара (рис. 65).

Дано:	**Решение:**
$m = 4{,}65\cdot10^{-26}$ кг $\upsilon = 600\ \frac{м}{с}$ $\alpha = 60°$ $F\Delta t - ?$	По второму закону Ньютона в импульсной форме: $\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{\upsilon})$. Найдем $\Delta(m\vec{\upsilon})$ в скалярном виде:

$\Delta(m\upsilon) = m\upsilon_2\cos\alpha - (-m\upsilon_1\cos\alpha) = 2m\upsilon\cos\alpha$,

где υ_2 — скорость молекулы после удара о стенку, совпадающая по направлению с выбранной осью X (проекция положительна);

υ_1 — скорость молекулы до удара о стенку (проекция отрицательна) $\Rightarrow$

$F\Delta t = 2m\upsilon\cos\alpha =$
$= 2\cdot 4{,}65\cdot 10^{-26}\cdot 600\cdot 0{,}5 =$
$= 2{,}8\cdot 10^{-23}$ (Н·с).

$[F\Delta t] = \frac{кг\cdot м}{с} =$ Н·с.

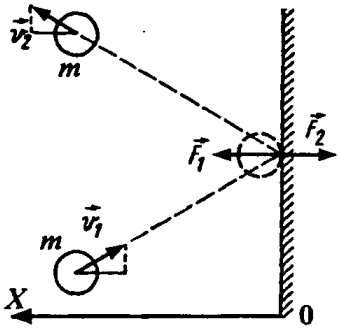


Рис. 65

Ответ: $F\Delta t = 2{,}8\cdot 10^{-23}$ Н·с.

Задача 4.

Автомобиль, имеющий массу 1 т, трогается с места и, двигаясь равноускоренно, проходит 20 м за время 2 с. Какую мощность должен развивать мотор этого автомобиля?

Дано:	СИ
$m = 1$ т	$= 10^3$ кг
$\upsilon_0 = 0$	
$s = 20$ м	
$t = 2$ с	
$N - ?$	

Решение:

Мощность определяется:

$N = F_{тяги}\upsilon_{ср}$.

Среднюю скорость можно найти:

$$\upsilon_{ср} = \frac{l_{общ}}{t_{общ}} = \frac{s}{t}.$$

Так как о силах сопротивления ничего не сказано, то ускорение автомобилю сообщает по второму закону Ньютона сила тяги:

$F_{тяг} = ma$.

Для нахождения ускорения воспользуемся формулой пути при равноускоренном движении:

$$s = \upsilon_o t + \frac{at^2}{2} = \frac{at^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2s}{t^2} \Rightarrow$$

$$F_{тяг} = m\frac{2s}{t^2} \Rightarrow N = m\frac{2s}{t^2}\cdot\frac{s}{t} = \frac{2ms^2}{t^3}.$$

Сделаем проверку по размерности, чтобы убедиться в правильности полученной формулы:

$$[N] = \frac{кг \cdot м^2}{c^3} = \text{Вт}.$$

$$N = \frac{2\cdot 10^3 \cdot 400}{8} = 10^5\ (\text{Вт}) = 100\text{кВт}.$$

Ответ: N = 100кВт.

Задача 5.

Самолет массой 2 т движется в горизонтальном направлении со скоростью 50 $\frac{м}{с}$. Находясь на высоте 420 м, он переходит на снижение при выключенном двигателе и достигает дорожки аэродрома, имея скорость 30 $\frac{м}{с}$. Определить работу силы сопротивления воздуха во время планирующего полета.

Дано:	СИ
$m = 2$ т	$= 2\cdot 10^3$ кг
$\upsilon_0 = 50\frac{м}{с}$	
$h = 420$ м	
$\upsilon_t = 30\frac{м}{с}$	
$A_{сопр}$ – ?	

Решение:

Находясь на высоте h и имея скорость x_0, самолет обладает кинетической и потенциальной энергией:

$$E_1 = \frac{m\upsilon_0^2}{2} + mgh,$$

в момент посадки — только кинетической:

$$E_2 = \frac{m\upsilon_t^2}{2}.$$

Из закона сохранения энергии следует, что исчезнуть энергия не могла ⇒ она пошла на работу сил сопротивления. При этом надо помнить, что работа сил сопротивления всегда отрицательна:

$$A_{сопр} = \frac{m\upsilon_t^2}{2} - \frac{m\upsilon_0^2}{2} - mgh = \frac{m(\upsilon_t^2 - \upsilon_0^2)}{2} - mgh.$$

$$[A_{сопр}] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = Дж.$$

$A_{сопр} = 10^3(900 - 2500) - 2\ 10^3 \cdot 10 \cdot 420 =$
$= -16 \cdot 10^5 - 84 \cdot 10^5 = -10$ (МДж).

Ответ: $A_{сопр} = -10$ МДж.

Задача 6.

Чему равна работа сил тяжести, совершаемая над искусственным спутником массы m, движущимся по круговой орбите радиуса R вокруг Земли со скоростью υ за один полный оборот?

Дано:	**Решение:**
m R υ	Сила тяжести является консервативной силой, так как ее работа не зависит от формы пути, а определяется только начальным и конечным положением тела. Работа консервативных сил по замкнутому контуру равна 0.
A_{mg} – ?	

За один оборот спутник пришел в ту же точку ⇒ $A_{mg} = 0$.

Ответ: $A_{mg} = 0$.

Задача 7.

С какой скоростью начали двигаться шары в результате неупругого удара шара массой m, двигавшегося со скоростью υ, с неподвижным шаром вдвое большей массы?

Дано:	**Решение:**
$m_1 = m$ $m_2 = 2m$ $\upsilon_1 = \upsilon$ $\upsilon_2 = 0$	Так как удар неупругий, к нему можно применить закон сохранения импульса, учитывая, что второй шар был неподвижен и его импульс равен 0:
υ' – ?	

в векторной форме:

$m_1\vec{\upsilon}_1 = (m_1 + m_2)\vec{\upsilon}'$.

В скалярной форме: $m\upsilon = 3m\upsilon' \Rightarrow \upsilon' = \frac{1}{3}\upsilon$.

Ответ: $\upsilon' = \frac{1}{3}\upsilon$.

Задача 8.

Тело брошено вертикально вверх со скоростью 16 $\frac{м}{с}$. На какой высоте h его кинетическая энергия равна потенциальной? Сопротивление воздуха не учитывать.

Дано:	**Решение:**
$E_{к1} = E_{п1}$ $\upsilon = 16\ \frac{м}{с}$ $h - ?$	Из закона сохранения энергии следует, что полная энергия замкнутой системы остается постоянной: $E_{полн} = const.$ $E_{полн} = E_к = \frac{m\upsilon^2}{2}$.

При равенстве $E_{к1} = E_{п1}$ на долю потенциальной приходится:

$$E_{п1} = \frac{E_{полн}}{2} = \frac{E_к}{2} = \frac{m\upsilon^2}{4}, \text{ но } E_{п1} = mgh \Rightarrow$$

$$h = \frac{\upsilon^2}{4g};\ [h] = \frac{м^2 \cdot с}{с^2 \cdot м} = м.\ h = \frac{16 \cdot 16}{40} = 6{,}4\ (м).$$

Ответ: $h = 6{,}4$ м.

Задача 9.

Два шарика, массы которых $m_1 = 200$ г и $m_2 = 300$ г, подвешены на одинаковых нитях длиной $L = 50$ см. Шарики соприкасаются. Первый шарик отклонили от положения равновесия на угол $\alpha = 90°$ и отпустили. На какую высоту поднимутся шарики после абсолютно неупругого соударения?

Дано:	СИ
$m_1 = 200$ г	$= 0{,}2$ кг
$m_2 = 300$ г	$= 0{,}3$ кг
$L = 50$ см	$= 0{,}5$ м
$\alpha = 90°$	
h – ?	

Решение:

Так как первый шарик отклонили на угол 90°, то он приобрел при этом потенциальную энергию:

$$E_n = m_1 g h_1 = m_1 g L.$$

В момент удара эта энергия на основании закона сохранения энергии переходит в кинетическую энергию первого шарика:

$$m_1 g L = \frac{m_1 \upsilon_1^2}{2} \Rightarrow \upsilon_1 = \sqrt{2gL}.$$

Так как удар абсолютно неупругий, то на основании закона сохранения импульса (рис. 66)

$$m_1 \vec{\upsilon}_1 = (m_1 + m_2)\vec{\upsilon}' \Rightarrow$$

$$\upsilon' = \frac{m_1 \upsilon_1}{m_1 + m_2} =$$

$$= \frac{m_1}{m_1 + m_2}\sqrt{2gL}.$$

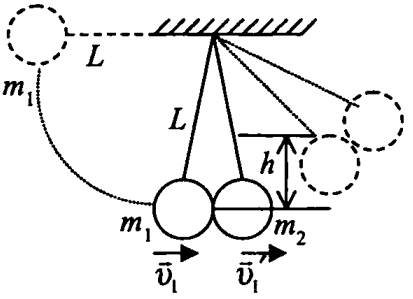


Рис. 66

С этой скоростью оба шарика начинают движение вверх по окружности до тех пор, пока не поднимутся на высоту h над положением равновесия. На основании закона сохранения энергии:

$$\frac{(m_1 + m_2)\upsilon'^2}{2} = (m_1 + m_2)gh \Rightarrow$$

$$h = \frac{\upsilon'^2}{2g} = \frac{m_1^2 2gL}{(m_1 + m_2)^2 2g} = \frac{m_1^2 L}{(m_1 + m_2)^2} =$$

$$= \frac{0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}5}{(0{,}2 + 0{,}3)^2} = 0{,}08 \text{ (м)} = 8 \text{ см}.$$

Ответ: 8 см.

Задача 10.

Сила натяжения нити L математического маятника при прохождении им положения равновесия равна $2mg$. С какой высоты над уровнем положения равновесия стартовал маятник?

1) $2L$; 2) $\frac{L}{4}$; 3) $\frac{L}{2}$; 4) L; 5) $1{,}5L$.

Дано:	**Решение:**
L $T = 2mg$	Запишем основное уравнение механики в векторной форме для маятника с учетом движения по окружности:
$h - ?$	

$$m\vec{a}_ц = \vec{T} + m\vec{g} \text{ (рис. 67).}$$

В скалярной форме:

$$ma_ц = T - mg = 2mg - mg = mg.$$

$$a_ц = \frac{\upsilon^2}{R} \Rightarrow \frac{\upsilon^2}{R} = g \Rightarrow \upsilon^2 = Rg = Lg.$$

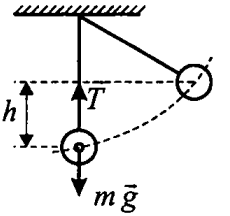


Рис. 67

По закону сохранения энергии потенциальная энергия маятника в его наивысшем положении переходит в кинетическую энергию в положении равновесия:

$$mgh = \frac{m\upsilon^2}{2} \Rightarrow h = \frac{\upsilon^2}{2g} = \frac{Lg}{2g} = \frac{L}{2}.$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 3.

Ответ: № 3.

Задача 11.

Математический маятник длиной L = 1 м совершает малые колебания. В тот момент, когда косинус угла откло-

нения маятника от вертикали равен 0,968, скорость движения маятника $\upsilon = 0{,}6\frac{м}{с}$. Чему равен косинус максимального отклонения маятника от вертикали? *(Ответ округлите до сотых).*

Дано:	**Решение:**
$L = 1$ м $\upsilon_1 = 0{,}6\frac{м}{с}$ $\cos\alpha_1 = 0{,}968$ $\cos\alpha_{max} - ?$	Из рисунка 68 $\cos\alpha_1 = \frac{L-h}{L} = 1 - \frac{h}{L} \Rightarrow$ $\frac{h}{L} = 1 - 0{,}968 = 0{,}032 \Rightarrow$ $h = 0{,}032$ (м).

По закону сохранения энергии кинетическая энергия маятника низшей точки равна сумме кинетической и потенциальной энергии маятника на высоте h относительно положения равновесия:

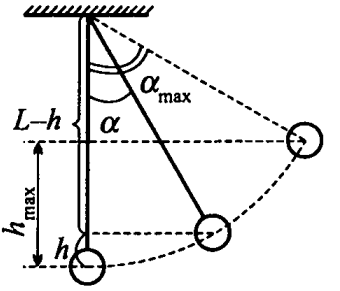


Рис. 68

$$\frac{m\upsilon_0^2}{2} = mgh + \frac{m\upsilon_1^2}{2} \Rightarrow$$

$$\upsilon_0^2 = 2gh + \upsilon_1^2 \Rightarrow \upsilon_0 = \sqrt{2\cdot 10\cdot 0{,}032 + 0{,}36} = 1\ (\frac{м}{с}).$$

При колебаниях маятника кинетическая энергия в положении равновесия переходит в потенциальную энергию максимального отклонения:

$$\frac{m\upsilon_0^2}{2} = mgh_{max} \Rightarrow$$

$$h_{max} = \frac{\upsilon^2}{2g} = \frac{1}{20} = 0{,}05 \Rightarrow$$

$$\cos\alpha_{max} = \frac{L - h_{max}}{L} = 1 - 0{,}05 = 0{,}95$$

Ответ: 0,95.

Задача 12.

Материальная точка массой 1,2 кг движется равномерно по окружности со скоростью 5 $\frac{м}{с}$. Изменение ее импульса при повороте на 90° равно:

1) 0 $\frac{кг \cdot м}{с}$; 2) 0,7 $\frac{кг \cdot м}{с}$; 3) 3,4 $\frac{кг \cdot м}{с}$;

4) 6 $\frac{кг \cdot м}{с}$; 5) 8,5 $\frac{кг \cdot м}{с}$.

Дано:
$m = 1{,}2$ кг
$\upsilon = 5\frac{м}{с}$
$\alpha = 90°$

$|\Delta(m\vec{\upsilon})| - ?$

Решение:

При повороте радиус-вектора на 90° направление импульса станет $m\vec{\upsilon}_2$. Тогда изменение импульса (рис. 69) $|\Delta(m\vec{\upsilon})|$ можно найти по теореме Пифагора (при этом $m\upsilon_1 = m\upsilon_2$):

$$\Delta(m\upsilon) = \sqrt{(m\upsilon_1)^2 + (m\upsilon_2)^2} =$$

$$= \sqrt{2(m\upsilon)^2} = m\upsilon\sqrt{2} = 1{,}2 \cdot 5\sqrt{2} =$$

$$8{,}485 \approx 8{,}5\frac{кг \cdot м}{с} \Rightarrow$$

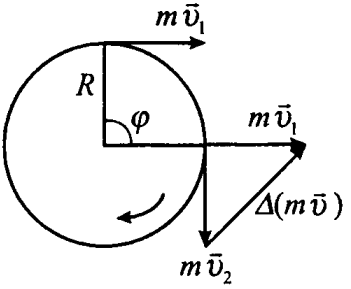


Рис. 69

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 5.

Ответ: № 5.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 3

Задача 1.

Железнодорожная платформа с закрепленным на ней орудием суммарной массой M = 20 т движется со скоростью $\upsilon_1 = 2\ \frac{м}{с}$. Из орудия выпущен снаряд массой m = 20 кг в горизонтальном направлении (рис. 70) под углом $\alpha = 60^\circ$ к направлению движения платформы со скоростью $\upsilon_2 = 700\ \frac{м}{с}$ относительно Земли. Чему была равна скорость платформы сразу после выстрела?

Рис. 70

Ответ: 1,65 $\frac{м}{с}$.

Задача 2.

Материальная точка движется равномерно по окружности со скоростью 2 $\frac{м}{с}$. Чему равна ее масса, если изменение импульса материальной точки при повороте на 180° равно 6,8 $\frac{кг \cdot м}{с}$?

Ответ: 1,7 кг.

Задача 3.

Груз массой m = 50 кг поднимается вертикально вверх под действием постоянной силы на высоту h = 10 м за время t. Если работа этой силы по подъему груза равна A = 7,5 кДж, то чему равно время подъема груза?

Ответ: 2 с.

Задача 4.

Тело брошено вертикально вверх со скоростью 16 $\frac{м}{с}$. На какой высоте кинетическая энергия тела равна его потенциальной энергии? Сопротивление воздуха не учитывать.

Ответ: 6,5 м.

Задача 5.

Граната, летевшая горизонтально со скоростью 10 $\frac{м}{с}$, разорвалась на два осколка. Больший осколок, масса которого составляла 60% массы всей гранаты, продолжал двигаться в прежнем направлении, но с увеличенной скоростью, равной 25 $\frac{м}{с}$. Найти скорость меньшего осколка.

Ответ: – 12,5 $\frac{м}{с}$.

Задача 6.

Мальчик тянет санки по горизонтальной поверхности с постоянной скоростью, прилагая к веревке силу 100 Н. Веревка образует угол 60° с горизонтом. Какую работу совершает сила трения при перемещении санок на расстояние 10 м?

Ответ: – 500 Дж.

Задача 7.

При выстреле из винтовки вертикально вверх со скоростью 300 $\frac{м}{с}$ пуля массой 10 г достигла высоты 4000 м. Какова величина работы, совершенной силой трения о воздух?

Ответ: – 50 Дж.

Задача 8.

Стальной шарик, имеющий массу 10 г и летящий со скоростью 1,41 $\frac{м}{с}$, изменяет при столкновении направление своего движения на угол 90°. Определить величину изменения импульса шарика при столкновении, если величина его скорости не изменилась.

Ответ: 0,02 $\frac{кг \cdot м}{с}$.

Задача 9.

Насос, двигатель которого развивает мощность 25 кВт, поднимает 100 м^3 нефти на высоту 6 м за 8 минут. Найти КПД установки. Плотность нефти равна $0{,}8 \cdot 10^3$ $\frac{кг}{м^3}$.

Ответ: 40%.

Задача 10.

При подготовке игрушечного пистолета к выстрелу пружину с жесткостью 800 $\frac{Н}{м}$ сжали на 5 см. Какую скорость приобретает пуля массой 20 г при выстреле в горизонтальном направлении?

Ответ: 10 $\frac{м}{с}$.

Задача 11.

Материальная точка движется равномерно по окружности со скоростью 3,2 $\frac{м}{с}$. Если изменение ее импульса за шестую часть периода равно 5,12 $\frac{кг \cdot м}{с}$, то чему равна ее масса?

Ответ: 1,6 кг.

Задача 12.

Поезд массой 1800 т, двигаясь равноускоренно по горизонтальному пути, отходит от станции с ускорением $a = 0{,}05\ \frac{м}{с^2}$. Сопротивлением движению пренебречь. Чему равна мощность силы тяги локомотива через 5 минут от момента начала движения?

Ответ: 1,35 МВт.

Тест № 3

Задача 1.

На подножку вагонетки, которая движется по рельсам со скоростью $5\ \frac{м}{с}$, прыгает человек массой 60 кг в направлении, перпендикулярном ходу вагонетки. Масса вагонетки 240 кг. Скорость вагонетки вместе с человеком стала равна:

1) $5{,}5\ \frac{м}{с}$; 2) $4{,}5\ \frac{м}{с}$; 3) $5\ \frac{м}{с}$; 4) $4\ \frac{м}{с}$; 5) $3\ \frac{м}{с}$.

Задача 2.

Два тела, летящие навстречу друг другу со скоростями $5\ \frac{м}{с}$ каждое, после абсолютно неупругого удара стали двигаться как единое целое со скоростью $2{,}5\ \frac{м}{с}$. Отношение масс этих тел равно:

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

Задача 3.

На горизонтальной поверхности тележки, масса которой M = 6 кг, лежит брусок массой m = 2 кг (рис. 71).

Коэффициент трения между бруском и тележкой $\mu = 0{,}3$. С каким минимальным ускорением a должна двигаться тележка, чтобы брусок начал скользить по ее поверхности?

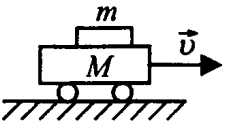


Рис. 71

1) $0{,}2\ \frac{м}{с^2}$; 2) $0{,}6\ \frac{м}{с^2}$; 3) $1{,}8\ \frac{м}{с^2}$; 4) $2{,}4\ \frac{м}{с^2}$; 5) $3{,}0\ \frac{м}{с^2}$.

Задача 4.

Изменение импульса шарика массой m, упавшего на горизонтальную плиту с высоты h_1 и подпрыгнувшего на высоту h_2, при ударе о плиту равно:

1) $m\sqrt{2g(h_1+h_2)}$; 2) $m(\sqrt{2gh_1}+\sqrt{2gh_2})$;

3) $m(\sqrt{2gh_1}-\sqrt{2gh_2}$; 4) $m\sqrt{2g(h_1-h_2)}$;

5) $2m(\sqrt{gh_1}-\sqrt{gh_2})$.

Задача 5.

КПД двигателя механизма, имеющего мощность 400 кВт и двигающегося со скоростью $10\ \frac{м}{с}$ при силе сопротивления движению 20 кН, равен:

1) 25%; 2) 40%; 3) 20%; 4) 80%; 5) 50%.

Задача 6.

Если вагон, двигающийся с некоторой скоростью, при столкновении сцепляется с другим таким же вагоном, ранее неподвижным, и далее они движутся как единое целое, то во внутреннюю энергию системы из двух вагонов переходит … кинетической энергии первого тела.

1) $\frac{1}{16}$; 2) $\frac{1}{8}$; 3) $\frac{1}{4}$; 4) $\frac{1}{2}$; 5) $\frac{3}{4}$.

Задача 7.

Пуля, летящая со скоростью υ_0, пробивает несколько одинаковых досок равной толщины и расположенных вплотную друг к другу. В какой по счету доске застрянет пуля, если ее скорость после прохождения первой доски $\upsilon_1 = 0{,}8\upsilon_0$?

1) 2; 2) 3; 3) 4; 4) 6; 5) 8.

Задача 8.

Неподвижная молекула распадается на два движущихся атома массами m_1 и m_2. Во сколько раз суммарная кинетическая энергия двух атомов больше кинетической энергии атома с массой m_2?

1) $\frac{m_1+m_2}{|m_1-m_2|}$; 2) $\frac{m_1+m_2}{m_2}$; 3) $\frac{m_1+m_2}{m_1}$;

4) $\left(\frac{m_1+m_2}{m_2}\right)^2$; 5) $\left(\frac{m_1+m_2}{m_1}\right)^2$.

Задача 9.

Спутник запускается на круговую околоземную орбиту на высоту над поверхностью Земли $h << R_з$. Массу спутника увеличили вдвое. Как изменилась его первая космическая скорость?

1) увеличилась в 4 раза; 2) увеличилась в 2 раза;
3) не изменилась; 4) уменьшилась в 2 раза;
5) уменьшилась в 4 раза.

Задача 10.

Тело массой 0,5 кг бросили вертикально вверх со скоростью 20 $\frac{м}{с}$. Если за все время полета сила сопротивления совершила работу, модуль которой равен 36 Дж, то тело упало обратно на Землю со скоростью:

1) 20 $\frac{м}{с}$; 2) 16 $\frac{м}{с}$; 3) 12 $\frac{м}{с}$; 4) 10 $\frac{м}{с}$; 5) 8 $\frac{м}{с}$.

Задача 11.

Для того чтобы лежащий на земле однородный стержень длиной 3 м и массой 10 кг поставить вертикально, нужно совершить работу, равную:

1) 150 Дж; 2) 300 Дж; 3) 200 Дж;
4) 400 Дж; 5) 100 Дж.

Задача 12.

Мощность подъемного крана, поднимающего равномерно со скоростью 0,1 $\frac{м}{с}$ груз массой 4 т при общем к.п.д. установки 40% равна:

1) 16 кВт; 2) 4 кВт; 3) 1 кВт; 4) 40 кВт; 5) 10 кВт.

1.4. СТАТИКА

Программа по статике содержит следующие вопросы:

Принцип суперпозиции сил. Простые механизмы.

Момент силы. Условие равновесия рычага. Условие равновесия тела, не имеющего оси вращения. Центр тяжести.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Статика — это раздел механики, изучающий равновесие тел.

1.4.1. Равновесие тела

Равновесие — это сохранение телом состояния покоя или движения с течением времени.

Силы, действующие на тело, могут вызвать как поступательное, так и вращательное движение тела вокруг некоторой оси. ⇒

Равновесие осуществляется при сохранении:

- скорости поступательного движения и
- угловой скорости вращательного движения.

Первое условие равновесия: для равновесия тела, не имеющего оси вращения, необходимо, чтобы геометрическая сумма всех сил, приложенных к нему, равнялась нулю:

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

Это означает, что сумма проекций векторов сил, приложенных к телу, на любую ось была равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{n} F_x = 0; \sum_{i=1}^{n} F_y = 0; \sum_{i=1}^{n} F_z = 0.$$

1.4.2. Центр масс

Центром масс называется точка пересечения прямых, вдоль которых направлены силы, вызывающие только поступательное движение тела.

При любом положении тела равнодействующая сил тяжести, приложенных ко всем частицам тела, проходит через центр масс. Поэтому центр масс тела называют также ***центром тяжести***.

Центры масс правильных однородных геометрических тел лежат в их ***геометрических центрах***.

Определение центра масс тел неправильной формы основано на совпадении центра масс с центром тяжести: тело подвешивается в одной точке и определяется линия подвеса, проходящая через центр тяжести, а затем подвешивается в другой точке. Центр тяжести находится на пересечении двух линий подвеса.

Для определения центра тяжести тела неправильной формы можно также предположить его месторасположение и считать, что в этой точке тело подвешено и поэтому будет находиться в равновесии, а затем применить условия равновесия.

1.4.3. Виды равновесия

В зависимости от того, как изменяется положение центра масс, различают три ***вида равновесия*** тела:

- ***устойчивое равновесие***: тело, выведенное из положения равновесия в ближайшее положение, а потом предоставленное само себе, вернется в это положение (рис. 72, а); центр масс занимает наинизшее положение из всех возможных ближайших положений, т.е. при смещении тела центр масс поднимается, а в этом — ***потенциальная энергия минимальна;***
- ***неустойчивое равновесие***: тело, выведенное из положения равновесия в ближайшее положение, а потом предоставленное само себе, будет еще больше отклоняться от этого положения (рис. 72б); центр масс занимает наивысшее положение из всех возможных ближайших положений, т.е. при смещении тела центр масс опускается, а в этом — ***потенциальная энергия максимальна***;
- ***безразличное равновесие***: тело, выведенное из положения равновесия в ближайшее положение, а по-

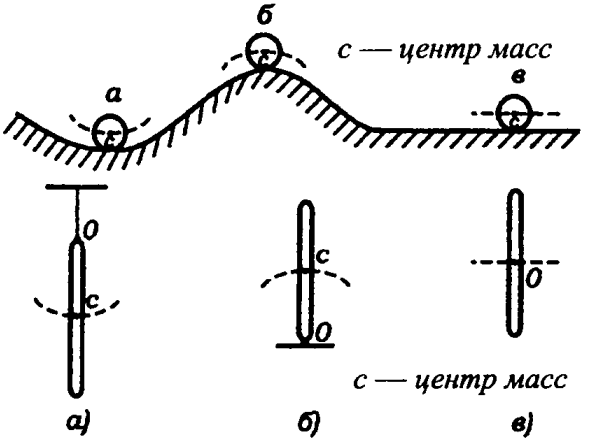


Рис. 72

том предоставленное само себе, остается в новом положении (рис. 72, в); при смещении тела центр масс остается на том же уровне — ***потенциальная энергия постоянна.***

1.4.4. Устойчивость

Тело, опирающееся на горизонтальную плоскость, находится в равновесии, если вертикаль, проведенная через центр масс тела, проходит *внутри* (или по границе) *площади опоры,* так как в этом случае сила тяжести уравновешивается силой реакции опоры. Положение тела в этом случае устойчиво (рис. 73).

Если же эта вертикаль проходит вне указанного контура, то равновесие неустойчиво и при малейшем толчке тело опрокидывается.

В этом случае сила тяжести создает момент относительно границы площади опоры, опрокидывающий тело.

Устойчивость тела тем выше, чем:

- больше вес тела;
- больше площадь опоры;
- ниже приложена опрокидывающая сила.

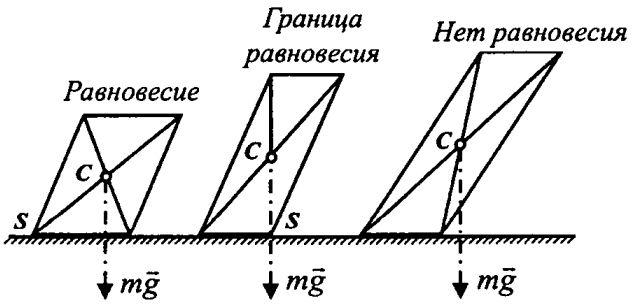


Рис. 73

1.4.5. Правило моментов

Сила, приложенная к твердому телу, которое может вращаться вокруг некоторой точки, создает момент силы. Действие момента силы аналогично действию *пары сил* (рис. 74).

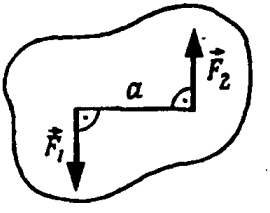


Рис. 74

Моментом силы $\vec{F}$ относительно оси вращения называется величина, численно равная:

$M = Fl$,

где l — ***плечо силы*** — кратчайшее расстояние от ***линии*** действия силы до оси вращения (рис. 75).

$[M]$ = Нм.

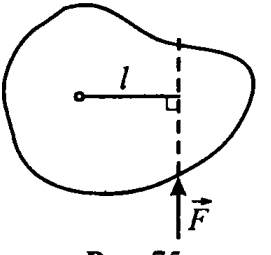


Рис. 75

Второе условие равновесие или ***условие равновесия тел с закрепленной осью вращения***: тело, способное вращаться вокруг закрепленной оси, находится в равновесии, если ***алгебраическая*** сумма моментов приложенных к нему сил относительно этой оси равна нулю:

$F_1 l_1 = F_2 l_2$.

Это условие называется еще ***правилом моментов.***

Моменты, вращающие тело по часовой стрелке, считаются ***отрицательными*** (как и углы в геометрии), против часовой стрелки — ***положительными***.

Момент силы является ***мерой вращательного движения***, т.е. если момент сил есть, то тело вращается, а если момент силы равен нулю, тело движется поступательно или находится в покое.

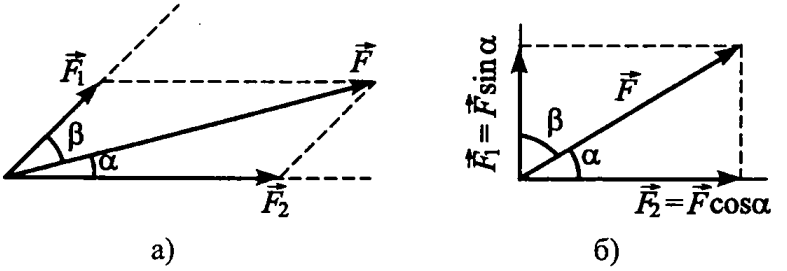
1.4.6. Суперпозиция сил

Силы — векторные величины. Они характеризуются ***величиной*** и ***направлением*** действия. Если на тело действуют несколько сил, их можно свести к одной ***равнодействующей***.

Объединение составляющих в равнодействующую называется ***суперпозицией сил*** (***супер*** означает сверх; суперпозиция — наложение одной позиции на другую).

Для ***сил, приложенных в одной точке,*** она означает операцию геометрического сложения (рис. 76, а), т.е. ***сложения векторов по правилу параллелограмма*** (см. векторы).

Часто возникает задача разложения данной силы на две взаимно перпендикулярные составляющие (рис. 76, б):



а) б)

Рис. 76

Для сложения ***сил, приложенных к разным точкам***, следует переместить силы вдоль линии их действия до точки пересечения и затем определить равнодействующую по правилу параллелограмма (рис. 77).

Такое построение позволяет определить величину и направление равнодействующей, но и точку ее приложения.

Равнодействующая двух параллельных сил, направленных в одну сторону (рис. 78):

- равна их сумме;
- направлена в ту же сторону;

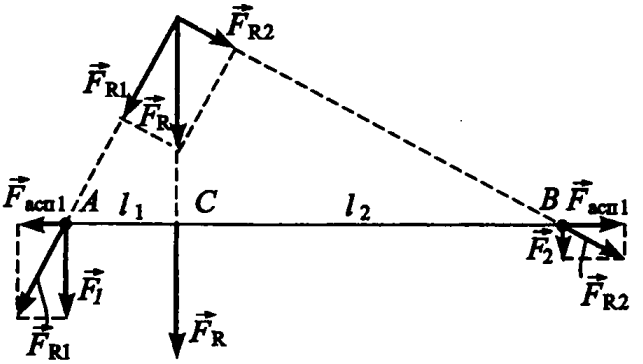


Рис. 77

- находится между силами;
- делит отрезок, соединяющий эти силы, на части, обратно пропорциональные силам:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1},$$

т.е. выполняется ***правило моментов***.

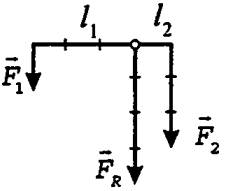


Рис. 78

Если силы параллельны, но направлены в противоположные стороны (антипараллельны), то равнодействующая определяется тем же способом, но точка приложения равнодействующей в этом случае находится не между точками приложения данных сил, а по одну сторону от них (рис. 79).

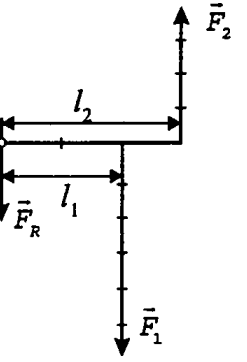


Рис. 79

1.4.7. Простые механизмы

Простые механизмы служат для того, чтобы изменять величину и направление приложенных сил при неизменной затрате работы. При этом в силу вступает «***золотое***

правило механики»: то, что удается выиграть в силе, приходится проигрывать в перемещении.

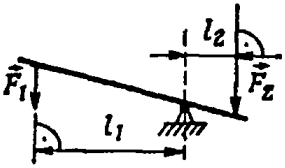


Рис. 80

К простым механизмам относятся:

- рычаг — тело, вращающееся вокруг некоторой оси; у ***одноплечного рычага*** ось расположена на одном из концов и силы, действующие на него, антипараллельны (рис. 80); у ***двуплечного рычага*** ось расположена между точками приложения сил и силы параллельны (рис. 81);

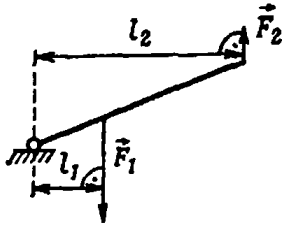


Рис. 81

- неподвижный блок (рис. 82), действующий аналогично равноплечному рычагу. Моменты сил, действующие с обеих сторон блока, одинаковы, а, значит, одинаковы и силы, создающие эти моменты:
  $F_1 = F_2$;

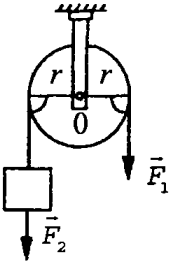


Рис. 82

- подвижный блок (рис. 83) действует аналогично одноплечному рычагу: относительно центра вращения O действуют моменты сил, которые при равновесии должны быть равны:
  $F_1 2r = F_2 r \Rightarrow$

Сила равна половине нагрузки:

$$F_1 = \frac{F_2}{2}.$$

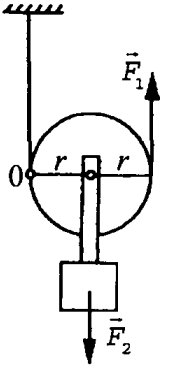


Рис. 83

- наклонная плоскость (см. п. 1.2.2.5);
- клин, состоящий из двух наклонных плоскостей, основания которых соприкасаются;
- винт — наклонная плоскость, навитая на ось.

Указания к решению задач по статике

1. Сделать сопроводительный чертеж, обозначить на нем все силы, действующие на тело.

2. Если тело ***не имеет оси вращения***, написать уравнение, выражающее первое условие равновесия:

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

в векторной форме, а затем — в скалярной.

3. Если в задаче требуется определить момент, когда тело начнет опрокидываться, то есть терять устойчивость, то рисунок нужно делать таким образом, чтобы вертикаль, проведенная через центр масс, граничила с площадью опоры.

4. Если тело ***имеет ось вращения***, то нужно на чертеже не только обозначить действующие силы, но и плечи сил, выбрать точку приложения равнодействующей силы.

5. Написать уравнение, выражающее второе условие равновесия, в этом случае:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = 0.$$

При этом необходимо учитывать знак моментов сил.

6. Исходя из природы сил, выразить силы через величины, от которых они зависят, и решить полученную систему уравнений относительно искомых величин.

Примеры решения задач

Задача 1.

Тетива лука в месте контакта со стрелой образует угол 90°. Найдите величину силы, действующей на стрелу со стороны тетивы, если ее натяжение равно 500 Н. Стрела расположена симметрично относительно тетивы.

Дано:
$\alpha = 90°$
$T = 500$ Н
$R - ?$

Решение:

Из рисунка 84 видно, что искомая сила R является равнодействующей двух сил натяжения тетивы T, а так как эти силы направлены под углом 90°, то ее можно найти по теореме Пифагора:

$$R = T\sqrt{2} = 707 \text{ Н}.$$

Ответ: $R = 707$ Н.

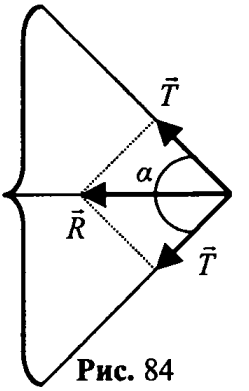


Рис. 84

Задача 2.

Однородная лестница прислонена к идеальной гладкой стене. При каком предельном угле наклона лестницы к полу она еще не проскальзывает, если коэффициент трения между полом и лестницей μ ?

Дано:
μ
$\alpha - ?$

Решение:

1. Выберем систему отсчета, как показано на рисунке 85.

2. Найдем приложенные к лестнице силы.

На лестницу действуют сила тяжести F, приложенная к центру, сила трения покоя $F_{тр}$, направленная в сторону, противоположную возможному движению нижнего конца лестницы, и силы реакции опоры N_1 и N_2, перпендикулярные опорам.

3. Запишем первое условие равновесия:

$$\vec{F} + \vec{F}_{тр} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 = 0$$

В скалярном виде:

OX: $F_{тр} - N_1 = 0$;

OY: $N_2 - F = 0$.

4. Проведем ось через точку O, через которую проходят линии действия сил N_2 и $F_{тр}$, так

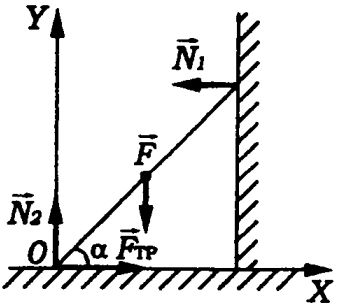


Рис. 85

как при таком выборе моменты этих сил равны нулю (ось перпендикулярна плоскости чертежа).

5. Запишем второе условие равновесия из правила моментов, введя l — длину лестницы:

$$F\frac{l}{2}\cos\alpha - N_1 l\sin\alpha = 0.$$

6. Выразим силы через величины, от которых они зависят:

$F = mg$; $F_{тр} = \mu N_2$.

Решая систему уравнений, получим:

$$\begin{cases} N_1 = \mu N_2 \\ N_2 = mg \\ \frac{1}{2}mg\cos\alpha - N_1\sin\alpha = 0 \end{cases} \Rightarrow \operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{2\mu} \Rightarrow \alpha = \operatorname{arctg}\frac{1}{2\mu}.$$

Ответ: $\alpha = \operatorname{arctg}\frac{1}{2\mu}$.

Задача 3.

Лестница массой m и длиной l прислонена к стенке под углом α (рис. 86). Человек тянет лестницу за ее середину в горизонтальном направлении. Минимальная величина силы, которую он должен приложить к лестнице, чтобы оторвать ее верхний конец от стены, равна F. На каком расстоянии h от пола находится центр масс лестницы?

Дано:	**Решение:**
m	Запишем правило моментов сил относительно нижнего конца лестницы:
l	
α	
F	
$h - ?$	

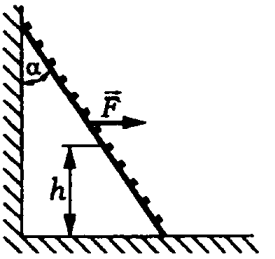


Рис. 86

$$mgh\mathrm{tg}\alpha = F\frac{l}{2}\cos\alpha \Rightarrow$$

$$h = \frac{1}{2}\cdot\frac{Fl}{mg}\cdot\frac{\cos^2\alpha}{\sin\alpha}.$$

Ответ: $h = \frac{1}{2}\cdot\frac{Fl}{mg}\cdot\frac{\cos^2\alpha}{\sin\alpha}$.

Задача 4.

На концах стержня длиной l и массой m укреплены два шара радиусами R_1 и R_2 и массами m_1 и m_2 ($R_2 > R_1$ и $m_2 > m_1$). Найти центр масс такой системы (штанги).

Дано:
m
l
$R_2 > R_1$
$m_2 > m_1$
$x - ?$

Решение:

Выберем систему отсчета, как показано на рисунке 87. Полагая, что центр тяжести системы есть точка С, будем считать, что штанга имеет здесь точку опоры. На штангу действуют сила тяжести стержня $m\vec{g}$ и силы тяжести шаров $m_1\vec{g}$ и $m_2\vec{g}$.

Штанга будет находиться в равновесии, если будет выполняться правило моментов относительно точки С.

Запишем правило моментов относительно оси вращения, проходящей через точку С:

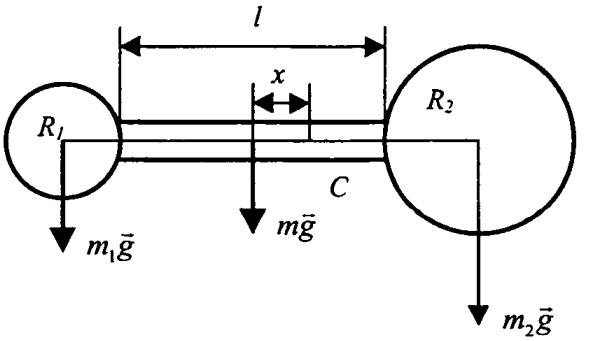


Рис. 87

$$m_2g(R_2+\frac{l}{2}-x)=m_1g(R_1+\frac{l}{2}+x)+mgx \Rightarrow$$

$$x=\frac{m_2\left(R_2+\frac{l}{2}\right)-m_1\left(R_1+\frac{l}{2}\right)}{m_1+m_2+m}.$$

Таким образом, для определения центра масс системы тел надо выбрать точку опоры и рассчитать, при каких значениях моментов сил система будет находиться в равновесии.

Ответ: $x=\dfrac{m_2\left(R_2+\frac{l}{2}\right)-m_1\left(R_1+\frac{l}{2}\right)}{m_1+m_2+m}$.

Задача 5.

Два тела, массы которых m_1 и m_2, связанные тонким невесомым стержнем длины L, приводят во вращение в горизонтальной плоскости относительно центра масс системы с угловой скоростью ω. Чему равен в этих условиях модуль силы, действующей на первое тело со стороны стержня?

Дано:
m_1
m_2
ω
L

F_1 – ?

Решение:

Так как вся система вращается (рис. 88), то сила F_1, действующая на первое тело со стороны стержня:

$$F_1=m_1a_ц=m_1\omega^2l_1.$$

Для нахождения l_1 запишем второе условие равновесия (правило моментов):

$$m_1l_1g=m_2l_2g \Rightarrow$$
$$m_1l_1=m_2l_2.$$
$$l_2=L-l_1 \Rightarrow$$
$$m_1l_1=m_2(L-l_1) \Rightarrow$$

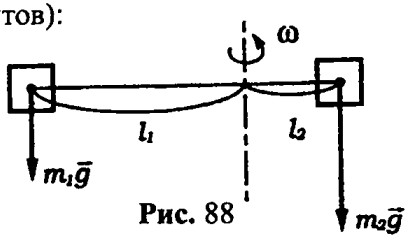


Рис. 88

$$l_1 = \frac{m_2 L}{m_1 + m_2} \Rightarrow$$

$$F_1 = \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot \omega^2 \cdot L}{m_1 + m_2}.$$

Ответ: $F_1 = \dfrac{m_1 \cdot m_2 \cdot \omega^2 \cdot L}{m_1 + m_2}$.

Задача 6.

Пять шаров, массы которых последовательно равны 1 кг, 2 кг, 3 кг, 4 кг и 5 кг, укреплены на стержне так, что их центры находятся на равном расстоянии друг от друга (рис. 89). Пренебрегая массой стержня, найти центр масс системы.

Дано:
$m_1 = 1$ кг
$m_2 = 2$ кг
$m_3 = 3$ кг
$m_4 = 4$ кг
$m_5 = 5$ кг

$x - ?$

Решение:

Расставим силы, как показано на рисунке 90. Центр масс системы находится в точке приложения равнодействующей.

Мысленно закрепим один из концов стержня. Так как равнодействующая заменяет со-

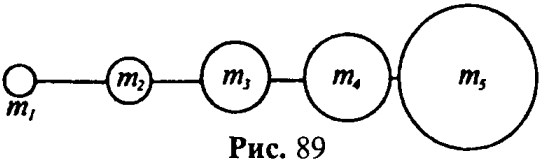


Рис. 89

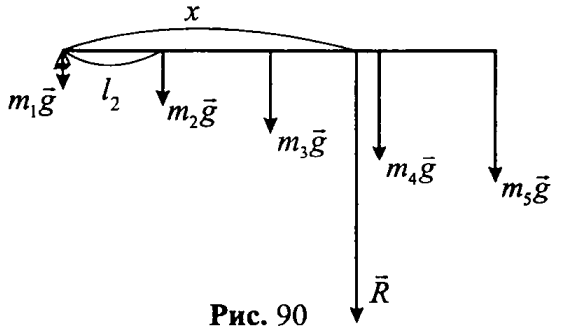


Рис. 90

бой действие составляющих сил, момент равнодействующей относительно любой оси (точки вращения) равняется сумме моментов составляющих относительно той же оси:

$$Rx = m_1 g \cdot 0 + m_2 g l_2 + m_3 g \frac{l}{2} + m_4 g \frac{3l}{4} + m_5 g l$$

$$R = m_1 g + m_2 g + m_3 g + m_4 g + m_5 g$$

$$x = \frac{m_2 g l + 2m_3 g l + 3m_4 g l + 4m_5 l}{4g(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)} =$$

$$= \frac{m_2 + 2m_3 + 3m_4 + 4m_5}{4(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)} l = \frac{2 + 6 + 12 + 20}{4 \cdot 15} l = \frac{2}{3} l \Rightarrow$$

Центр масс системы из пяти шаров находится на расстоянии $\frac{2}{3}$ длины стержня от его начала.

Ответ: $x = \frac{2}{3} l$.

Задача 7.

К валу приложен вращающий момент 100 Н·м. На вал насажено колесо диаметром 0,5 м. Какую минимальную касательную тормозящую силу следует приложить к ободу колеса, чтобы колесо не вращалось?

Дано:
$M = 100$ Н·м
$D = 0{,}5$ м
$F_{торм}$ – ?

Решение:

Вращающий момент равен тормозящему ⇒

$$M_{вр} = F_{торм} \cdot R = F_{торм} \cdot \frac{D}{2} \Rightarrow$$

$$F_{торм} = \frac{2M_{вр}}{D} = 400 \text{ Н}.$$

Ответ: $F_{торм} = \frac{2M_{вр}}{D} = 400$ Н.

Задача 8.

Чему равно натяжение нити длины $L = R$, на которой подвешен к гладкой вертикальной стене, как показано на рисунке 91, шар массой m и радиусом R?

Дано:
$L = R$
m
$T - ?$

Решение:

Так как $L = R$, то гипотенуза образовавшегося треугольника равна $2R$. $\Rightarrow$

Зная, что сторона, лежащая против угла 30°, равна половине гипотенузы $\Rightarrow \alpha = 30°$, $\Rightarrow$

сила натяжения нити:

$$T = \frac{mg}{\cos\alpha} = \frac{2mg}{\sqrt{3}}.$$

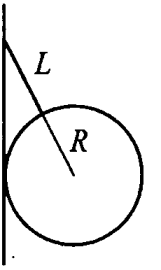


Рис. 91

Ответ: $T = \frac{2mg}{\sqrt{3}}$.

Задача 9.

Тело взвешивают на весах с длинными плечами l_1 и l_2. Когда тело находится на левой чашке, его уравновешивают грузом М. Если отношение $\frac{m}{M} = \frac{1}{9}$, то оношение $\frac{l_2}{l_1}$ равно (рис. 92):

1) $\frac{1}{3}$; 2) $\frac{1}{\sqrt{3}}$; 3) 1; 4) $\sqrt{3}$; 5) 3.

Дано:
$\frac{m}{M} = \frac{1}{9}$
$\frac{l_2}{l_1} - ?$

Решение:

В задаче участвует еще одно тело. Обозначим его массу m_1 и рассмотрим первый случай (рис. 93). По правилу моментов:

$$m_1 g l_1 = m_1 g l_2 \Rightarrow$$

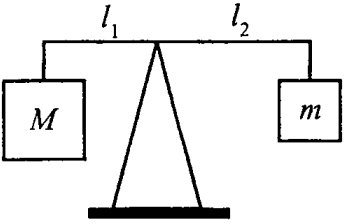


Рис. 92

$m_1 l_2 = M_1 l_1$.

Соответственно для второго случая:

$Mgl_1 = m_1 g l_2 \Rightarrow$

$m_1 l_2 = M_1 l_1$.

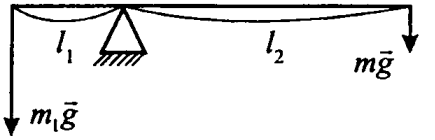


Рис. 93

Из условия задачи:

$$\frac{m}{M} = \frac{1}{9} \Rightarrow M = 9m \Rightarrow$$

$$\begin{cases} m_1 l_1 = m l_2 \\ m_1 l_2 = 9\, m l_1. \end{cases}$$

Разделив одно равенство на другое, получим:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{l_2}{9 l_1} \Rightarrow 9\, l_1^2 = l_2^2 \Rightarrow 3 l_1 = l_2 \Rightarrow \frac{l_1}{l_2} = 3. \Rightarrow$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 5.

Ответ: № 5.

Задача 10.

Лежащая на земле труба массой 2 т, которую подъемный кран приподнимает за один из ее концов, вторым своим концом действует на землю с силой:

1) 2 кН; 2) 20 кН;
3) 1 кН; 4) 5 кН;
5) 10 кН.

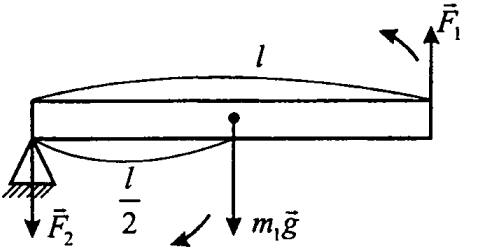


Рис. 94

Дано:	**СИ**
$m = 2$ т	$=2\cdot10^3$ кг
$F_2 - ?$	

Решение:

Сила F_2, с которой труба действует на землю, равна по величине силе F_1,

с которой кран приподнимает ее за один из концов.

Согласно правилу моментов (рис. 94):

$$F_1 l = mg\frac{l}{2} \Rightarrow F_1 = \frac{mg}{2} \cdot F_2 = \frac{mg}{2} =$$

$$= \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 10}{2} = 10^4 \text{ (Н)} = 10 \text{ (кН)}. \Rightarrow$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 5.

Ответ: № 5.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 4

Задача 1.

К концам стержня массой 1 кг и длиной 60 см подвешены грузы массами 1 кг и 2 кг. Где надо подпереть стержень, чтобы он остался в равновесии?

Ответ: 37,5 см от конца с грузом в 1 кг.

Задача 2.

Найти равнодействующую трех сил по 15 Н каждая, если углы между силами 60°. Силы действуют в одной плоскости.

Ответ: 30 Н.

Задача 3.

При постепенном увеличении угла наклона плоскости, на которой стоит цилиндр радиуса R и высоты h, возможно его скольжение или опрокидывание. Определить критическое значение коэффициента трения μ, при котором оба эти явления происходят одновременно.

Ответ: $\frac{2R}{h}$.

Задача 4.

К концам нити, перекинутой через два блока (рис. 95), подвешены два одинаковых груза массами m = 5 кг. Какой груз нужно подвесить к нити между блоками, чтобы при равновесии угол был равен $\alpha = 120°$?

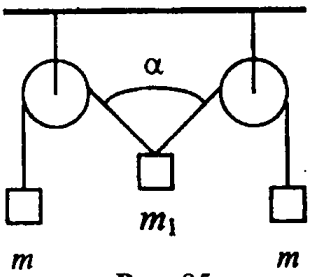


Рис. 95

Ответ: 5 кг.

Задача 5.

С помощью каната, перекинутого через неподвижный блок, укрепленный под потолком, человек с массой тела 70 кг удерживает на весу груз массой 40 кг. Если канат, который держит человек, направлен вертикально, то чему равна сила давления человека на пол?

Ответ: 300 Н.

Задача 6.

К ободу колеса с силой 500 Н прижимается тормозная колодка. Коэффициент трения равен 0,5. Чему равен тормозящий момент относительно оси колеса, если радиус колеса равен 10 см?

Ответ: 25 Н·м.

Задача 7.

На реактивный самолет действуют в вертикальном направлении сила тяжести 550 кН и подъемная сила 555 кН, а в горизонтальном направлении — сила тяги 162 кН и сила сопротивления воздуха 150 кН. Найти равнодействующую (по модулю и направлению).

Ответ: 13 кН; 23° к горизонту.

Задача 8.

Чему равна сумма моментов двух сил $F_1 = 3$ Н и $F_2 = 4$ Н, приложенных в точке A (рис. 96) к диску радиусом 1 м, могущему вращаться вокруг оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости чертежа, относительно этой оси?

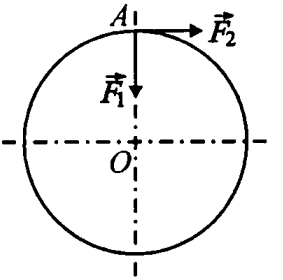


Рис. 96

Ответ: 4 Н·м.

Задача 9.

Доска массой 10 кг подперта на расстоянии $\frac{1}{4}$ ее длины. Какую силу, перпендикулярную доске, надо приложить к ее короткому концу, чтобы удержать доску в равновесии?

Ответ: 100 Н.

Задача 10.

Найти величину и точку приложения равнодействующей двух параллельных сил 200 Н и 500 Н противоположного направления, если расстояние между точками приложения равно 45 см.

Ответ: 300 Н; 30 см; 75 см.

Тест № 4

Задача 1.

Лодка длиной 6 м при переходе человека, масса которого вдвое меньше массы лодки, с носа лодки на корму переместится относительно воды на (сопротивлением движения лодки в воде пренебрегаем):

1) 2 м; 2) 1,5 м; 3) 1 м; 4) 6 м; 5) 4 м.

Задача 2.

Тело массой 900 г взвешивают на весах с разными плечами. Когда тело находится на левой чаше, его уравновешивают грузом 0,3 кг. Если тело положить на правую чашу весов, то его можно уравновесить грузом массой (рис. 97):

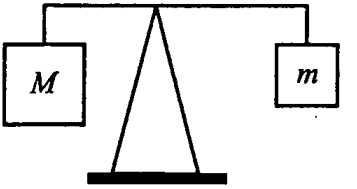


Рис. 97

1) 2,7 кг; 2) 3 кг; 3) 6,6 кг; 4) 8,5 кг; 5) 9 кг.

Задача 3.

Если тетива лука в месте контакта со стрелой, расположенной симметрично относительно тетивы, образует со стрелой угол 60° и натяжение тетивы равно 600 Н, то на стрелу со стороны тетивы действует сила:

1) 300 Н; 2) 600 Н; 3) 1200 Н;
4) $600\sqrt{3}$ Н; 5) $300\sqrt{3}$ Н.

Задача 4.

На плоскости, имеющей угол наклона к горизонту α, стоит цилиндр радиусом R. Какова наибольшая высота цилиндра h, при которой он еще не опрокидывается? Цилиндр однородный.

1) $h = 2R \sin \alpha$; 2) $h = R \operatorname{tg} \alpha$; 3) $h = 4R \sin \alpha$;
4) $h = 2R \operatorname{tg} \alpha$; 5) $h = 2R \operatorname{ctg} \alpha$.

Задача 5.

Однородный стержень массой m, две трети которого выступают за край стола, находится в равновесии. Если к концу стержня, лежащего на столе, приложена вертикальная сила, то минимальное значение ее равно:

1) $\frac{1}{3}mg$; 2) $\frac{2}{3}mg$; 3) $\frac{1}{2}mg$; 4) $\frac{3}{4}mg$; 5) mg.

Задача 6.

Горизонтальная сила F, которую нужно приложить в точке A к колесу массой m (рис. 98), чтобы закатить его на ступеньку высотой, равной радиусу колеса, равна:

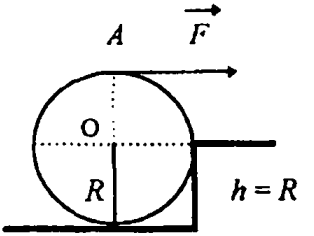


Рис. 98

1) mg; 2) $\sqrt{2}\,mg$; 3) $\frac{\sqrt{2}}{2}mg$; 4) $\frac{1}{2}mg$; 5) $2mg$.

Задача 7.

Невесомый стержень АВ (рис. 99), закрепленный в шарнире А, удерживается в равновесии горизонтальной проволокой ВС. К концу стержня подвешен груз массой M = 3 кг. Определить натяжение проволоки ВС, если угол α, образованный стержнем с вертикалью, равен 45°.

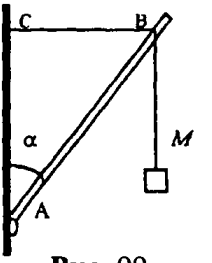


Рис. 99

1) 42,4 Н; 2) 30 Н; 3) 21,4 Н; 4) 15 Н; 5) 60 Н.

Задача 8.

К ободу колеса диаметром 60 см приложена касательная сила 100 Н. Какой минимальный вращательный момент может заставить колесо вращаться?

1) 100 Н·м; 2) 50 Н·м; 3) 600 Н·м;
4) 30 Н·м; 5) 60 Н·м.

Задача 9.

На двух концевых опорах лежит балка длиной L = 6 м, к которой подвешен груз массой m = 3 т на расстоянии l = 2 м от одного из концов. Определить силы, действующие на опоры (вес балки не учитывать).

1) 15 кН; 15 кН; 2) 20 кН; 10 кН; 3) 25 кН; 5 кН;
4) 10 кН; 30 кН; 5) 20 кН; 20 кН.

Задача 10.

На двух параллельных пружинах одинаковой длины висит невесомый стержень длиной L. Жесткость пружин K_1 и K_2. На каком расстоянии l от первой пружины нужно подвесить груз, чтобы стержень оставался горизонтальным?

1) $\frac{K_2 L}{K_1 + K_2}$; 2) $L\frac{K_1}{K_2}$; 3) $L\frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2}$;

4) $L\frac{K_1 + K_2}{K_1 - K_2}$; 5) недостаточно данных.

Задача 11.

Тело взвешивают на весах с длинами плеч l_1 и l_2. Когда тело находится на правой чаше, его уравновешивают грузом массой 160 г. Если $\frac{l_2}{l_1} = 2$, то масса тела равна (рис. 100):

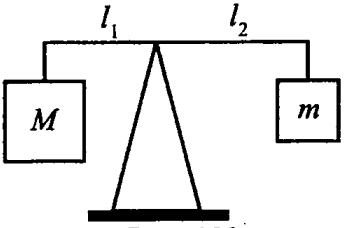


Рис. 100

1) 29 г; 2) 40 г; 3) 60 г; 4) 80 г; 5) 134 г.

Задача 12.

Однородное тело правильной геометрической формы массой 5 кг подвешено на двух нитях, составляющих угол $\alpha = 60°$ с вертикалью. При этом сила натяжения одной нити равна (рис. 101):

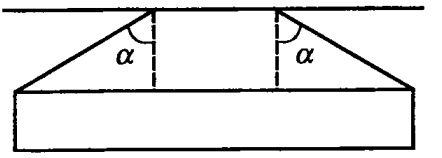


Рис. 101

1) 25 Н; 2) 50 Н; 3) 100 Н;

4) $25\sqrt{3}$ Н; 5) $50\sqrt{3}$ Н.

ГЛАВА 2. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Программа по этому разделу физики содержит следующие вопросы:

Давление. Атмосферное давление. Изменение атмосферного давления с высотой. Закон Паскаля для жидкостей и газов. Барометры и манометры. Барометр-анероид. Сообщающиеся сосуды. Принцип устройства гидравлического пресса.

Архимедова сила для жидкостей и газов. Условия плавания тел на поверхности жидкостей.

Движение жидкости по трубам. Зависимость давления жидкости от скорости ее течения.

Измерение расстояний, промежутков времени, силы, объема, массы, атмосферного давления.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

2.1. ДАВЛЕНИЕ

2.1.1. Давление. Единицы давления

Сила нормального давления:

$F_{н.д.} = F\cos\alpha,$

где α — угол между вектором $\vec{F}$ и нормалью к площадке $\vec{n}$ (рис. 102).

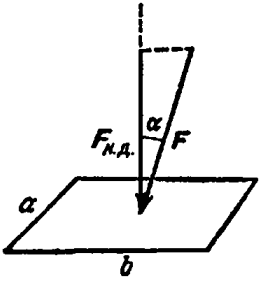


Рис. 102

Давление — скалярная величина, равная отношению модуля силы нормального давления к площади поверхности, на которую эта сила действует:

$$p = \frac{F_{н.д.}}{S} = \frac{F\cos\alpha}{S}.$$

$$[p] = \frac{Н}{м^2} = Па$$ = Паскаль.

Если давление постоянно во всех элементах плоской поверхности и сила F действует перпендикулярно площади S, то

$$p = \frac{F}{S}.$$

Внесистемные единицы давления:

- физическая атмосфера (нормальное атмосферное давление):
  1 атм = $1{,}013 \cdot 10^5$ Па;
- техническая атмосфера: 1 ат = $0{,}98 \cdot 10^5$ Па;
- 1 мм ртутного столба или Торр (по имени Торричелли):
  1 мм рт. ст. = 133,3 Па
  (1 атм = 760 мм рт. ст.);
- 1 бар = 10^5 Па (1 атм = 1,013 бар).

2.1.2. Атмосферное давление

Атмосферное давление — это давление, оказываемое столбом атмосферы, окружающей Землю.

Опыт Торричелли продемонстрировал его наличие и позволил впервые его измерить. Этот опыт состоял в следующем: стеклянная трубка длиной один метр, запаянная с одного конца, наполнялась ртутью; открытый ее конец зажимался, трубка перевертывалась и опускалась зажатым концом в сосуд с ртутью, после чего зажим снимался. Часть ртути выливается в сосуд, и уровень ртути в трубке несколько опускается и устанавливается на таком уровне, что столбик ртути в трубке устанавливается выше уровня ртути в сосуде (рис. 103).

Этот уровень не зависит от того, будет ли трубка установлена строго вертикально или под некоторым углом. Это следует из того, что давление в жидкости зависит только от уровня жидкости и не зависит от формы сосуда.

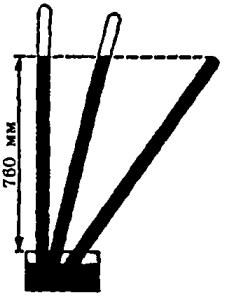


Рис. 103

Вверху над ртутью в трубке находятся ***пары ртути — торричеллиева пустота.***

Приборы, применяемые для измерения атмосферного давления, называются ***барометрами***.

Ртутный барометр представляет собой трубку Торричелли с прикрепленной к ней шкалой для отсчета высоты столба ртути, уравновешивающего атмосферное давление.


Рис. 104

В так называемом ***сифонном барометре*** (рис. 104) столб ртути, уравновешивающий атмосферное давление, определяется разностью уровней ртути в закрытом и открытом коленах.

Металлический барометр — анероид (рис. 105) — состоит из металлической коробки, из которой выкачан воздух, закрытой упругой (волнистой — для увеличения ее подвижности) крышкой. Крышка при помощи системы рычагов соединена со стрелкой, которая указывает на шкале атмосферное давление.

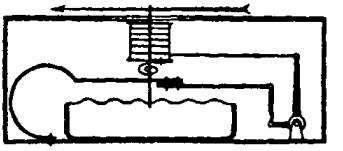


Рис. 105

Манометром называется прибор для измерения давления. Большие давления газа измеряются ***металлическим манометром***; для измерения очень малых давлений (вакуума) применяют ***закрытый жидкостный манометр***.

По мере удаления от поверхности Земли атмосферное давление ***убывает***: при подъеме на каждые 8 м вблизи земной поверхности атмосферное давление падает на 100 Па = 1 мбар.

Для измерения давления крови человека применяются ***тонометры***.

Роль атмосферного давления:

- только благодаря наличию атмосферного давления действуют пипетки, шприцы, поршни, насосы, медицинские банки;
- подъем альпинистов должен происходить с созданием базового лагеря для адаптации организма к новому давлению.

2.1.3. Закон Паскаля. Гидравлический пресс

Закон Паскаля: жидкости или газы передают оказываемое на них давление одинаково по всем направлениям.

Это давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью (или газом).

На законе Паскаля основано действие гидравлического пресса.

Гидравлический пресс — это устройство, позволяющее получить выигрыш в силе во столько раз, во сколько раз площадь большого поршня S_2 больше площади S_1 малого (рис. 106):

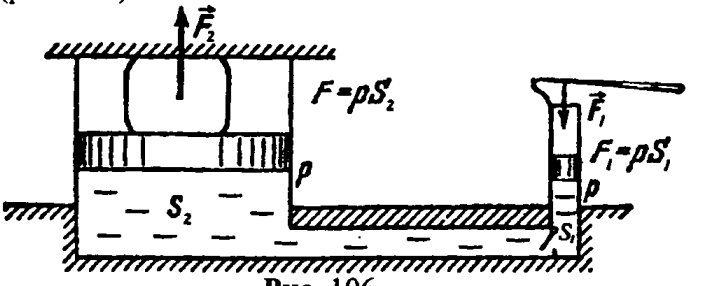


Рис. 106

На малый поршень действует сила F_1, создающая под поршнем давление $p_1 = \frac{F_1}{S_1}$, которое на основании закона Паскаля передается на большой поршень:

$$p_1 = p_2; p_2 = \frac{F_2}{S_2} \Rightarrow \frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.$$

При этом:

- работа, совершаемая обоими поршнями, будет одинакова:

$$F_1 h_1 = F_2 h_2 \Rightarrow \frac{F_2}{F_1} = \frac{h_1}{h_2},$$

где h_1, h_2 — ход первого и второго поршня соответственно;

- объем, вытесненный большим поршнем, будет равен объему жидкости, вытесненному малым поршнем:

$$V_1 = V_2 \Rightarrow S_1 h_1 = S_2 h_3 \Rightarrow \frac{F_2}{F_1} = \frac{h_1}{h_2}.$$

Выигрыш в силе равен отношению площадей, которое обычно равно 100. Во столько же раз перемещение ***малого*** поршня ***больше*** перемещения большого.

Применение гидравлического пресса:

- штамповка колес трамваев, локомотивов;
- получение масла из семян;
- выдавливание отверстий в металлах, металлопластиках.

2.1.4. Гидростатическое давление

В каждой жидкости существует давление, обусловленное ее собственным весом.

Гидростатическое давление — давление неподвижного столба жидкости:

$$p = \rho g h,$$

где ρ — плотность жидкости;

h — высота столба жидкости.

С учетом атмосферного давления:

$p = p_0 + \rho g h$,

где p_0 — атмосферное давление.

Гидростатический парадокс (рис. 107): давление, оказываемое жидкостью на дно сосуда, не зависит от формы сосуда и определяется только уровнем жидкости в сосуде:

$p = \rho g h$.

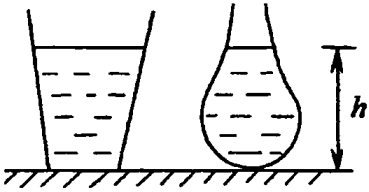


Рис. 107

2.2. ЗАКОНЫ ГИДРОСТАТИКИ

2.2.1. Закон Архимеда

Погруженное в жидкость тело как бы теряет часть своего веса. Силу, направленную противоположно действующей на тело силе тяжести, называют ***подъемной,*** или ***выталкивающей,*** силой.

Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу вытесненной жидкости или газа в объеме погруженной части тела:

$F_{\text{выт}} = \rho_{\text{ж}} g V$,

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости или газа;

V — объем погруженной части тела.

Выталкивающая сила в соответствии с законом Архимеда называется еще архимедовой силой.

Вторая формулировка этого закона гласит: тело, погруженное в жидкость или газ, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная жидкость. ⇒

Вес тела, погруженного в жидкость или газ, уменьшается на величину выталкивающей силы:

$P_{в\ возд} - P_{в\ жидк} = F_{выт}$,

где $P_{в\ возд}$ — вес тела в воздухе (истинный вес тела mg);

$P_{в\ жидк}$ — вес тела в жидкости.

Условия плавания тел

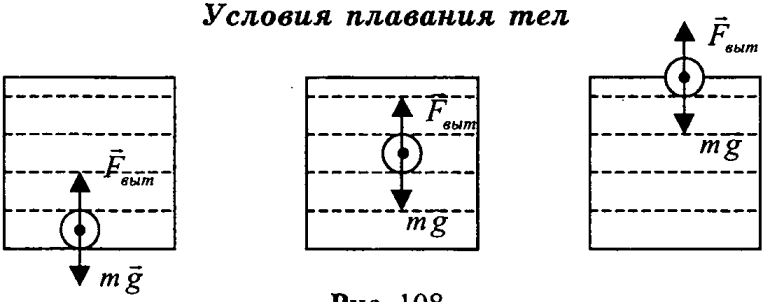


Рис. 108

$mg > F_{выт}$ $\rho_m gV > \rho_ж gV$ $\rho_m > \rho_ж$ — тело тонет.	$mg = F_{выт}$ $\rho_m gV = \rho_ж gV$ $\rho_m = \rho_ж$ — тело плавает во взвешенном состоянии.	$mg = F_{выт}$ $\rho_m gV = \rho_ж gV_{под}$ $V = V_{под} + V_{над} \Rightarrow$ $V > V_{под} \Rightarrow$ $\rho_m < \rho_ж \Rightarrow$ тело плавает на поверхности.

Здесь ρ_m — плотность тела, $\rho_ж$ — плотность жидкости, $V_{под}$ — объем подводной части тела, $V_{над}$ — объем надводной части.

Из анализа рисунка 107 выводятся два ***условия плавания тел***:

- тело плавает в жидкости или газе, если выталкивающая сила ***равна*** по модулю действующей на тело силе тяжести:

$mg = F_{выт}$;

- если плотность тела $\rho_T \leqslant \rho_ж$, то тело плавает на поверхности жидкости или во взвешенном состоянии.

Применение закона Архимеда:

- морской, речной, подводный, воздушный флот;
- строительство понтонных мостов;
- определение объемов тел неправильной формы;
- определение плотностей жидкостей (ареометры).

2.2.2. Закон сообщающихся сосудов

Вследствие подвижности молекул:

- жидкость не обладает собственной формой, а принимает форму того сосуда, в который она заключена;
- поверхность жидкости всегда перпендикулярна действующей на жидкость силе.

Под действием силы тяжести поверхность покоящейся жидкости всегда горизонтальна, т.е. располагается на одном уровне, что справедливо и для сосудов сложной формы и для нескольких, соединенных между собой сосудов, называемых ***сообщающимися***.

Закон сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах свободные поверхности однородной покоящейся жидкости находятся на одном уровне:

$h_1 = h_2$;

высоты разнородных жидкостей обратно пропорциональны их плотностям (рис. 109):

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

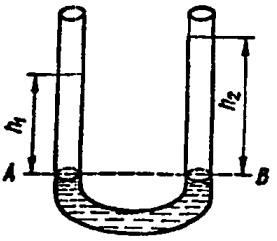


Рис. 109

Применение закона сообщающихся сосудов:

- строительство водонапорных башен осуществляется на самом высоком месте поселка;
- слив жидкости из труднодоступных мест (бензиновый бак).

2.3. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПО ТРУБАМ

2.3.1. Уравнение неразрывности струи

Исследование движения жидкостей и газов в различного рода сооружениях является предметом ***гидродинамики***.

Предполагается, что жидкость, протекающая по трубам разного сечения, удовлетворяет следующим требованиям:

- несжимаема, т.е. в жидкости отсутствуют пустоты;
- течение жидкости по трубам ***стационарно***;
- во всех точках данного сечения сохраняется некоторая средняя скорость жидкости.

Движение жидкости называется ***стационарным*** (установившимся), если в любой точке трубы скорость жидкости не меняется со временем.

При стационарном течение масса жидкости, проходящей через любое поперечное сечение за единицу времени, остается неизменной $\Rightarrow$ для стационарного течения жидкости можно записать ***уравнение неразрывности струи***:

$\rho \upsilon S = const$,

где ρ — плотность жидкости,

υ — модуль скорости жидкости в любом поперечном сечении S.

Если жидкость несжимаема, то плотность c = const и уравнение неразрывности струи принимает вид:

$\upsilon S = const \Rightarrow$ через сечение с меньшей площадью жидкость течет быстрее, и наоборот:

$$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

2.3.2. Закон Бернулли

Полное давление в потоке жидкости складывается из статического и динамического:

- ***статическое давление*** обусловлено потенциальной энергией жидкости, находящейся под давлением; оно проявляет себя непосредственным напором на стенку трубы и может быть измерено манометром;

- ***динамическое давление*** обусловлено кинетической энергией движущейся жидкости и равно:

$$\frac{\rho \upsilon^2}{2}.$$

Уравнение Бернулли: в стационарном потоке сумма статического и динамического давлений остается постоянной:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho \upsilon_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho \upsilon_2^2}{2} = const,$$

где p_1 и υ_1 — статическое давление и скорость потока в сечении 1, а p_2 и υ_2 — в сечении 2.

При увеличении скорости потока динамическая составляющая давления возрастает, а статическая уменьшается ⇒

Закон Бернулли: давление текущей жидкости больше в тех сечениях потока, в которых скорость ее движения меньше, и, наоборот, в тех сечениях, в которых скорость больше, давление меньше.

Закон Бернулли справедлив и для газов.

Указания к решению задач по гидростатике

1. Решение задач о плавании тел нужно начинать с первого условия плавания тела:

$$mg = F_{выт}.$$

2. При решении задач с учетом разницы веса в воздухе и жидкости нужно помнить, что вес тела в воздухе — это истинный вес тела, а в жидкости он уменьшается на величину выталкивающей силы:

$$P_{в\ возд} - P_{в\ жидк} = F_{выт}.$$

3. При решении задач на вычисление давления и сил давления на каком-либо уровне внутри покоящейся

жидкости нужно использовать определяющие формулы: давления, гидростатического давления.

4. При этом нужно помнить, что рассматриваемая жидкость находится на поверхности Земли и на нее, как и на все тела, действует атмосферное давление $\Rightarrow p = p_0 + cgh$.

5. Если требуется найти давление жидкости на боковую стенку сосуда, то нужно помнить, что в верхней точке оно равно нулю, а в нижней — ρgh. $\Rightarrow$

$$p_{бок} = \frac{0 + \rho gh}{2} = \frac{\rho gh}{2}.$$

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

В сообщающихся сосудах находится ртуть ($\rho_1 = 13{,}6 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$). В один сосуд наливают столб воды ($\rho_2 = 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$) высотой 0,7 м (рис. 110). На сколько поднимется уровень ртути в одном сосуде и опустится в другом?

Дано:

$\rho_1 = 13{,}6 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$

$\rho_2 = 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$

$H = 0{,}7$ м

Δh – ?

Решение:

Выбираем поверхность одного уровня по границе раздела воды и ртути. Обозначим разность уровней ртути в сообщающихся сосудах Δh.

Тогда к этому столбу ртути и столбу воды можно применить закон сообщающихся сосудов: они находятся в равновесии, так как давления жидкостей в обоих сосудах равны:

$$\rho_1 g \Delta h = \rho_2 g H \Rightarrow$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{H}{\Delta h} \Rightarrow$$

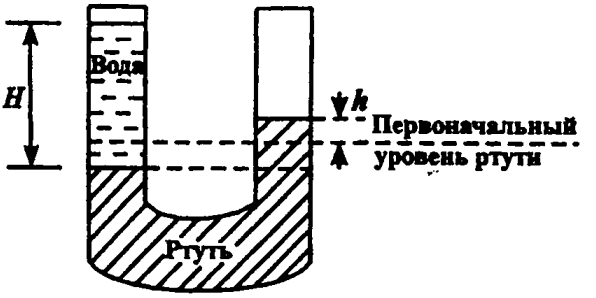


Рис. 110

$$\Delta h = \frac{\rho_2}{\rho_1} H = \frac{10^3}{13,6 \cdot 10^3} 0,7 = 0,051 \text{ (м)}.$$

Ответ: $\Delta h = 0,051$ м.

Задача 2.

Чему равна сила, передаваемая на большой поршень гидравлического пресса при условии, что малый поршень под действием приложенной к нему силы 200 Н за один ход опускается на 20 см, а большой поршень поднимается на 2 см (рис. 111)?

Дано:	**СИ**
$F_1 = 200$ Н	
$h_1 = 20$ см	$= 0,2$ м
$h_2 = 2$ см	$= 0,02$ м
$F_2 - ?$	

Решение:

Гидравлический пресс позволяет получить выигрыш в силе во столько раз, во сколько площадь S_2 ее большого поршня больше площади S_1 малого:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.$$

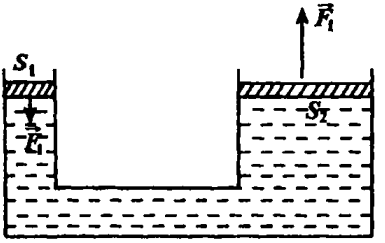


Рис. 111

Решить данную задачу можно двумя путями:

1) Работа, совершаемая обоими поршнями, будет одинакова:

$$F_1 h_1 = F_2 h_2;$$

2) Объем, вытесненный большим поршнем будет равен объему жидкости, вытесненному малым поршнем:

$V_1 = V_2 \Rightarrow S_1 h_1 = S_2 h_3 \Rightarrow$

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{h_1}{h_2} \Rightarrow F_2 = \frac{h_1}{h_2} F_1 = \frac{0,2}{0,02} \cdot 200 = 2000 \text{ (Н)}.$$

Ответ: $F_2 = 2000$ Н.

Задача 3.

На какую часть от своей высоты погрузится в жидкость с плотностью 1000 $\frac{кг}{м^3}$ прямоугольное тело с плотностью 700 $\frac{кг}{м^3}$?

Дано:

$\rho_0 = 1000 \frac{кг}{м^3}$

$\rho = 700 \frac{кг}{м^3}$

$\frac{h_1}{H}$ – ?

Решение:

Обозначим высоту погруженной части тела h_1. Тогда по закону Архимеда условие плавания тела:

$mg = F_{выт}$;

$F_{выт} = \rho_0 g S h_1$,

$mg = \rho g S H$,

где $H = h + h_1$ — высота тела (рис. 112) $\Rightarrow$

$$\frac{h_1}{H} = \frac{\rho}{\rho_0} = 0,7.$$

Ответ: $\frac{h_1}{H} = 0,7$.

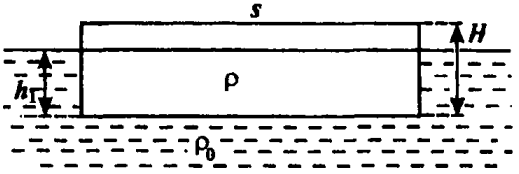


Рис. 112

Задача 4.

В жидкости с плотностью ρ_1 вес тела равен P_1, а в жидкости с плотностью ρ_2 вес тела равен P_2. Найти вес тела в жидкости с плотностью ρ_3. Здесь под весом тела понимается, например, сила натяжения нити, на которой подвешено тело, опущенное в жидкость.

Дано:
ρ_1
ρ_2
ρ_3
P_1
P_2
P_3 – ?

Решение:

Обозначим вес тела в воздухе P. Тогда с учетом силы Архимеда можно записать:

$$\begin{cases} P_1 = P - \rho_1 gV \\ P_2 = P - \rho_2 gV \\ P_3 = P - \rho_3 gV \end{cases}$$

В этой системе из трех уравнений имеется три неизвестных.

Решая эту систему относительно P_3, получим:

$$P_3 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} P_1 - \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_1 - \rho_2} P_2 .$$

Ответ: $P_3 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} P_1 - \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_1 - \rho_2} P_2$.

Задача 5.

В цилиндрический сосуд налиты равные массы ртути и воды. Общая высота двух слоев жидкостей 29,2 см. Определить давление жидкостей на дно сосуда (рис. 113).

Дано:	СИ
$h = 29{,}2$ см	$= 0{,}292$ м
$m_1 = m_2$	
$\rho_1 = 13{,}6 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$	
$\rho_2 = 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$	
p – ?	

Решение:

Полное давление жидкостей на дно сосуда:

$p = p_1 + p_2$,

где $p_1 = \rho_1 g h_1$ — давление ртути на дно сосуда;

$p_2 = \rho_2 g h_2$ — давление воды на дно сосуда,

ρ_1 и ρ_2 — плотности ртути и воды соответственно $\Rightarrow$
$p = g(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2)$,
$m_1 = m_2 \Rightarrow \rho_1 h_1 S = \rho_2 h_2 S$,
где S — площадь основания сосуда $\Rightarrow$

$$\begin{cases} \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2, \\ h = (h_1 + h_2) \end{cases} \Rightarrow$$

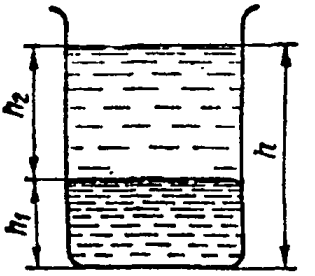


Рис. 113

$$h_1 = \frac{h\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, \quad h_2 = \frac{h\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \Rightarrow$$

$$p = g\left(\frac{\rho_1\rho_2 h}{\rho_1 + \rho_2} + \frac{\rho_1\rho_2 h}{\rho_1 + \rho_2}\right) =$$

$$= \frac{2\rho_1\rho_2 gh}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{2 \cdot 13{,}6 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 0{,}292}{13{,}6 \cdot 10^3 + 10^3} = 5{,}44 \cdot 10^3 \text{ (Па)}.$$

Ответ: $p = 5{,}44 \cdot 10^3$ Па.

Задача 6.

Однородное тело плавает на поверхности керосина так, что объем погруженной части составляет 0,92 всего объема тела. Определить объем погруженной части при плавании тела на поверхности воды.

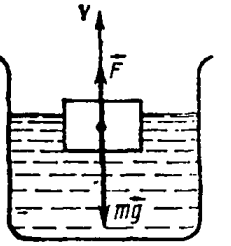


Рис. 114

Дано:

$V_k = 0{,}92V$

$\rho_k = 0{,}8 \cdot 10^3 \dfrac{кг}{м^3}$

$\rho_в = 10^3 \dfrac{кг}{м^3}$

$V_в$ – ?

Решение:

Так как тело плавает, то запишем условие плавания тела (рис. 114):

- в керосине:

$mg = \rho_k V_k g = 0{,}92\, \rho_k V g;$

- в воде:

$mg = \rho_в V_в g,$

где V_k — объем погруженной части тела в керосине;

$V_в$ — объем погруженной части тела в воде ⇒

$0{,}92\,\rho_k V = \rho_в V_в \Rightarrow$

$$V_в = \frac{0{,}92V \cdot \rho_к}{\rho_в} = \frac{0{,}92V \cdot 0.8 \cdot 10^3}{10^3} = 0{,}736V.$$

Ответ: $V_в = 0{,}736V$.

Задача 7.

Тонкая деревянная палочка длиной 20 см закреплена шарнирно на одном конце и опущена свободным концом в воду. Какая часть длины палочки будет находиться в воде при равновесии?

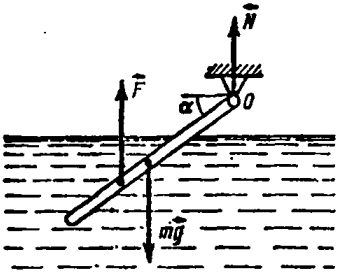


Рис. 115

Дано:	**СИ**
$L = 20$ см	$= 0{,}2$ м
$\rho_д = 0{,}8 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$	
$\rho_в = 10^3 \frac{кг}{м^3}$	
$l - ?$	

Решение:

На палочку, погруженную в воду, действуют (рис. 115):

- mg — сила тяжести;
- F_A — выталкивающая (архимедова) сила;
- N — сила нормальной реакции шарнира.

Так как вся система вращается относительно точки O, запишем второе условие равновесия:

$F_A\, l_1 = mg\, l_2$,

где $l_1 = \left(L - \frac{l}{2}\right)\cos\alpha$ и $l_2 = \frac{L}{2}\cos\alpha$ — плечи сил F_A и mg.

Тогда условие равновесия примет вид:

$$F_A\left(L - \frac{l}{2}\right)\cos\alpha = mg\,\frac{L}{2}\cos\alpha.$$

Распишем значения сил:

$F_A = \rho_в g l S$,

$mg = \rho_д glS,$

где S — площадь поперечного сечения палочки $\Rightarrow$

$$\rho_в glS\left(L - \frac{l}{2}\right)\cos\alpha = \rho_д glS\frac{L}{2}\cos\alpha \Rightarrow$$

$$l^2 - 2Ll + \frac{\rho_д}{\rho в}L^2 = 0 \Rightarrow$$

$$l = L \pm\sqrt{L^2 - \frac{\rho_д}{\rho_в}L^2} = L\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{\rho_д}{\rho_в}}\right) =$$

$$= 0{,}2\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{0{,}8\cdot 10^3}{10^3}}\right) = 0{,}2\left(1 \pm \sqrt{0{,}2}\right) =$$

$$= 0{,}2\ (1 \pm 0{,}45) = 0{,}11 \text{ (м)}.$$

Второе значение $l = 0{,}29$ м не имеет физического смысла.

Ответ: $l = 0{,}11$ м.

Задача 8.

На границе раздела двух жидкостей с плотностями ρ_1 и ρ_2 плавает шайба плотностью ρ ($\rho_1 < \rho < \rho_2$). Высота шайбы h. Определить глубину ее погружения во вторую жидкость.

Дано:	**Решение:**
ρ_1 ρ_2 ρ $\rho_1<\rho<\rho_2$ h_2 – ?	На основании закона Архимеда и вытекающих из него условий плавания тел шайба плавает на границе раздела жидкостей, если сила тяжести равна сумме веса жидкости с плотностью ρ_1, вытесненной верхней частью шайбы, и веса жидкости с плотностью ρ_2, вытесненной нижней частью шайбы:

$mg = F_{в1} + F_{в2} = \rho_1 gSh_1 + \rho_2 gSh_2,$

где h_1 — глубина погружения шайбы в первую жидкость, а h_2 — во вторую (рис. 116).

$mg = \rho gSh$.

Выразим $h_1 = h - h_2$.

Тогда:

$\rho gSh = \rho_1 gSh_1 + \rho_2 gSh_2 \Rightarrow$

$\rho h = \rho_1(h - h_2) + \rho_2 h_2 \Rightarrow$

$h(\rho - \rho_1) = h_2(\rho_2 - \rho) \Rightarrow$

$$h_2 = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} h.$$

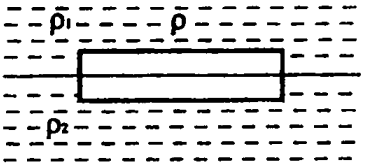


Рис. 116

Ответ: $h_2 = \dfrac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} h$.

Задача 9.

Одинаковая ли выталкивающая сила действует на тело, если его погружать на разную глубину?

Решение:

Выталкивающая сила определяется по формуле:

$F_{выт} = \rho_{ж} gV$,

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости или газа;

V — объем погруженной части тела $\Rightarrow$

выталкивающая сила зависит только от плотности жидкости и не зависит от глубины погружения тела $\Rightarrow$ выталкивающая сила будет одинаковая.

Задача 10.

Льдина равномерной толщины плавает, выступая над уровнем воды на 2 см. Площадь основания льдины 200 см^2, плотность льда равна 0,9 $\frac{кг}{м^3}$, плотность воды — 10^3 $\frac{кг}{м^3}$. При этом масса льдины равна:

1) 2,7 кг; 2) 3,6 кг; 3) 6,5 кг; 4) 7,3 кг; 5) 8,5 кг.

Дано:	СИ
$\rho_л = 0{,}9 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$	
$\rho_в = 10^3 \frac{кг}{м^3}$	
$h = 2$ см	$= 0{,}02$ м
$S = 200$ см^2	$= 0{,}02$ м^2
m – ?	

Решение:

Запишем условие плавания тел (рис. 117):

$mg = F_{выт} \Rightarrow$

$\rho_л gV = \rho_в gV_{под}$.

Разделим обе части равенства на V:

$$\rho_л = \rho_в \frac{V_{под}}{V} \Rightarrow$$

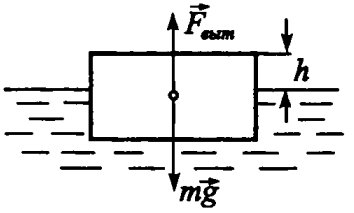


Рис. 117

$$\frac{V_{под}}{V} = \frac{\rho_л}{\rho_в} = 0{,}9 \Rightarrow$$

$$\frac{V_{над}}{V} = 0{,}1 \Rightarrow$$

Вычислив объем надводной части, можно найти объем всей льдины:

$V_{над} = h \cdot S = 0{,}02 \cdot 0{,}02 = 4 \cdot 10^{-4}$ (м^3) $\Rightarrow V = 4 \cdot 10^{-3}$ (м^3) $\Rightarrow$

$m = \rho_л V = 0{,}9 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 3{,}6$ кг.

Проанализировав представленные ответы, выбираем ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 11.

В воде плавает деревянный кубик объемом $V = 200$ см^3. Минимальная масса груза, который можно положить на кубик, чтобы он полностью ушел под воду, равна $m = 30$ г. Если плотность воды равна 1 $\frac{г}{см^3}$, то плотность древесины равна:

1) 0,7 $\frac{г}{см^3}$; 2) 0,75 $\frac{г}{см^3}$; 3) 0,8 $\frac{г}{см^3}$;

4) 9,85 $\frac{г}{см^3}$; 5) 0,9 $\frac{г}{см^3}$.

Дано:	СИ
$V = 200$ см^3	$= 2\cdot10^{-4}$ м^3
$\rho_в = 1\ \frac{г}{см^3}$	$= 1\cdot10^3\ \frac{кг}{м^3}$
$m = 30$ г	$= 3\cdot10^{-2}$ кг
m – ?	

Решение:

Кубик вместе с грузом будет плавать. ⇒ Из условия плавания тел (рис. 118):

$$F_{выт} = (m + m_д)g \Rightarrow$$

$$\rho_в gV = (m + \rho_д V)g,$$

$$\rho_в V - m = \rho_д V \Rightarrow$$

$$\rho_д = \frac{\rho_в V - m}{V} = \rho_в - \frac{m}{V} =$$

$$= 10^3 - \frac{3\cdot10^{-2}}{2\cdot10^{-4}} = 1000 - 150 =$$

$$= 850\ (\frac{кг}{м^3}) = 0{,}85\ (\frac{г}{см^3}) \Rightarrow$$

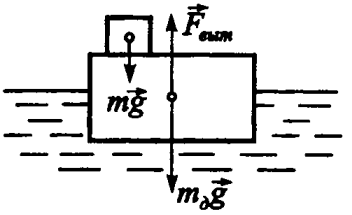


Рис. 118

Проанализировав представленные ответы, выбираем ответ № 4.

Ответ: № 4.

Задача 12.

Объем пузырька газа, всплывающего со дна озера, на поверхности увеличился в 11 раз. Какова приблизительная глубина озера (температуру считать постоянной)?

1) 11 м; 2) 110 м; 3) 10 м; 4) 100 м; 5) 120 м.

Дано:
$V_2 = 11V_1$
$T = const$
$p_0 = 1{,}013\cdot10^5$ Па
$\rho = 10^3\ \frac{кг}{м^3}$
h – ?

Решение:

Температура пузырька газа постоянна. ⇒ Можно (рис. 119) применить закон Бойля–Мариотта (см. п. 3.3.4):

$$p_1V_1 = p_2V_2.$$

Давление на поверхности равно атмосферному: $p_1 = p_0 = 1{,}013\cdot10^5$ Па,

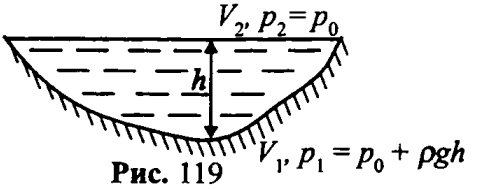


Рис. 119

а на глубине:

$p_2 = p_0 + \rho gh$,

где ρgh — давление неподвижного столба жидкости $\Rightarrow$

$(p_0 + h) \Rightarrow (p_0 + \rho gh)V = p_0 \cdot 11 \cdot V \Rightarrow$

$\rho gh = 10p_0 \Rightarrow$

$$h = \frac{10p_0}{\rho g} = \frac{10 \cdot 1{,}013 \cdot 10^5}{10^3 \cdot 10} \approx 100 \text{ (м)}.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[h] = \frac{Па \cdot м^3 \cdot с^2}{кг \cdot м} = \frac{Н \cdot м^3 \cdot с^2}{м^2 \cdot кг \cdot м} = \frac{кг \cdot м \cdot с^2}{кг \cdot с^2} = м.$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 4.

Ответ: № 4.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 5

Задача 1.

Плотность воды принять равной 1000 $\frac{кг}{м^3}$, а плотность льда — 900 $\frac{кг}{м^3}$. Если льдина плавает, выдаваясь на 50 м^3 над поверхностью воды, то чему равен объем всей льдины?

Ответ: 500 м^3.

Задача 2.

В двух сообщающихся трубках разного сечения налита сначала ртуть, а потом в широкую трубку сечением 8 см^2 налито 272 г воды. Насколько выше будет стоять

ртуть в узком колене? Плотность ртути равна $13{,}6 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$. Плотность воды — $10^3 \frac{кг}{м^3}$.

Ответ: 2,5 см.

Задача 3.

У основания здания давление в водопроводе равно $5 \cdot 10^5$ Па. С какой силой давит вода на прокладку крана площадью 0,5 см^2, если кран расположен на пятом этаже здания на высоте 20 м от основания? Плотность воды принять равной $10^3 \frac{кг}{м^3}$.

Ответ: 15 Н.

Задача 4.

В воде с глубины 5 м поднимают до поверхности камень объемом 0,6 м^3. Плотность камня — $2500 \frac{кг}{м^3}$. Найти работу по подъему камня.

Ответ: 45 кДж.

Задача 5.

На поверхности воды плавает сплошной деревянный кубик с длиной ребра 10 см. Если на кубик положить груз, то глубина погружения кубика составит 9 см. Плотность воды равна $1000 \frac{кг}{м^3}$, плотность дерева — $600 \frac{кг}{м^3}$. Какова масса груза?

Ответ: 300 г.

Задача 6.

До какой высоты надо налить воды в цилиндрический сосуд, чтобы силы давления на дно и на боковую стенку сосуда были одинаковы?

Ответ: $h = r$.

Задача 7.

Определить наименьшую площадь плоской льдины толщиной 40 см, способной удержать на воде человека массой 75 кг. Плотность воды равна 1000 $\frac{кг}{м^3}$, плотность льда — 900 $\frac{кг}{м^3}$.

Ответ: 1,875 м^2.

Задача 8.

При подъеме груза массой $2 \cdot 10^3$ кг с помощью гидравлического пресса была затрачена работа 40 Дж. При этом малый поршень сделал 10 ходов, перемещаясь за один ход на 10 см. Во сколько раз площадь большого поршня больше площади малого?

Ответ: в 500 раз.

Задача 9.

Чему равна плотность тела, если при погружении в жидкость с плотностью 800 $\frac{кг}{м^3}$, его вес уменьшился в три раза?

Ответ: 1200 $\frac{кг}{м^3}$.

Задача 10.

Кусок дерева плавает в воде, погружаясь на $\frac{3}{4}$ своего объема. Какова плотность этого дерева?

Ответ: $0{,}75 \cdot 10^3$ $\frac{кг}{м^3}$.

Задача 11.

Какая часть от всего объема айсберга находится над поверхностью воды? Плотность льда $\rho_л = 0{,}9 \cdot 10^3$ $\frac{кг}{м^3}$, $\rho_в = 1000$ $\frac{кг}{м^3}$.

Ответ: 0,1.

Задача 12.

Канал глубиной L = 8 м, перегорожен плотиной. Если глубина канала с одной стороны h_1 = 6 м, а с другой стороны h_2 = 4 м (рис. 120), то чему равна сила давления неподвижной воды на плотину?

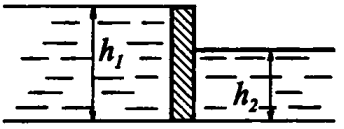


Рис. 120

Ответ: 800 кН.

Задача 13.

Объем надводной части айсберга равен 0,5 км^3. Если объем его подводной части равен 3,5 км^3, а плотность морской воды равна $\rho_{м.в.} = 1{,}04\ \frac{г}{см^3}$, то чему равна плотность льда?

Ответ: $0{,}91\ \frac{г}{см^3}$.

Тест № 5

Задача 1.

Аквариум наполовину наполнен водой. С какой силой вода давит на стенку аквариума длиной 50 см, если высота стенок аквариума 40 см? Плотность воды равна $1000\ \frac{кг}{м^3}$.

1) 200 Н; 2) 400 Н; 3) 800 Н; 4) 100 Н; 5) 600 Н.

Задача 2.

Стальной шар объемом V и массой m удерживается под водой от погружения на дно пружиной жесткости k (рис. 121). Найдите энергию деформации пружины. Мас-

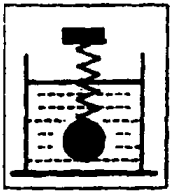


Рис. 121

сой и объемом пружины пренебречь. Плотность воды равна ρ.

1) $\frac{g^2(m-\rho V)^2}{2k}$; 2) $\frac{g(\rho V-m)^2}{2k}$; 3) $\frac{g^2(\rho V+m)^2}{2k}$;

4) $\frac{g^2(\rho V-m)^2}{k}$; 5) $\frac{g^2(\rho V-m)}{2k}$.

Задача 3.

Деревянный шар объемом V и массой M удерживается под водой с помощью тонкой стальной цепи, лежащей на дне водоема и прикрепленной одним концом к шару (рис. 122). Найдите длину цепи между шаром и дном, если масса одного метра цепи равна m, а плотность воды равна ρ. Объемом цепи пренебречь.

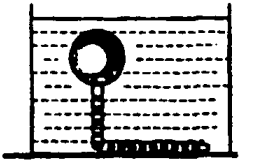


Рис. 122

1) $\frac{\rho V-M}{m}$; 2) $\frac{\rho Vg-M}{mg}$; 3) $\frac{M}{\rho V-m}$;

4) $\frac{\rho V+M}{m}$; 5) $\frac{\rho Vg+M}{mg}$.

Задача 4.

Определить силу давления жидкости плотностью $\rho = 800\ \frac{кг}{м^3}$ на боковую стенку закрытого кубического сосуда объемом $V = 8$ м^3, полностью заполненного жидкостью.

1) 32 кН; 2) 64 кН; 3) 96 кН; 4) 128 кН; 5) 16 кН.

Задача 5.

Плотность воды равна 1000 $\frac{кг}{м^3}$, а плотность стекла — 2500 $\frac{кг}{м^3}$. Если стеклянный шарик массы 100 г погру-

зить в воде на глубину 50 см, то сила Архимеда совершит работу, равную:

1) + 0,5 Дж; 2) + 0,2 Дж; 3) – 0,5 Дж;
4) – 0,2 Дж; 5) – 500 Дж.

Задача 6.

Четыре шарика из различных материалов (плотности $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) помещены в сосуд с водой. Наименьшая выталкивающая сила действует на шарик (рис. 123):

1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4;
5) одинаковые силы.

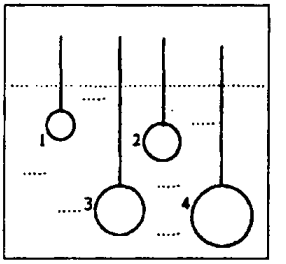


Рис. 123

Задача 7.

Определите плотность однородного тела, вес которого в воздухе равен 2,8 Н, а в воде — 1,69 Н. Выталкивающей силой воздуха пренебречь. Плотность воды равна $10^3 \frac{кг}{м^3}$.

1) $2 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$; 2) $2{,}5 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$; 3) $2{,}8 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$;
4) $3{,}0 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$; 5) $3{,}2 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$.

Задача 8.

Давление в озере в 5 раз больше атмосферного на глубине:

1) 40 м; 2) 50 м; 3) 60 м; 4) 25 м; 5) 100 м.

Задача 9.

В резервуаре с бензином плавает деревянный кубик массой 80 г. Если плотность бензина равна 0,85 $\frac{г}{см^3}$, а плотность дерева — 0,68 $\frac{г}{см^3}$, то минимальная масса

груза, который надо положить на кубик, чтобы он полностью погрузился в жидкость, равна:

1) 10 г; 2) 15 г; 3) 20 г; 4) 25 г; 5) 28 г.

Задача 10.

В стакане с водой плавает кусок льда. Лед растаял. Как изменится уровень воды в стакане?

1) повысился;
2) не изменился;
3) понизился;
4) необходимо знать массу льда;
5) необходимо знать площадь поперечного сечения стакана.

Задача 11.

В воде плавает деревянный плот массой 135 кг. Минимальная масса груза, который надо положить на плот, чтобы он полностью ушел под воду, равна 15 кг. Если плотность воды равна $1\ \frac{г}{см^3}$, то плотность древесины равна:

1) $0{,}7\ \frac{г}{см^3}$; 2) $0{,}75\ \frac{г}{см^3}$; 3) $0{,}8\ \frac{г}{см^3}$;
4) $0{,}85\ \frac{г}{см^3}$; 5) $0{,}9\ \frac{г}{см^3}$.

Задача 12.

На Земле тело, плотность которого вдвое больше плотности воды, погрузили в сосуд с водой. На Луне это тело:

1) будет плавать на поверхности, частично погрузившись в воду;
2) будет лежать на дне сосуда;
3) будет плавать на поверхности, полностью погрузившись в воду;
4) будет плавать внутри воды в безразличном равновесии;
5) будет вытолкнуто из воды полностью.

ГЛАВА 3.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Программа по молекулярной физике содержит следующие разделы:

Опытное обоснование основных положений молекулярно-кинетической теории. Броуновское движение. Диффузия. Масса и размер молекул. Измерение скорости молекул. Опыт Штерна. Количество вещества. Моль. Постоянная Авогадро. Взаимодействие молекул. Модели газа, жидкости и твёрдого тела.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Связь между давлением и средней кинетической энергией молекул идеального газа. Связь температуры со средней кинетической энергией частиц газа.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева–Клапейрона). Универсальная газовая постоянная. Изотермический, изохорный и изобарный процессы.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

3.1. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Молекулярно–кинетической теорией (МКТ) называется теория, объясняющая свойства тел строением и взаимодействием молекул и атомов.

3.1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ):

I. ***Все вещества состоят из мельчайших частиц — молекул и атомов,*** которые, в свою очередь, состоят из более мелких элементарных частиц. Доказательство — наблюдение больших белковых молекул в электронных микроскопах.

II. ***Молекулы и атомы находятся в непрерывном хаотическом движении***. Доказательства:

- ***броуновское движение*** — беспорядочное движение взвешенных в жидкости частиц за счет соударения с молекулами жидкости. Интенсивность броуновского движения зависит от температуры жидкости (увеличивается при повышении t) и от размеров частиц (чем меньше, тем больше).
- ***диффузия*** — явление проникновения молекул одного вещества в ***промежутки*** между молекулами другого. Наблюдается в газах (распространение запахов), жидкостях (чай), в твердых хорошо отшлифованных телах.
- ***осмос*** — явление проникновения жидкостей и растворов через пористую перегородку (питание растений, животных, человека).

III. ***Между молекулами и атомами существуют силы притяжения и отталкивания.*** При сближении двух атомов или молекул сначала преобладают силы притяжения (до рав-

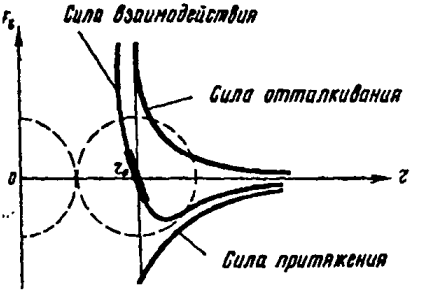


Рис. 124

новесного значения r_0), затем — силы отталкивания (рис. 124). Силы притяжения препятствуют растяжению твердого тела, силы отталкивания — его сжатию.

3.1.2. Число, масса и размеры молекул

Моль — единица количества вещества в системе СИ.

1 ***Моль*** — количество вещества, содержащее столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в 0,012 кг изотопа углерода $^{12}_{6}C$.

В одном моле любого вещества содержится одно и то же число молекул (или атомов). Это число равно ***постоянной Авогадро***:

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

$N_A = \dfrac{N}{\nu}$, где ν — число молей.

Количество вещества ν (число молей вещества) можно найти, зная массу вещества m и его молярную массу μ, либо зная число молекул вещества N и число Авогадро N_A (число молекул вещества в 1 моль):

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}.$$

Молярной массой (массой одного моля) μ называется величина, равная отношению массы вещества m к количеству вещества (числу молей) ν:

$$\mu = \frac{m}{\nu} = m_0 N_A,$$

где m_0 — масса одной молекулы, для определения которой необходимо массу вещества m разделить на число N молекул в нем:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{\mu}{N_A}.$$

$[\mu] = \frac{кг}{моль}$. Численное значение молярной массы μ равно молекулярной массе:

$$\mu_{H_2} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}; \qquad \mu_{O_2} = 32 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль};$$

$$\mu_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}; \qquad \mu_{CO_2} = 44 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль};$$

$$м_{возд} = 29 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}; \qquad \mu_{He} = 4 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}.$$

Размеры молекул очень малы. Молекулы не могут столкнуться друг с другом подобно бильярдным шарикам. Минимальное расстояние, на которое они могут сблизиться, называется ***эффективным диаметром молекул*** σ (рис. 125). Например:

$\sigma_{воды} = 2{,}6 \cdot 10^{-10}$ м.

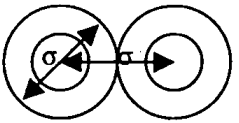


Рис. 125

Молекула воды во столько раз меньше крупного яблока, во сколько раз яблоко меньше земного шара.

В стакане воды находится такое же количество молекул, сколько яблок можно разместить в оболочке земного шара, начиная с центра.

3.1.3. Внутренняя энергия тела

Внутренней энергией тела называется сумма кинетических энергий движения молекул тела $E_к$ и потенциальной энергии их взаимодействия $E_п$.

В зависимости от их соотношения все вещества делятся на:

- $E_п >> E_к$ — твердые тела, отличающиеся постоянством формы и объема;
- $E_п \approx E_к$ — жидкости, имеющие постоянный объем, но не имеющие своей формы; они принимают форму того сосуда, в котором они находятся, и не сопро-

тивляются изменению этой формы ⇒ ***текучесть*** и малая ***сжимаемость***;

- $E_п << E_к$ — газы, легко сжимающиеся под действием внешнего давления.

3.2. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Газ:

- не имеет постоянной формы:
- занимает весь предоставленный ему объем;
- обладает большим запасом внутренней энергии, поэтому может взрываться;
- имеет большие промежутки между молекулами ⇒ силы сцепления практически отсутствуют.

Идеальный газ:

- силы молекулярного взаимодействия полностью отсутствуют;
- молекулы движутся направленно: одноатомные молекулы совершают только поступательное движение вдоль осей OX, OY, OZ: у двухатомных добавляется еще вращательное движение, у многоатомных еще добавляется колебательное движение;
- собственный объем молекул газа мал по сравнению с объемом газа;
- при соударении молекул между собой и со стенками сосуда они ведут себя как абсолютно упругие шарики конечных, но весьма малых размеров;
- в элементарном курсе физики рассматривают ***идеальные*** газы, молекулы которых состоят из одного атома.

3.2.1. Термодинамические параметры

Состояние некоторой массы идеального газа однозначно определяется ***термодинамическими параметрами*** (параметрами состояния):

p, V, T — давлением, объемом и абсолютной температурой.

Уравнение состояния — математическое выражение взаимосвязи между термодинамическими параметрами.

Термодинамический параметр *p* определяется числом ударов молекул о стенки сосуда.

Термодинамический параметр *V* определяется размерами предоставленного газу сосуда.

Температура *T* характеризует состояние тела независимо от его массы и химического состава. Это единственная физическая величина, имеющая два обозначения:

- *t* — температура, измеряемая по международной ***стоградусной шкале Цельсия***, [*t*] = °C и
- *T*— температура, измеряемая по ***термодинамической шкале температур***, [*T*] = кельвин = К. Температура, выраженная в кельвинах, называется ***абсолютной***.

Связь между абсолютной (термодинамической) температурой *T*, измеряемой в кельвинах, и температурой *t* в градусах Цельсия:

$T = t + 273{,}15$ °C ⇒

шкалы Цельсия и Кельвина просто смещены относительно друг друга.

Один кельвин по своей величине равен одному градусу Цельсия ⇒ разности температур ΔT и Δt будут по величине одинаковыми и обычно выражаются в кельвинах:

$\Delta T = \Delta t$.

Абсолютный нуль температуры (нулевая точка по шкале Кельвина):

- $T = 0$ K;
- по шкале Цельсия –273,15 °C;
- температура, при которой прекращается всякое ***поступательное*** движение молекул;
- это наинизшая теоретически возможная температура.

3.2.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \overline{E}_k,$$

где p — давление газа;

n_0 — число молекул в единице объема (концентрация молекул);

$\overline{E}_k$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Универсальная газовая постоянная:

$$R = 8{,}31 \ \frac{Дж}{моль \cdot K}.$$

Постоянная Больцмана:

$$k = \frac{R}{N_A} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \ \frac{Дж}{K}.$$

3.2.3. Следствия из основного уравнения МКТ

I. ***Средняя кинетическая энергия*** хаотического теплового движения отдельной молекулы идеального газа:

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} kT \Rightarrow$$

абсолютная температура T является мерой средней кинетической энергии движения молекул газа.

II. ***Концентрация молекул:***

$$n_0 = \frac{p}{kT} \Rightarrow$$

$p = n_0 kT \Rightarrow$

давление не зависит от природы газа, а определяется только его концентрацией и температурой.

III. При расчетах используется не мгновенная скорость отдельной молекулы, а некоторое среднее значение — ***средняя квадратичная скорость*** движения молекул:

$$\upsilon_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{3\kappa T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}},$$

где ρ — плотность газа.

Так как при заданной температуре T средние значения энергий поступательного движения молекул для различных газов одинаковы, $\Rightarrow$

$$\frac{m_1\upsilon_{ср.кв.1}^2}{2} = \frac{m_2\upsilon_{ср.кв.2}^2}{2} \Rightarrow \frac{\upsilon_{ср.кв.1}}{\upsilon_{ср.кв.2}} = \frac{\sqrt{m_2}}{\sqrt{m_1}} \Rightarrow$$

При одинаковой температуре средние квадратичные скорости движения молекул обратно пропорциональны корням квадратным из масс молекул.

Средняя квадратичная скорость движения молекул впервые была измерена в ***опыте Штерна*** и оказалась близкой к 500 $\frac{м}{с}$ (при 0 °С средние квадратичные скорости молекул водорода и азота соответственно равны 1840 $\frac{м}{с}$ и 493 $\frac{м}{с}$).

IV. ***Средняя длина свободного пробега*** $\bar{\lambda}$ — расстояние, которое пролетает молекула между двумя последовательными столкновениями:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n_0 \sigma^2},$$

где n_0 — число молекул в единице объема;

σ — эффективный диаметр молекул.

3.3. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

3.3.1. Закон Авогадро

Один моль ***любого*** газа при нормальных условиях ($T_0 = 273$ К, $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па,) занимает один и тот же объем $V_м = 22{,}4 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{моль}$, называемый молярным объемом.

3.3.2. Объединенный газовый закон

Связь между давлением, объемом и абсолютной температурой для всех состояний ***данной массы*** газа определяется ***объединенным газовым законом***: для данной массы идеального газа отношение произведения давления на объем к абсолютной температуре есть величина постоянная:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = const, \ (m = const).$$

На практике часто нужно привести объем данной массы газа ***к нормальным условиям*** ($T_0 = 273$ К, $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па):

$$V_0 = \frac{VpT_0}{p_0 T}.$$

Если применить объединенный газовый закон к одному молю любого газа, имеющего объем $V_м = 22{,}4 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{моль}$, то получим значение универсальной газовой постоянной R:

$$R = \frac{p_0 V_\mu}{T_0},$$

где V_μ — молярный объем;

p_0 — давление;

T_0 — абсолютная температура идеального газа.

$$R = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3}}{273} = 8{,}31\left(\frac{Дж}{моль \cdot К}\right).$$

$$[R] = \frac{Н \cdot м^3}{м^2 \cdot моль \cdot К} = \frac{Дж}{моль \cdot К}.$$

3.3.3. Закон Гей-Люссака

Изопроцесс — процесс в газе, при котором масса газа и один из его параметров остаются постоянными. Поскольку имеется три термодинамических параметра, ⇒ существует три различных изопроцесса.

Процесс в газе, который происходит при постоянной массе газа и ***неизменном давлении,*** называется ***изобарным*** или ***изобарическим*** (от греческого «барос» — тяжесть) и представляет ***закон Гей-Люссака***, выведенный в 1802 г. французским физиком Луи Гей-Люссаком:

$$V = V_0(1 + \alpha_V t), \ (p = const, \ m = const),$$

где $\alpha_V = \frac{1}{273{,}15}$ (для всех идеальных газов) — ***термический коэффициент объемного расширения***.

Или через термодинамические параметры: для данной массы идеального газа отношение объема к термодинамической температуре ***при постоянном давлении*** есть величина постоянная:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_0}{T_0} = const.$$

Графики ***изобарного*** процесса представлены на рисунке 126 и называются ***изобарами***:

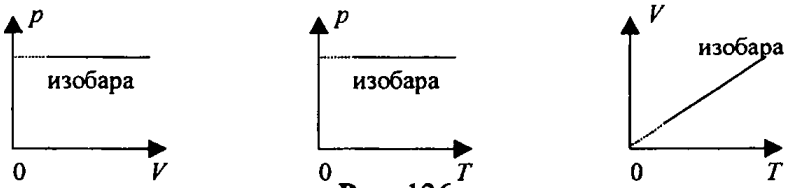


Рис. 126

3.3.4. Закон Бойля–Мариотта

Процесс в газе, который происходит при постоянной массе газа и ***неизменной температуре*** называется ***изотермическим***.

Для данного изопроцесса закон был выведен независимо друг от друга двумя разными физиками: англичанином Р. Бойлем в 1662 году и французом Э. Мариоттом в 1676 году.

Закон Бойля–Мариотта: для данной массы газа произведение давления на объем ***при постоянной температуре*** есть величина постоянная:

$p_0V_0 = p_1V_1 = const$, ($T = const$, $m = const$).

Графики ***изотермического процесса*** представлены на рисунке 127 и называются ***изотермами***:

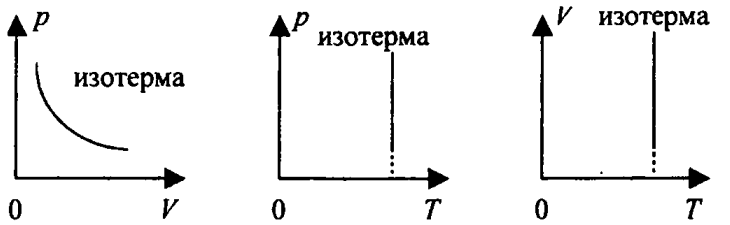


Рис. 127

3.3.5. Закон Шарля

Процесс в газе, который происходит при постоянной массе газа и ***неизменном объеме,*** называется ***изохорным*** или ***изохорическим*** (от греческого слова «хорема» — вместимость).

Для данного изопроцесса закон был выведен французским физиком Ж. Шарлем в 1787 году.

Закон Шарля:

$p = p_0(1 + \alpha_p t)$, ($V = const$, $m = const$)

где α_p — ***термический коэффициент давления***.

Или через термодинамические параметры: для данной массы газа отношение давления к термодинамической температуре ***при постоянном объеме*** есть величина постоянная:

$$\frac{p_1}{T_1}=\frac{p_0}{T_0}=const.$$

Графики ***изохорного процесса*** представлены на рисунке 128 и называются ***изохорами***:

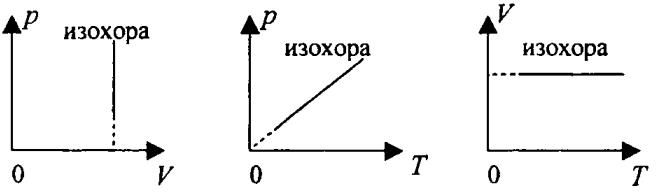


Рис. 128

3.3.6. Закон Дальтона

Закон Дальтона: давление смеси газов равно сумме ***парциальных давлений:***

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

Парциальное давление (от латинского — частичный) — давление, которое бы занимал газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при данной температуре.

3.3.7. Уравнение Менделеева–Клапейрона

Уравнение Менделеева–Клапейрона (уравнение состояния идеального газа для произвольной массы газа с молярной массой μ):

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

где $\frac{m}{\mu} = \nu$ — число молей.

Если $\nu = 1$, получим ***уравнение состояния идеального газа для одного моля***:

$$\frac{pV_\mu}{T} = R,$$

где V_μ — молярный объем (см. 3.3.2.).

Плотность газов: $\rho = \frac{m}{V}$.

$$pV = \frac{m}{\mu}RT \Rightarrow \rho = \frac{p\mu}{RT}.$$

3.3.8. Внутренняя энергия идеального газа

В идеальном газе молекулы не взаимодействуют, следовательно, не обладают потенциальной энергией. Внутренняя энергия идеального газа U представляет собой только сумму значений кинетической энергии хаотического движения молекул.

Внутренняя энергия одного моля одноатомного идеального газа:

$$U_{моль} = \frac{3}{2}N_A kT = \frac{3}{2}RT.$$

Для ***произвольной массы одноатомного идеального газа***:

$$U = \frac{3}{2}\cdot\frac{m}{\mu}RT.$$

Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа:

$$\Delta U = \frac{3}{2}\cdot\frac{m}{\mu}R\Delta T. \ [\Delta U] = \text{Дж}.$$

Указания к решению задач

Методика решения задач на молекулярно-кинетическую теорию

1. В задачах, связанных со средней квадратичной скоростью движения молекул, если сказано, какой это газ, необходимо выбирать формулу:

$$\upsilon_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}},$$

так как значение μ легко посчитать, используя таблицу Менделеева.

2. Внимательно читать условие задачи, чтобы правильно ответить на вопрос, и не путать массу одной молекулы с массой всего вещества, которые связаны между собой как:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{\mu}{N_A}.$$

Методика решения задач на газовые законы

1. Задачи, где дается два или несколько состояний газа, в которых его масса остается неизменной, удобно решать, применяя уравнение объединенного газового закона.

2. При решении задач, в которых масса газа изменяется, удобно воспользоваться уравнением Менделеева–Клапейрона.

3. Во всех задачах на газовые законы нужно переводить значения температуры по шкале Цельсия в значения шкалы Кельвина и пользоваться только абсолютной температурой.

4. Сделать схематический чертеж, отметив каждое состояние газа, указать параметры p, V, T, характеризующие эти состояния. Определить, какой из параметров не изменяется. В общем случае могут меняться все три параметра p, V, T.

5. Если в задаче сказано про нормальные условия, то нужно знать, что им соответствует температура 0 °С (273 К) и атмосферное давление, равное $1{,}013 \cdot 10^5$ Па.

Примеры решения задач

Задача 1.

Сколько молекул воздуха содержится в баллоне вместимостью 60 л при температуре 27 °С и давлении $5 \cdot 10^5$ Па? Чему равна масса одной молекулы воздуха?

Дано:	СИ	Решение:
$V = 60$ л	$= 6 \cdot 10^{-2}$ м^3	Число молекул, содержащихся в единице объёма, или концентрация молекул: $n_0 = \frac{p}{kT} \Rightarrow$ в объеме V содержится: $n = n_0 V = \frac{pV}{kT}$.
$p = 5 \cdot 10^5$ Па		
$t = 27$ °С	$T = 300$ К	
$\mu = 29 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}$		
$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$		
$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$		
$n - ?$ $m_0 - ?$		

$$[n] = \frac{Н \cdot м^3 \cdot К}{м^2 \cdot Н \cdot м \cdot К} = 1$$

$$n = \frac{5 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-2}}{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 7{,}246 \cdot 10^{22}.$$

Массу одной молекулы воздуха найдем, разделив массу одного моля воздуха на число Авогадро:

$$m = \frac{\mu}{N_A}. \quad [m] = \frac{кг \cdot моль}{моль} = \text{кг}.$$

$$m = \frac{29 \cdot 10^{-3}}{6{,}02 \cdot 10^{23}} = 4{,}8 \cdot 10^{-26} \text{ (кг)}.$$

Ответ: $n = 7{,}246 \cdot 10^{22}$ молекул; $m = 4{,}8 \cdot 10^{-26}$ кг.

Задача 2.

На рисунке 129 показаны две изобары для газа одной и той же массы. Углы наклона изобар к оси абсцисс равны α_1 и α_2. Как относятся давления газа $\frac{p_2}{p_1}$?

Решение:

Так как масса газа остается неизменной, применим объединенный газовый закон, связывающий все три параметра:

$$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}\Rightarrow\frac{p_2}{p_1}=\frac{V_1\cdot T_2}{T_1\cdot V_2}.$$

Из рисунка видно, что

$$\frac{V_1}{T_1}=tg\alpha_1,\ \text{а}\ \frac{V_2}{T_2}=tg\alpha_2\Rightarrow$$

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{tg\alpha_1}{tg\alpha_2}.$$

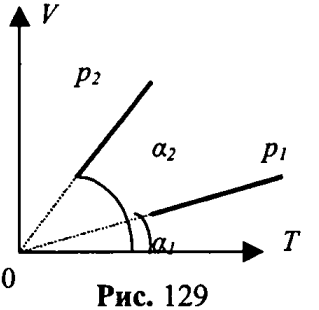


Рис. 129

Ответ: $\frac{p_2}{p_1}=\frac{tg\alpha_1}{tg\alpha_2}$.

Задача 3.

Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул воздуха в летний день при температуре 30 °С больше, чем в зимний день при температура –30 °С?

Дано:	СИ
$t_1 = 30$ °С	$T_1 = 303$ К
$t_2 = -30$ °С	$T_2 = 243$ К
$\mu = 29\cdot10^{-3}\frac{кг}{моль}$	
$R = 8{,}31\ \frac{Дж}{моль\cdot К}$	
$\frac{\upsilon_{ср.кв.1}}{\upsilon_{ср.кв.2}}$ – ?	

Решение:

Так как газ один и тот же — воздух, выбираем выражение для средней квадратичной скорости в виде:

$$\upsilon_{ср.кв.}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}},$$

чтобы упростить расчеты.

Тогда $\frac{\upsilon_{ср.кв.1}}{\upsilon_{ср.кв.2}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} = \sqrt{\frac{303}{243}} = 1{,}12.$

Как видим, константы нам не понадобились.

Ответ: $\frac{\upsilon_{ср.кв.1}}{\upsilon_{ср.кв.2}} = 1{,}12.$

Задача 4.

В цилиндре под поршнем находится воздух при давлении $2 \cdot 10^5$ Па и температуре 27 °С. Какой груз надо положить на поршень после нагревания воздуха до температуры 40 °С, чтобы объем воздуха в цилиндре был равен первоначальному? Площадь поршня 20 см^2.

Дано:	СИ	Решение:
$S = 20$ см^2	$= 2 \cdot 10^{-3}$ м^3	$V = const \Rightarrow$
$p = 2 \cdot 10^5$ Па		процесс изохорический $\Rightarrow$
$t_1 = 27°$ С	$T_1 = 300$ К	по закону Шарля:
$t_2 = 40°$ С	$T_2 = 313$ К	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$.
$V = const$		
$mg - ?$		

Для того чтобы поршень был в равновесии и объем воздуха не изменялся, необходимо, чтобы вес груза был равен увеличению при нагревании силы давления воздуха:

$mg = \Delta F$.

Давление воздуха внутри цилиндра возросло на: $\Delta p = p_2 - p_1$. Заменив значение

$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1}$, получим:

$$\Delta p = \frac{p_1(T_2 - T_1)}{T_1}.$$

Увеличение силы давления воздуха на поршень:

$$\Delta F = \Delta pS = \frac{Sp_1(T_2 - T_1)}{T_1} \Rightarrow$$

$$mg = \frac{Sp_1(T_2 - T_1)}{T_1}.$$

$$[mg] = \frac{м^2 \cdot Н \cdot К}{м^2 \cdot К} = \text{Н}.$$

$$mg = \frac{0{,}02 \cdot 2 \cdot 10^5 (313 - 300)}{300} = 173{,}3 \text{ (Н)}.$$

Ответ: mg = 173,3 Н.

Задача 5.

Чему равна масса одного моля μ смеси двух невзаимодействующих между собой газов, находящихся в сосуде, соответственно с массами m_1 и m_2 и молярными массами μ_1 и μ_2?

Дано:
μ_1
μ_2
m_1
m_2
$\mu - ?$

Решение:

Из закона Дальтона следует, что давление смеси газов равно сумме парциальных давлений:

$$p = \sum_{i=1}^{n} p_i = p_1 + p_2,$$

где p — давление смеси газов, а p_1 и p_2 — давления первого и второго газов соответственно. Из уравнения Менделеева–Клапейрона:

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

$$p = \frac{(m_1 + m_2)RT}{\mu V}, \; p_1 = \frac{m_1 RT}{\mu V}, \; p_2 = \frac{m_2 RT}{\mu V} \Rightarrow$$

$$\frac{(m_1+m_2)}{\mu}=\frac{m_1}{\mu}+\frac{m_2}{\mu}\Rightarrow\mu=\frac{(m_1+m_2)\mu_1\mu_2}{m_1\mu_2+m_2\mu_1}.$$

Ответ: $\mu=\dfrac{(m_1+m_2)\mu_1\mu_2}{m_1\mu_2+m_2\mu_1}$.

Задача 6.

Сосуд объемом 6 л разделен перегородкой на две части (рис. 130). В одной находится 10 г водорода (молярная масса 2 $\frac{г}{моль}$), в другой — 30 г неизвестного газа. Температура каждого из газов $T = 360$ К. Если убрать перегородку, то давление получившейся смеси газов будет 4 МПа. Чему равна молярная масса неизвестного газа в $\frac{г}{моль}$? (*Ответ округлить до целых.*)

Дано:	**СИ**
$V = 6$ л	$= 6\cdot10^{-3}$ м^3
$T = 360$ К	
$p = 4$ МПа	$= 4\cdot10^6$ Па
$m_{H2} = 10$ г	$= 10^{-2}$ кг
$m_x = 30$ г	$= 3\cdot10^{-2}$ кг
$\mu_{H2} = 2\ \frac{г}{моль}$	$= 2\cdot10^{-3}\ \frac{кг}{моль}$
$R = 8{,}31\ \frac{Дж}{моль\cdot К}$	
$\mu_x - ?\ (\frac{г}{моль})$	

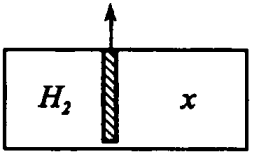


Рис. 130

Решение:

Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона:

$$pV=\frac{m}{\mu}RT=\nu RT,$$

где $\frac{m}{\mu}=\nu$ — число молей. $\Rightarrow$

$$\nu=\frac{pV}{RT}=$$

$$=\frac{4\cdot10^6\cdot6\cdot10^{-3}}{8{,}31\cdot360}=$$

$= 8{,}0224$ (моль) — общее число молей.

Проверка по размерности:

$$[\nu] = \frac{Па \cdot м^3 \cdot моль \cdot К}{Дж \cdot К} = \frac{Н \cdot м^3 \cdot моль}{м^2 \cdot Дж} = \frac{Н \cdot м \cdot моль}{Н \cdot м} = моль$$

показывает правильность полученной формулы.

Из них водорода — $\nu_{H2} = \frac{m_{H2}}{\mu_{H2}} = \frac{10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 5$ (моль). $\Rightarrow$

$\nu_x = \nu - \nu_{H2} = 8{,}0224 - 5 = 3{,}0224$ (моль) $\Rightarrow$

$$\mu_x = \frac{m_x}{\nu_x} = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{3{,}0224} = 9{,}925 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль} \approx 10 \frac{г}{моль}.$$

$$[\mu_x] = \frac{кг}{моль}.$$

Ответ: $10 \frac{г}{моль}$.

Задача 7.

Если температура идеального газа в состоянии 1 была T_0, то после осуществления процесса 1–2–3, изображенного на диаграмме pV (рис. 131), температура газа в состоянии 3 оказалась равной:

1) $12\,T_0$, 2) $9\,T_0$, 3) $6\,T_0$, 4) $4\,T_0$, 5) $3\,T_0$.

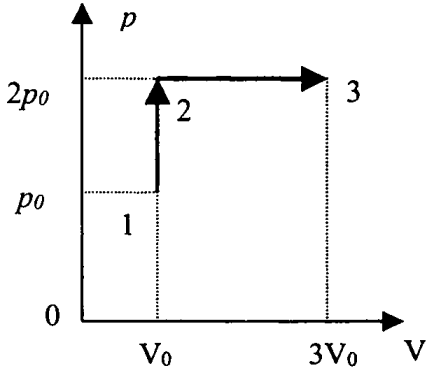


Рис. 131

Решение:

Рассмотрим процесс 1–2. Он происходит при постоянном объеме $\Rightarrow$ выполняется закон Шарля:

$$\frac{2p_0}{T_2} = \frac{p_0}{T_0} \Rightarrow T_2 = 2T_0.$$

Рассмотрим процесс 2–3. Он происхо-

дит при постоянном давлении ⇒ выполняется закон Гей-Люссака:

$$\frac{V_0}{T_2}=\frac{3V_0}{T_3} \Rightarrow T_3 = 3T_2 = 6T_0.$$

Проанализировав представленные варианты ответов, выбираем правильный ответ: № 3.

Ответ: № 3.

Задача 8.

Если в закрытом сосуде, где находится идеальный двухатомный газ, при неизменной температуре половина молекул газа распадется на атомы, то давление газа в сосуде:

1) уменьшится в 2 раза;
2) уменьшится в 1,5 раза;
3) увеличится в 1,5 раза;
4) увеличится в 2 раза;
5) останется неизменным.

Дано:	**Решение:**
$T = const$ $n_2 = \frac{n_0}{2}$	Из основного уравнения МКТ для давления: $p = n_0 kT.$
$\frac{p_1}{p}$ – ?	После распада половины двухатомных молекул число структурных элементов станет равно:

$$n_1 = \frac{n_0}{2} + \frac{n_0}{2}2 = \frac{3n_0}{2} \Rightarrow p_1 = \frac{3n_0}{2}kT \Rightarrow \frac{p_1}{p} = \frac{3}{2} \Rightarrow p_1 = 1{,}5\,p.$$

Проанализировав варианты ответов, выбираем ответ № 3.

Ответ: № 3.

Задача 9.

На рисунке 132, а изображен график изменения состояния идеального газа в координатах pV. Представим этот

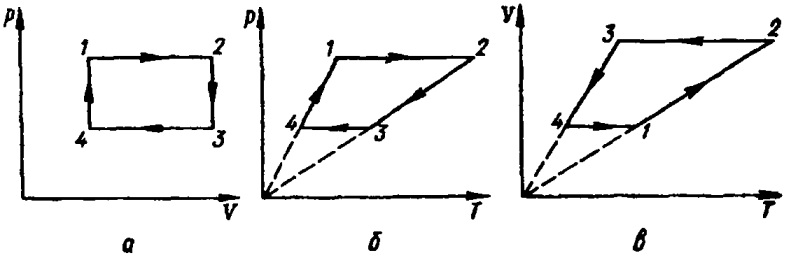


Рис. 132

круговой процесс в координатах pT и VT, обозначив соответствующие точки.

Решение:

Как видно из рисунка, участки 4–1 и 2–3 соответствуют изохорическим процессам, а 1–2 и 3–4 — изобарическому расширению и изобарическому сжатию соответственно.

Из уравнения Менделеева – Клапейрона следует, что графики изохорического ($V = const$) и изобарического ($p = const$) процессов в координатах pT и VT соответственно должны проходить через начало координат (рис. 132 б, в). Участок 4–1 соответствует изохорическому возрастанию давления, 2–3 — изохорическому понижению давления.

Задача 10.

Идеальный газ сначала охлаждается при постоянном давлении, потом его давление увеличивалось при постоянном объеме, затем при постоянной температуре объем газа увеличился до постоянного значения. Какой из графиков в координатных осях V — T на рисунке 133 соответствует этим изменениям состояния газа?

Решение:

Рассмотрим подробно условие задачи:

1) $p = const$, $T\downarrow\Rightarrow$ этому процессу может соответствовать 1-й и 3-й графики. 4-й отпадает, так как там изобар-

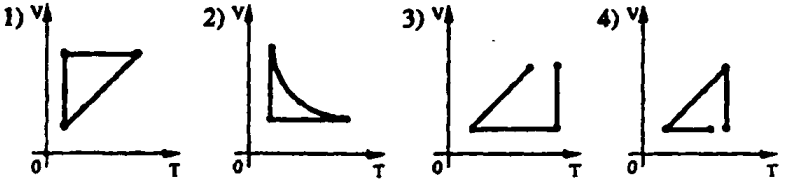


Рис. 133

ный процесс не является начальным, 2-й график вообще не имеет изобарного процесса;

2) $V = const, p\uparrow \Rightarrow$ из оставшихся двух графиков не подходит этим условиям 1-й график, так как там $T\downarrow$ $\left(\frac{p}{T} = const\right) \Rightarrow p\uparrow \Rightarrow T\uparrow$;

3) $T = const$, $V\uparrow \Rightarrow$ 3-й график соответствует этим параметрам.

Ответ: № 3.

Задача 11.

Плотность золота $\rho = 19{,}3 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$, молярная масса $\mu = 197 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{моль}$. Среднее значение объема, занимаемого одним атомом, равно:

1) $0{,}7 \cdot 10^{-29}$ м^3; 2) $1{,}7 \cdot 10^{-29}$ м^3; 3) $2{,}7 \cdot 10^{-29}$ м^3; 4) $3 \cdot 10^{-29}$ м^3; 5) $6 \cdot 10^{-29}$ м^3.

Дано:

$\rho = 19{,}3 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{м^3}$

$\mu = 197 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{моль}$

$V_0 - ?$

Решение:

Плотность $\rho = \frac{m_0}{V_0}$, где m_0 — масса одной молекулы, а V_0 — ее объем.

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A} \Rightarrow \rho = \frac{\mu}{V_0 N_A} \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{\mu}{\rho N_A} = \frac{197 \cdot 10^{-3}}{19{,}3 \cdot 10^3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}} = 1{,}69 \cdot 10^{-29}\ (\text{м}^3) \approx$$
$$\approx 1{,}7 \cdot 10^{-29}\ (\text{м}^3).$$

Проверка по размерности:

$$[V_0] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{кг}} = \text{м}^3.$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильный ответ — 2.

Ответ: 2.

Задача 12.

Если в баллоне находится m = 50 кг идеального газа под давлением P_1 = 10 МПа, а затем при неизменной температуре давление в баллоне упало до P_2 = 3 МПа, то это означает, что из баллона выпустили … газа

1) 7 кг; 2) 21 кг; 3) 9 кг; 4) 35 кг; 5) 30 кг.

Дано:	**СИ**
m = 50 кг	
$T = const$	
P_1 = 10 МПа	$= 1 \cdot 10^7$ Па
P_2 = 3 МПа	$= 3 \cdot 10^6$ Па
Δm – ?	

Решение:

Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \Rightarrow m_1 = \frac{p_1 V \mu}{RT},$$

соответственно $m_2 = \dfrac{p_2 V \mu}{RT}$.

Так как газ в баллоне один и тот же, то $\mu = const$.

Разделим одно равенство на другое:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{P_1}{P_2} \Rightarrow m_2 = \frac{m_1 P_2}{P_1} = \frac{50 \cdot 3 \cdot 10^6}{10^7} = 15\ (\text{кг}). \Rightarrow$$

$\Delta m = m_1 - m_2 = 50 - 15 = 35$ (кг).

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильный ответ — № 4.

Ответ: № 4.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 6.

Задача 1.

На какой глубине пузырьки воздуха имеют диаметр, вдвое меньше, чем у поверхности воды, если атмосферное давление на уровне воды равно $1{,}01 \cdot 10^5 \ \frac{Н}{м^2}$.

Ответ: 71 м.

Задача 2.

Теплоизолированный сосуд объемом 2 м^3 разделен перегородкой на две равные части. В одной части сосуда находится 1 кг гелия, а в другой — 1 кг аргона. Средняя квадратичная скорость атомов аргона равна средней квадратичной скорости атомов гелия и составляет $500 \ \frac{м}{с}$. Определить парциальное давление гелия после удаления перегородки.

Ответ: $7{,}6 \cdot 10^4$ Па.

Задача 3.

Какой станет плотность воздуха при температуре 27 °С и давлении $4 \cdot 10^5$ Па, если при нормальных условиях она равна $1{,}3 \ \frac{кг}{м^3}$?

Ответ: $4{,}7 \ \frac{кг}{м^3}$.

Задача 4.

Если в закрытом сосуде средняя квадратичная скорость молекул идеального газа увеличится на 10%, то как изменится давление этого газа?

Ответ: возрастет в 1,21 раза.

Задача 5.

Объем воздуха в комнате равен 100 м^3. Какова масса вышедшего из нее воздуха при повышении температуры с 10 °С до 25 °С, если атмосферное давление 770 мм рт. ст.?

Ответ: 6,35 кг.

Задача 6.

При увеличении абсолютной температуры идеального газа в два раза давление газа увеличилось на 25%. Во сколько раз при этом изменился объем?

Ответ: увеличился в 1,6 раза.

Задача 7.

Баллон содержит идеальный газ при температуре 27 °С и давлении 200 кПа. Из баллона выпустили 80% газа и охладили его до температуры 12 °С. Какое давление установилось в баллоне?

Ответ: 39 кПа.

Задача 8.

В узкой стеклянной трубке, расположенной горизонтально, находится столбик воздуха длиной 80 мм, запертый столбиком ртути длиной 40 мм. Какова будет длина воздушного столбика, если трубку расположить вертикально открытым концом кверху? (Атмосферное давление 760 мм рт. ст.)

Ответ: 76 мм.

Задача 9.

При температуре 7 °С в баллоне находится 20 л азота. При неизменной температуре израсходовали 120 г азота. Насколько понизилось давление газа в баллоне ?

Ответ: $5 \cdot 10^6 \ \frac{Н}{м^2}$.

Задача 10.

Какое количество вещества содержится в медной отливке массой 16 кг? Относительная атомная масса меди равна 64.

Ответ: 250 моль.

Задача 11.

Сосуд объемом 4 л разделен перегородкой на две части. В одной находится 12 г гелия (молярная масса $\mu_{He} = 4\ \frac{г}{моль}$), в другой — 64 г кислорода (молярная масса $\mu_{O_2} = 32\ \frac{г}{моль}$). Температура каждого из газов равна 385 К. Если убрать перегородку, то давление получившейся смеси газа будет равно ... МПа. (*Ответ округлите до целых.*)

Ответ: 4 МПа.

Задача 12.

При повышении температуры идеального газа на $\Delta T = 100$ К средняя квадратичная скорость движения молекул выросла с $\upsilon_{ср.кв.1} = 200\ \frac{м}{с}$ до $\upsilon_{ср.кв.2} = 600\ \frac{м}{с}$. Чтобы средняя квадратичная скорость уменьшилась с $\upsilon_{ср.кв.2} = 600\ \frac{м}{с}$ до $\upsilon_{ср.кв.3} = 400\ \frac{м}{с}$, на сколько градусов надо понизить температуру газа?

Ответ: на 62,5 К.

Тест № 6

Задача 1.

Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а среднеквадратичная скорость молекул уменьшится в 3 раза?

1) увеличится в 3 раза;
2) увеличится в 9 раз;
3) уменьшится в 9 раз;
4) уменьшится в 3 раза;
5) не изменится.

Задача 2.

На рисунке 134 показаны две изохоры для газа одной и той же массы. Углы наклона изохор к оси абсцисс равны α_1 и α_2. Как относятся объемы газа?

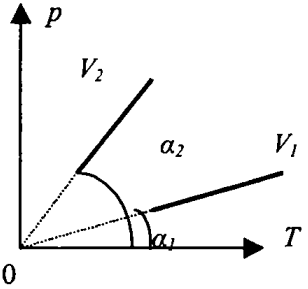


Рис. 134

1) $\frac{V_2}{V_1} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}$; 2) $\frac{V_2}{V_1} = \frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2}$;

3) $\frac{V_2}{V_1} = \frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1}$; 4) $\frac{V_2}{V_1} = \frac{tg\alpha_1}{tg\alpha_2}$; 5) $\frac{V_2}{V_1} = \frac{\sin\alpha_2}{\sin\alpha_1}$.

Задача 3.

Какие из приведенных ниже утверждений верны?

А. Плотность газа зависит от температуры.

Б. Давление газа определяется концентрацией молекул и температурой.

В. При нормальных условиях 1 моль газа занимает объем, зависящий от молярной массы.

Г. При нормальных условиях концентрация молекул у всех газов одинакова.

1) А, Б; 2) А, Б, Г; 3) А, Б, В; 4) Б, В, Г; 5) А, Г.

Задача 4.

На диаграмме *PT* (рис. 135) представлена зависимость давления от температуры при изохорном нагревании различных масс одного и того же газа в одинаковых по объему сосудах. Что можно сказать о массах этого газа?

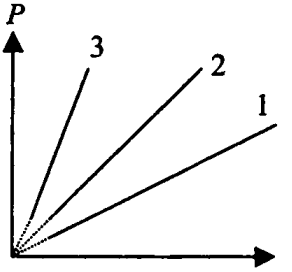


Рис. 135

1) $m_1 > m_2 > m_3$;
2) $m_1 < m_2 < m_3$;
3) $m_1 = m_2 = m_3$;
4) при различных значениях объема зависимость может быть разная;
5) для разных газов может быть разная зависимость.

Задача 5.

Если перегородку, разделяющую сосуд на две части с объемами V_1 и V_2, в которых находился один и тот же газ под давлениями P_1 и P_2, удалить, то в сосуде установится давление (температуру считать неизменной):

1) $\dfrac{p_1V_1 - p_2V_2}{V_1 + V_2}$; 2) $\dfrac{p_1V_1 - p_2V_2}{V_1 - V_2}$; 3) $P_1 + P_2$;

4) $\dfrac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_1 + V_2}$; 5) $\dfrac{p_1V_2 + p_2V_1}{V_1 + V_2}$.

Задача 6.

Если баллон, содержащий 12 л кислорода при давлении 1 МПа, соединить с пустым баллоном вместимостью 3 л, то в процессе изотермического расширения газа в сосудах установится давление:

1) 4,0 МПа; 2) 0,8 МПа; 3) 0,6 МПа;
4) 0,4 МПа; 5) 0,2 МПа.

Задача 7.

Со дна водоема поднимается пузырек воздуха. Как меняется по мере подъема пузырька сила, выталкивающая его из воды?

1) не меняется;
2) убывает;
3) возрастает;
4) зависит от плотности воды;
5) нет правильного ответа.

Задача 8.

Горизонтально расположенный закрытый цилиндрический сосуд с гладкими стенками разделен тонким подвижным теплопроводящим поршнем на две части, в которых находятся равные массы различных идеальных газов: в одной части газ с молярной массой μ_1, в другой — с молярной массой μ_2. Какую часть объема сосуда занимает газ с молярной массой μ_2 при равновесном положении поршня?

1) $\frac{\mu_1}{\mu_1+\mu_2}$; 2) $\frac{\mu_2}{\mu_1-\mu_2}$; 3) $\frac{2\mu_2}{\mu_1-\mu_2}$;

4) $\frac{\mu_1}{\mu_1+2\mu_2}$; 5) $\frac{\mu_2}{\mu_1+\mu_2}$.

Задача 9.

Сколько молекул ртути содержится в 1 см^3 воздуха в помещении объемом 30 м^3, в котором испарился 1 г ртути? Молярная масса ртути равна 0,201 $\frac{кг}{моль}$.

1) $1{,}0\cdot10^{14}$; 2) $1{,}5\cdot10^{13}$; 3) $3{,}0\cdot10^{12}$;
4) $5{,}5\cdot10^{11}$; 5) $1{,}0\cdot10^{10}$.

Задача 10.

Если в сосуде вместимостью 1 м^3 находится 1,2 кг идеального газа при давлении 10^5 Па, то средняя квадратичная скорость молекул газа равна:

1) 200 $\frac{м}{с}$; 2) 300 $\frac{м}{с}$; 3) 400 $\frac{м}{с}$;
4) 500 $\frac{м}{с}$; 5) 600 $\frac{м}{с}$.

Задача 11.

Сосуд разделен перегородкой на две части. В одной находится 1 моль газа гелия (молярная масса $\mu_{He} = 4\ \frac{г}{моль}$), в другой — 3 моля кислорода (молярная масса $\mu_{O_2} = 32\ \frac{г}{моль}$). Температура каждого из газов равна 360 К. Если убрать перегородку, то давление получившейся смеси газа будет равно 3 МПа. Чему равен объем сосуда в литрах?

1) 4 л; 2) 0,004 л; 3) 48 л; 4) 0,0048 л; 5) 2 л.

Задача 12.

При повышении температуры идеального газа на $\Delta T_1 = 100$ К среднеквадратичная скорость движения молекул выросла с $\upsilon_{ср.кв.1} = 400\ \frac{м}{с}$ до $\upsilon_{ср.кв.2} = 600\ \frac{м}{с}$. Если бы надо было увеличить среднюю квадратичную скорость с $\upsilon_{ср.кв.1} = 400\ \frac{м}{с}$ до $\upsilon_{ср.кв.2} = 700\ \frac{м}{с}$, температуру газа надо было повысить на:

1) 125 К; 2) 150 К; 3) 165 К; 4) 200 К; 5) 250 К.

ГЛАВА 4. ТЕРМОДИНАМИКА

Программа по этому разделу физики содержит следующие вопросы:

Количество теплоты. Теплоемкость вещества. Работа в термодинамике. Закон сохранения энергии в тепловых процессах (первый закон термодинамики). Применение первого процесса термодинамики к различным изопроцессам. Адиабатный процесс.

Необратимость тепловых процессов. Второй закон термодинамики и его статистическое истолкование.

Преобразование энергии в тепловых двигателях. КПД теплового двигателя и его максимальное значение. Тепловые двигатели и охрана природы.

Жидкости и твердые тела. Испарение и конденсация. Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажность воздуха. Кипение жидкостей. Зависимость температуры кипения жидкости от давления.

Кристаллические и аморфные тела. Преобразование энергии при изменениях агрегатного состояния вещества.

Измерение давления газа, влажности воздуха, температуры, плотности вещества.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

4.1. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамика — раздел физики, рассматривающий явления, связанные с взаимопревращением механической

и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одного тела к другому.

Термодинамической системой называется совокупность тел, выделенная для рассмотрения вопросов термодинамики.

4.1.1. Изменение внутренней энергии

Изменение внутренней энергии ΔU (см. п. 3.1.3, 3.3.8) может быть осуществлено двумя способами:

- путем совершения над телом работы: сжатие, растяжение тела; работа механизмов: пилы, дрели;
- путем сообщения телу теплоты, то есть через теплопередачу: нагревание в закрытом сосуде, нагревание жидкости.

Процесс перехода внутренней энергии от одного тела к другому без совершения над телом работы называется ***теплопередачей***.

Существует три вида теплопередачи:

- ***конвекция*** — процесс передачи количества теплоты путем перемешивания холодных и теплых слоев жидкости или газа (центральное водяное отопление, ветры, морские течения, тяга в трубах, нагревание жидкости снизу сосуда);
- ***теплопроводность*** — процесс передачи количества теплоты от более нагретой части тела к менее нагретой без перемещения частиц (металлы — хорошие проводники тепла, дерево, стекло, кожа — плохие, газы менее теплопроводны, чем жидкость $\Rightarrow$ плохая теплопроводность пористых тел);
- ***лучеиспускание*** — теплопередача через излучение с помощью электромагнитных волн (энергия, получаемая Землей от Солнца).

4.1.2. Количество теплоты

Количеством теплоты ΔQ называется количество энергии, переданной от тела телу в результате теплопередачи (без совершения работы). $[\Delta Q]$ = Дж.

Количество теплоты является тепловой энергией, которая представляет один из видов энергии, подобно механической, и подчиняется закону сохранения энергии. Все виды энергии могут частично превращаться друг в друга. Для изменения температуры или агрегатного состояния тела необходим подвод или отвод тепла.

О количестве теплоты можно говорить пока идет процесс теплопередачи. Как только он закончился, говорят о внутренней энергии.

Количество теплоты, необходимое для нагревания данного тела, пропорционально его массе m и изменению температуры ΔT:

$\Delta Q = cm\Delta T$. $[\Delta Q]$ = Дж.

Коэффициентом пропорциональности в этом выражении является ***удельная теплоемкость вещества*** c.

4.1.3. Теплоемкость

Теплоемкостью тела C называется величина, равная количеству теплоты ΔQ, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить его температуру на 1 К:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \ [C] = \frac{Дж}{К};$$

$$C = mc,$$

где m — масса тела;

c — ***удельная теплоемкость вещества:***

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}, \ [c] = \frac{Дж}{кгК}.$$

4.1.4. Работа в газовых процессах

Если газу, заключенному под поршнем площадью S, сообщить некоторое количество теплоты ΔQ, то газ произведет работу по подъему поршня (рис. 136):

$A = F\Delta h$,

$$p = \frac{F}{S} \Rightarrow F = pS \Rightarrow$$

$A = pS\Delta h = p\Delta V \Rightarrow$

Работа расширения в газовых процессах:

$A = p\Delta V$,

где p — давление; ΔV — изменение объема газа.

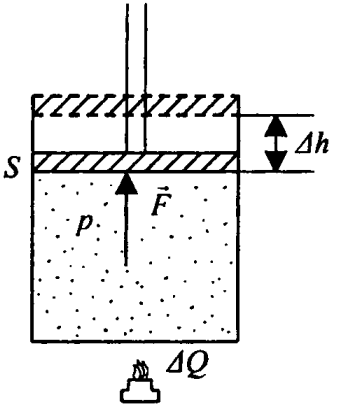


Рис. 136

Очевидно, что работа A численно равна площади под графиком зависимости давления от объема (рис. 137).

Различаются работа A, которая совершается системой над внешними телами ($A\uparrow$), и работа ($A\downarrow$), которая совершается внешними телами над системой. Эти работы численно равны и противоположны по знаку: работа ($A\uparrow$) принимается ***положительной***, ($A\downarrow$) — ***отрицательной***.

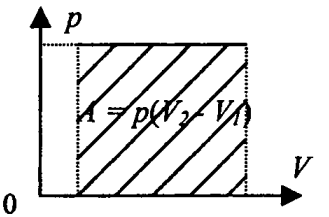


Рис. 137

4.1.5. Термодинамические процессы

Термодинамическое состояние каждого газа определяется тремя величинами, называемыми ***параметрами состояния*** или ***термодинамическими параметрами***: давлением, объемом и абсолютной температурой.

Термодинамическим процессом называется всякое изменение двух или сразу трех параметров состояния тела (см. п. 3.2.1).

Для изучения и сравнения различных термодинамических процессов их изображают графически. ***Графическое изображение процессов*** **дают** ***термодинамические диаграммы*** (см. рис. 126–128).

4.1.6. Первый закон термодинамики

Закон сохранения энергии приобретает в термодинамике специальный вид: при его применении необходимо учитывать внутреннюю энергию тела, т.е. кинетическую и потенциальную энергию его молекул.

Первый закон термодинамики (закон сохранения и превращения энергии в тепловых процессах): количество теплоты ΔQ, переданное системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии ΔU и на работу против внешних сил:

$\Delta Q = \Delta U + A\uparrow$.

Если работа совершается внешними силами над системой, то $\Delta Q = \Delta U - A\downarrow$,

где $A\uparrow = -A\downarrow$ ($A\downarrow$ — работа внешних сил над системой).

Применение первого закона термодинамики к различным изопроцессам:

1. ***Изобарный процесс*** ($p = const$):

$\Delta Q = \Delta U + A = \Delta U + p\Delta V$;

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T \Rightarrow \Delta Q = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T + p\Delta V.$$

Таким образом, при ***изобарическом процессе*** подведенное к газу количество теплоты частично идет на увеличение его внутренней энергии, а частично тратится на выполнение работы газом в процессе его расширения.

Из уравнения Менделеева–Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu}RT \Rightarrow p\Delta V = \frac{m}{\mu}R\Delta T \Rightarrow$$

$$\Delta Q = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T + \frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{5}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{5}{2}p\Delta V.$$

2. ***Изотермический процесс*** ($T = const \Rightarrow \Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$):

$\Delta Q = A = p\Delta V \Rightarrow$

При изотермическом процессе все подведенное к газу количество теплоты идет ***на выполнение газом работы.***

3. ***Изохорный процесс*** ($V = const \Rightarrow \Delta V = 0 \Rightarrow A = 0$):

$$\Delta Q = \Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T \Rightarrow$$

При изохорическом процессе всё подведенное к газу количество теплоты идет ***на увеличение его внутренней энергии.***

4. ***Адиабатный процесс: адиабатным*** называется процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой

($\Delta Q = 0$):

$\Delta U = -A\uparrow \Rightarrow$

При адиабатном процессе система может выполнять работу над внешними телами (расширение газа) только за счет своей внутренней энергии. И наоборот: когда при адиабатном процессе внешние тела совершают работу над системой, то ее внутренняя энергия увеличивается.

На рисунке 138 в координатах PV представлены адиабата и изотерма $\Rightarrow$ адиабата «круче» изотермы так как тепло, возникающее при адиабатном сжатии, вызывает повышение температуры, $\Rightarrow$ дополнительное увеличение давления.

Согласно первому закону термодинамики могут протекать только те процессы, при которых полная энергия си-

стемы остается неизменной, т.е. не может быть создан ***вечный двигатель первого рода***, совершающий работу большую, чем энергия, которая подводится к двигателю извне.

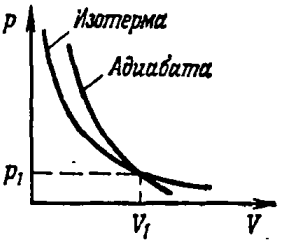


Рис. 138

4.1.7. Второй закон термодинамики

Превращение тепловой энергии полностью в механическую не связано с нарушением первого закона термодинамики, тем не менее оно невозможно по второму закону термодинамики.

Второй закон термодинамики утверждает, что невозможен процесс, при котором теплота переходила бы произвольно от тел более холодных к более нагретым.

Несмотря на качественный характер этого утверждения, оно позволяет определить максимальный ***КПД*** теплового двигателя: у всех машин с обратимым циклом Карно максимальный ***КПД*** равен (см. п. 4.1.8):

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H} 100\%.$$

Согласно второму закону термодинамики невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную работу, т.е. не может быть создан ***вечный двигатель второго рода***.

4.1.8. Тепловой двигатель

Тепловым двигателем называется устройство, превращающее внутреннюю энергию обычного или ядерного топлива в механическую энергию. Энергия, которая выде-

ляется при сгорании топлива или при ядерных реакциях, передается путем теплообмена какому-нибудь газу. При расширении газа совершается работа против внешних сил и приводится в движение какой-нибудь механизм.

Любой тепловой двигатель состоит из трех основных частей: рабочего тела, нагревателя и холодильника. ***Рабочее тело*** — газ или пар — при расширении совершает работу.

КПД теплового двигателя:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H} 100\%,$$

$$\eta = \frac{A}{Q_H} 100\%,$$

где Q_H — количество теплоты, отданной за один цикл рабочему телу от нагревателя;

Q_X — количество теплоты, переданной за один цикл от рабочего тела холодильнику (рис. 139),

$A = Q_H - Q_X$ — работа, совершенная рабочим телом за один цикл.

Если T_H и T_X — температура нагревателя и холодильника, то ***максимальный КПД идеальной тепловой машины:***

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_X}{T_H} 100\% \Rightarrow$$

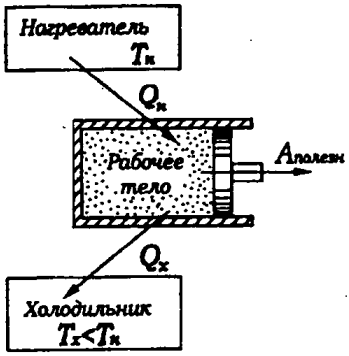


Рис. 139

Любая реальная тепловая машина может иметь ***КПД***, не превышающий это максимальное значение.

Пути повышения КПД теплового двигателя

- повышение температуры нагревателя;
- понижение температуры холодильника;

- уменьшить теплообмен;
- уменьшить трение в машине.

Значения КПД различных двигателей

№ п/п	Тип двигателя	η (%)
1.	Паровые машины	≤ 20
2.	Газовые турбины	≤ 34
3.	Двигатель внутреннего сгорания	≤ 39
4.	Реактивный двигатель	≤ 42
5.	Паровые турбины	≤ 43

4.1.9. Цикл Карно

В тепловых двигателях стремятся достичь наиболее полного превращения тепловой энергии в механическую. Французский исследователь С. Карно обнаружил, что наиболее благоприятные соотношения получаются, когда газ совершает определенный цикл, названный впоследствии его именем. Цикл Карно состоит из четырех последовательных термодинамических процессов, изображенных на рисунке 140: здесь два изотермических процесса (1–2 и 3–4) и два адиабатических (2–3 и 4–1).

На рисунке 141 площадь фигуры с горизонтальными штрихами — совершенная газом за время цикла механи-

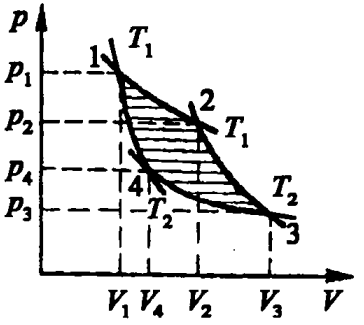


Рис. 140

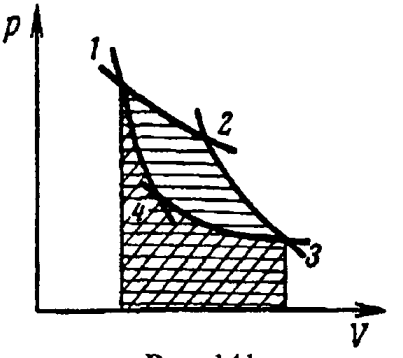


Рис. 141

ческая (полезная) работа, площадь фигуры с ромбическими штрихами — количество теплоты, отданное холодильнику ⇒ сумма этих площадей — количество теплоты, полученное от нагревателя.

4.2. ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

4.2.1. Уравнение теплового баланса

Если несколько тел с различными температурами привести в соприкосновение, то между ними происходит теплообмен, который приводит к выравниванию температуры тел.

Уравнение теплового баланса: по закону сохранения энергии, если тела не совершают работу, то количество теплоты, отданной более нагретыми телами, равно количеству теплоты, полученной менее нагретыми телами:

$\Delta Q_1 = \Delta Q_2$ или:

$c_1 m_1 (t_1 - \theta) = c_2 m_2 (\theta - t_2)$,

где θ — температура, установившаяся в результате теплообмена. Причем и слева, и справа может быть несколько слагаемых.

4.2.2. Удельная теплота сгорания топлива

При сгорании топлива выделяется тепловая энергия:

$\Delta Q = qm$,

где q — удельная теплота сгорания топлива;

m — масса сгоревшего топлива.

Удельной теплотой сгорания топлива q называется величина, численно равная количеству теплоты, выделяющейся при сгорании единицы массы вещества топлива:

$$q = \frac{\Delta Q}{m}, \ [q] = \frac{Дж}{кг}.$$

Значение q для каждого вида топлива можно взять из справочных таблиц.

4.2.3. Агрегатное состояние вещества

Вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Каждое агрегатное состояние характеризуется определенной внутренней структурой вещества и соответственно определенными свойствами.

Фазой называется физически однородная часть вещества, отделенная от остальных частей системы границей раздела (например, лед, вода, пар).

Фазовым переходом называется переход из одной фазы в другую, из одного агрегатного состояния в другое. Плавление твердого тела, затвердевание жидкости, испарение и конденсация пара — примеры фазового перехода. Такой переход при заданном давлении происходит при строго определенной температуре.

Переход в агрегатное состояние, отвечающее ***более высокой температуре***, требует ***подвода энергии***.

Переход в агрегатное состояние, отвечающее ***более низкой температуре***, сопровождается ***выделением энергии***.

Изменение агрегатного состояния представлено на рисунке 142.

Рис. 142

Связь между внутренней энергией и агрегатным состоянием вещества такова:

- в жидком состоянии внутренняя энергия больше, чем в твердом;
- в газообразном состоянии внутренняя энергия больше, чем в жидком.

4.2.3.1. Плавление и отвердевание

Плавлением называется процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое. Фазовый переход из твердой фазы в жидкую (из жидкой в твердую) сопровождается поглощением (выделением) определенной теплоты плавления ΔQ (рис. 143).

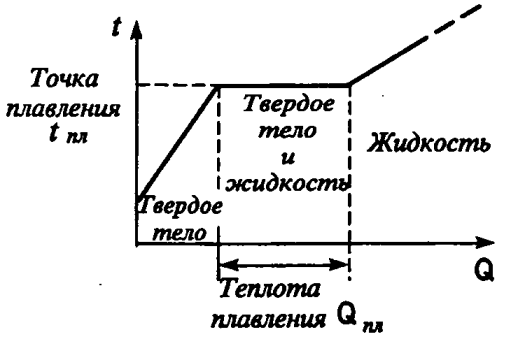


Рис. 143

Теплота плавления равна теплоте отвердевания.

Удельная теплота плавления и отвердевания λ представляет собой количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы вещества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления и постоянном давлении:

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{m}, \text{ при } t = t_{пл}, [\lambda] = \frac{Дж}{кг}.$$

Точкой или ***температурой плавления*** называется температура, при которой плавится (или отвердевает) кристаллическое тело при ***постоянном давлении***.

Температура плавления существует только у ***кристаллических*** тел (имеющих кристаллическую решетку): металлы, лед.

Аморфные тела (стекло, воск, парафин, вар) не имеют определенной точки плавления. Различие характера плавления кристаллических и аморфных тел представлено на рисунках 144 и 145.

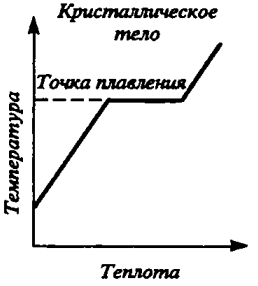


Рис. 144

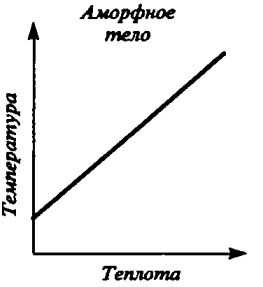


Рис. 145

4.2.3.2. Парообразование. Конденсация. Испарение и кипение

Парообразование — процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное. Фазовый переход из жидкой фазы в газообразную (из газообразной — в жидкую) сопровождается поглощением (выделением) определенной теплоты парообразования:

$\Delta Q = rm$,

где r — удельная теплота парообразования и конденсации.

Теплота плавления равна теплоте отвердевания.

Удельная теплота парообразования и конденсации r — величина, численно равная количеству теплоты, не-

обходимому для превращения единицы массы жидкости в пар при температуре кипения:

$$r = \frac{\Delta Q}{m}, \text{ при } t = t_{кип}, [r] = \frac{Дж}{кг}.$$

Точка или ***температура кипения*** — температура кипения жидкости при ***постоянном давлении***. При увеличении внешнего давления температура кипения повышается (в скороварке), при уменьшении — понижается (в горах жидкость кипит при температуре меньшей, чем 100 °С, поэтому в горах туристам не разрешается варить мясо — только тушенка).

Если жидкость при комнатной температуре поместить под купол и постепенно уменьшать давление под ним, то жидкость ***закипит***.

Парообразование может происходить двумя путями: ***испарением*** и ***кипением***.

Испарение — процесс парообразования, происходящий с открытой поверхности жидкости при любой температуре. Интенсивность испарения зависит от:

- площади свободной поверхности жидкости (увеличивается количество молекул, вылетающих из жидкости в единицу времени);
- температуры жидкости (увеличивается скорость движения молекул и их кинетическая энергия ⇒ увеличивается число молекул, способных преодолеть молекулярное притяжение жидкости);
- наличия ветра над поверхностью жидкости (удаляются образовавшиеся над жидкостью пары);
- рода жидкости (у летучих жидкостей силы сцепления между молекулами меньше).

Кипение — процесс парообразования, происходящий одновременно внутри и на поверхности жидкости при температуре кипения.

Механизм кипения

В жидкости при ее нагревании выделяются пузырьки растворенного воздуха, содержащие внутри пар жидкости, появляющийся при повышении ее температуры. При этом можно выделить ***две фазы кипения***:

1. Температура жидкости внизу T_1 больше температуры жидкости вверху T_2. Пузырек воздуха сначала появляется на дне сосуда (рис. 146, а), затем отрывается и на дне образуется зародыш нового пузырька. Под действием выталкивающей силы пузырьки поднимаются вертикально вверх, водяной пар в нем конденсируется, а воздух снова растворяется в воде: объем пузырька начинает уменьшаться (рис. 146, в).

2. $T_1 = T_2$ вследствие конвекции. Объем пузырьков при подъеме будет уже возрастать, так как когда пузырек поднимается вверх при одинаковой температуре во всей жидкости, то постоянным остается давление насыщающего пара внутри пузырька, а гидростатическое давление уменьшается ⇒ пузырек растет (рис. 146, г). Так как при постоянной температуре давление насыщающего пара от объема не зависит, то все пространство внутри пузырька при его росте заполнятся насыщающим паром (рис. 146, г). Когда такой пузырек достигает поверхности жидкости, то давление насыщающего пара в нем практически равно атмосферному давлению на поверхности жидкости. На поверхности жидкости пузырек лопает-

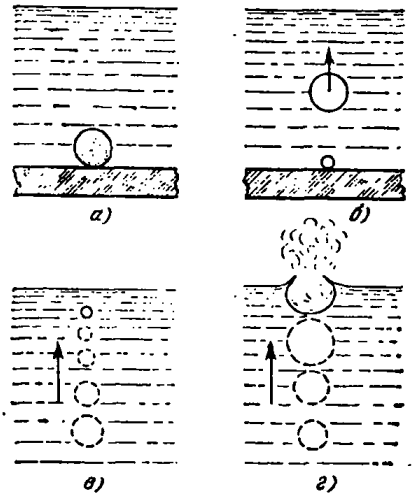


Рис. 146

ся, а находящееся в нем значительное количество насыщающего пара выходит в окружающую среду.

Описанный процесс роста пузырьков с насыщающим паром и выделения этого пара в окружающую среду и есть ***кипение***. Таким образом, ***кипение жидкости*** происходит при одинаковой температуре всей жидкости, когда давление насыщающего пара этой жидкости равно внешнему давлению.

Опыт показывает, что температура кипящей жидкости и температура пара над ее поверхностью одинаковы. Это означает, что вся энергия, подводимая к жидкости в процессе ее кипения, идет только на увеличение потенциальной энергии молекул и на работу против внешних сил в процессе расширения вещества.

4.2.3.3. Сублимация и десублимация

Сублимацией называется процесс прямого перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу (см. рис. 142). Иначе этот процесс называется ***возгонкой***.

Теплота сублимации равна сумме теплот плавления и парообразования.

К сублимации способны такие вещества, как сера, кристаллы льда (белье сохнет на морозе).

Процесс, обратный сублимации: прямой переход вещества из газообразного состояния в твердое, минуя жидкую фазу, называется ***десублимацией*** (образование морозных узоров на стекле).

4.2.4. Насыщенный и ненасыщенный пары

При испарении жидкости идет двойной процесс: переход молекул жидкости в пространство над ее поверхностью и обратный.

Насыщенным (***насыщающим***) называется ***пар,*** находящийся в состоянии ***динамического равновесия*** со своей жидкостью: число испарившихся молекул в точности равно числу конденсирующихся, из-за чего концентрация пара в пространстве над жидкостью максимальна и не изменяется.

При меньшей концентрации — пар ненасыщенный.

Давление, при котором пар становится насыщающим, зависит от температуры и ***называется давлением насыщенного пара.***

Свойства насыщающих паров:

- при данной температуре давление и плотность насыщенного пара — величина постоянная;
- давление и плотность насыщенных паров различных жидкостей — разные (больше у летучих жидкостей);
- давление насыщенного пара — наибольшее возможное давление при данной температуре;
- с повышением температуры давление насыщенного пара увеличивается;
- при температуре кипения жидкости давление насыщенного пара — наибольшее;
- наличие других газов над испаряющейся жидкостью не влияет на давление (и плотность) насыщенного пара данной жидкости, а только замедляет процесс испарения до насыщения.

Ненасыщенный пар, далекий от насыщения, подчиняется законам газового состояния, притом, тем точнее, чем он дальше от насыщения.

4.2.5. Влажность

В атмосфере воздуха всегда присутствует некоторое количество водяного пара. Содержание водяного пара в атмосфере зависит от места и времени и называется ***влажностью*** воздуха.

Влажность бывает абсолютная и относительная.

Абсолютной влажностью воздуха называется масса водяного пара, фактически содержащегося в единице объема воздуха при данной температуре, т.е. плотность содержащегося в воздухе водяного пара:

$$\rho_A = \frac{m}{V}.$$

Относительной влажностью φ называется отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной.

Если ρ_A — плотность и p_A — парциальное давление водяного пара при данной температуре, ρ_H — плотность и p_H — давление насыщенного пара при той же температуре (ρ_H и p_H могут быть взяты из таблиц), то ***относительная влажность*** может быть рассчитана по формуле:

$$\varphi = \frac{\rho_A}{\rho_H}100\% = \frac{p_A}{p_H}100\%. \ [\varphi] = \%.$$

Температура t_p, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется ***точкой росы***.

Абсолютная влажность воздуха равна влажности насыщенного пара при температуре, равной точке росы.

Относительная влажность меняется при изменении температуры. При понижении температуры (например, ночью) до точки росы ненасыщенный водяной пар может превратиться в насыщенный и относительная влажность станет равной 100%. В результате начнется конденсация излишних водяных паров в виде росы.

При температурах выше 30 °С плотность насыщенного пара следует вычислять из уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}.$$

Измерение влажности воздуха

- Для определения относительной влажности воздуха используются ***волосяные гигрометры***. В них применяются обезжиренные волосы (гигроскопические), длина которых меняется с изменением влажности.
- Для быстрого и точного определения влажности воздуха используются ***психрометры***. Они состоят из двух одинаковых термометров: влажного (обернутого мокрой материей) и сухого. Разность их температур служит мерой относительной влажности и рассматривается с применением психрометрической таблицы. Если $\varphi = 100$ %, то $\Delta T = 0$.

Указания к решению задач

Методика решения задач на термодинамику

1. При решении задач на первый закон термодинамики необходимо помнить, что в уравнении все три величины ΔQ, ΔU, A должны быть выражены в одних единицах.

2. В общем случае при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия меняется одновременно, как за счет совершения работы A, так и за счет передачи теплоты ΔQ.

3. При определении процесса, при котором происходит изменение термодинамических параметров, необходимо применять первый закон термодинамики именно ***для данного процесса***.

4. При составлении уравнения теплового баланса удобно пользоваться обозначением температуры — θ, установившейся в результате теплообмена.

5. При решении задач на тепловые двигатели удобно пользоваться безразмерной формой ***КПД***.

Примеры решения задач

Задача 1.

Количество молей идеального газа, который при изобарическом нагревании на 100 К совершил работу 16,6 кДж, равно (универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31\ \frac{Дж}{моль \cdot К}$)

1) 2; 2) 5; 3) 25; 4) 20; 5) 4.

Дано:	СИ	Решение:
$p = const$ $\Delta T = 100$ К $A = 16{,}6$ кДж $R = 8{,}31\ \frac{Дж}{моль \cdot К}$	$= 16{,}6 \cdot 10^3$ Дж	$p = const \Rightarrow A = p\Delta V$, где ΔV — изменение объема газа. Из уравнения Менделеева–Клапейрона: $p\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T \Rightarrow$ $\frac{m}{\mu} = \frac{A}{R\Delta T}$.
$\frac{m}{\mu}$ – ?		

Сделаем проверку по размерности:

$$\left[\frac{m}{\mu}\right] = \frac{Дж \cdot К \cdot моль}{Дж \cdot К} = моль.$$

$$\frac{m}{\mu} = \frac{16{,}6 \cdot 10^3}{8{,}3 \cdot 10^2} = 20 \text{ моль}.$$

Проанализировав представленные варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 4.

Ответ: № 4.

Задача 2.

Некоторое количество идеального газа совершает замкнутый процесс 1–2–3–1, который изображен на графике

зависимости объема от температуры (рис. 147, а). Изобразить этот процесс в координатах pV и указать, на каких стадиях процесса газ получал, а на каких — отдавал тепло.

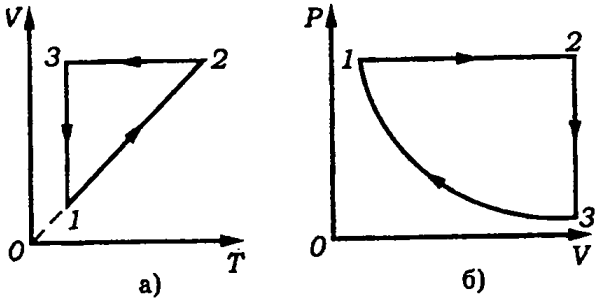


Рис. 147

Решение:

Вследствие того, что продолжение прямой 1–2 проходит через начало координат, можно утверждать, что участок 1–2 представляет собой изобару. Значит, газ нагревается при постоянном давлении, поглощая тепло.

Участок 2–3 является изохорой. Давление газа падает при неизменном объеме, значит, тепло выделяется.

Участок 3–1 — изотерма. Газ уменьшает объем при постоянной температуре. Давление растет. Газ не нагревается, хотя вешние силы совершают над ним работу, значит, газ отдает тепло. Этот процесс представлен в ординатах pV на рисунке 147, б.

Задача 3.

Если идеальный газ передает окружающим телам количество теплоты ΔQ, равное изменению ΔU внутренней энергии газа, то осуществляется ... процесс.

1) адиабатический; 2) изобарический;
3) изотермический; 4) изохорический;
5) такой процесс невозможен.

Решение:

Из первого закона термодинамики следует:

$\Delta Q = \Delta U + A$.

Так как в задаче $\Delta Q = \Delta U \Rightarrow A = 0$.

Работа газа $A = p\Delta V \Rightarrow \Delta V = 0 \Rightarrow V = const \Rightarrow$ изохорический процесс.

Проанализировав представленные варианты ответов, выбираем ответ № 4.

Ответ: № 4.

Задача 4.

Поезд, весом $4 \cdot 10^6$ Н, идущий со скоростью 36 $\frac{км}{ч}$, затормаживается до остановки. Какое количество тепла выделится в тормозах?

Дано:	СИ	Решение:
$\upsilon_0 = 36\ \frac{км}{ч}$	$= 10\frac{м}{с}$	На основании закона сохранения энергии:
$\upsilon_t = 0$		$-A_{торм} = \Delta Q$.
$mg = 4 \cdot 10^6$ Н		$A_{торм} = -\left(\frac{m\upsilon_t^2}{2} - \frac{m\upsilon_0^2}{2}\right) \Rightarrow$
ΔQ – ?		

$$\Delta Q = \frac{m\upsilon_0^2}{2} = \frac{4 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 10}{2} = 2 \cdot 10^7 \text{ (Дж)}.$$

$$[A] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = \text{Дж}.$$

Ответ: $\Delta Q = 2 \cdot 10^7$ Дж.

Задача 5.

Под поршнем цилиндра, расположенного вертикально, находится 200 г воздуха, который при сообщении ему количества теплоты 100 Дж изобарически нагрелся на 10 °С. Если принять воздух за идеальный газ, то чему равны ра-

бота воздуха по поднятию поршня и увеличение его внутренней энергии?

Дано:	СИ	Решение:
$m = 200$ г	$= 0{,}2$ кг	Количество теплоты, сообщенное воздуху, пошло на увеличение его внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил. Из первого закона термодинамики: $\Delta Q = \Delta U + A \Rightarrow$ $\Delta U = \Delta Q - A$.
$\Delta T = 10$ К		
$Q = 100$ Дж		
$\mu = 29 \cdot 10^{-3}\ \frac{кг}{моль}$		
$R = 8{,}31\ \frac{Дж}{моль \cdot К}$		
$A - ?$ $\Delta U - ?$		

Работа расширения воздуха при постоянном давлении:

$A = p\Delta V$,

где ΔV — изменение объема воздуха.

Из уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$P\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T \quad \Rightarrow A = \frac{m}{\mu} R\Delta T\ .$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[\,A\,] = \frac{кг \cdot Дж \cdot К \cdot моль}{кг \cdot моль \cdot К} = Дж.$$

$$A = \frac{0{,}2 \cdot 8{,}31 \cdot 10}{29 \cdot 10^{-3}} = 57{,}3\ (Дж).$$

Увеличение внутренней энергии

$\Delta U = 100 - 57{,}3 = 42{,}7$ (Дж).

Ответ: $A = 57{,}3$ Дж. $\Delta U = 42{,}7$ Дж.

Задача 6.

Если идеальный тепловой двигатель, отдав холодильнику 3,2 кДж теплоты при 47 °С, совершил работу 800 Дж, то температура нагревателя равна:

1) 93 °С; 2) 127 °С; 3) 154 °С;
4) 186 °С; 5) 212 °С.

Дано:	СИ	Решение:
$Q_H = 3{,}2$ кДж	$= 3{,}2 \cdot 10^3$ Дж	***КПД*** теплового двигателя:
$t = 47$ °C	$T = 320$ К	$\eta = \dfrac{Q_H - Q_x}{Q_H} = 1 - \dfrac{Q_x}{Q_H}$.
$A = 800$ Дж		
T_H – ?		

Работа $A = Q_H - Q_X \Rightarrow$

$Q_H = A + Q_X = 800 + 3{,}2 \cdot 10^3 = 4 \cdot 10^3$ (Дж).

$$\eta = 1 - \frac{3{,}2 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} = 0{,}2.$$

С другой стороны $\eta = \dfrac{T_H - T_X}{T_H} = 1 - \dfrac{T_X}{T_H} \Rightarrow$

$$\frac{T_X}{T_H} = 1 - \eta = 1 - 0{,}2 = 0{,}8 \Rightarrow T_H = \frac{T_X}{0{,}8} = \frac{320}{0{,}8} = 400 \text{ (К)}.$$

Так как ответы приведены по шкале Цельсия $\Rightarrow$

$t_н = 400 - 273 = 127$ (°C).

Проанализировав представленные варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 7.

Если в идеальной тепловой машине, абсолютная температура нагревателя которой вдвое больше температуры холодильника, не меняя температуру нагревателя, температуру холодильника уменьшить вдвое, то ***КПД*** этой машины возрастет

1) на 50%; 2) на 40%; 3) вдвое; 4) на 25%; 5) на 20%.

Дано:	Решение:
$T_H = 2T_X$	***КПД*** идеальной тепловой машины:
$T_H = const$	$\eta = \dfrac{T_H - T_X}{T_H} 100\% \Rightarrow$
$T_{X2} = \dfrac{T_{X1}}{2}$	$\eta_1 = \dfrac{2T_X - T_X}{2T_X} 100\% = 50$ %.
$\Delta\eta$ – ?	

$$\eta_2 = \frac{T_H - \frac{T_H}{4}}{T_H} 100\% = 75\% \Rightarrow$$

$\Delta\eta = 25\%$.

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильным будет ответ № 4.

Ответ: № 4.

Задача 8.

В колбе находится вода при температуре 0 °С. Выкачивая из колбы воздух и пары воды, воду замораживают посредством ее испарения. Какая часть воды в %, бывшей первоначально в колбе, при этом испарилась, если притока тепла извне не было? Удельная теплота испарения воды равна $2{,}4 \cdot 10^6 \frac{Дж}{кг}$, удельная теплота плавления льда равна $3{,}3 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг}$.

Дано:	**Решение:**
$t = 0$ °С $\lambda = 3{,}3 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг}$ $r = 2{,}4 \cdot 10^6 \frac{Дж}{кг}$ $\frac{m_2}{m}(\%) - ?$	Необходимое для образования пара количество теплоты может быть получено только за счет теплоты отвердевания (плавления), которая освобождается при замерзании воды. При замерзании m_1 воды выделяется: $\Delta Q = \lambda m_1$.

За счет этого количества теплоты образуется количество пара, равное $m_2 \Rightarrow$

$\lambda m_1 = r m_2$.

Масса всей воды до откачивания $m = m_1 + m_2 \Rightarrow$

$\lambda(m - m_2) = r m_2 \Rightarrow$

$$\frac{m_2}{m}=\frac{\lambda}{\lambda+r}=\frac{3{,}3\cdot10^5}{10^5(3{,}3+2{,}4)}=\frac{3{,}3}{27{,}3}=0{,}12.$$

$$\frac{m_2}{m}(\%)=0{,}12\cdot100\%=12\%.$$

Ответ: 12%.

Задача 9.

Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде 40%. Какой будет относительная влажность, если объем сосуда при неизменной температуре уменьшить в два раза?

Дано:	**Решение:**
$\varphi_1=40\ \%$ $T=const$ $V_2=\frac{V_1}{2}$	Относительная влажность может быть рассчитана по формуле:
$\varphi_2-?$	$\varphi=\frac{\rho_A}{\rho_H}100\%$, где ρ_A — абсолютная влажность воздуха, т.е. плотность содержащегося в воздухе водяного пара (масса водяного пара, фактически содержащегося в единице объема воздуха при данной температуре):

$$\rho_A=\frac{m}{V},$$

ρ_H — плотность насыщенного пара при той же температуре.

Так как при $T=const$ давление насыщающего пара от объема не зависит, $\Rightarrow \rho_H=const\ (\rho=\frac{p\mu}{RT})\Rightarrow$

$$\varphi_1=\frac{m}{V_1\cdot\rho_H}100\%,$$

$$\varphi_2=\frac{m}{V_2\cdot\rho_H}100\%\Rightarrow\varphi_2=2\varphi_1=80\ \%$$ (так как сосуд закрытый, его масса не изменится).

Ответ: 80 %.

Задача 10.

На рисунке 148 показан график зависимости температуры t от времени нагревания τ кристаллического вещества. Какая из точек соответствует началу процесса плавления вещества?

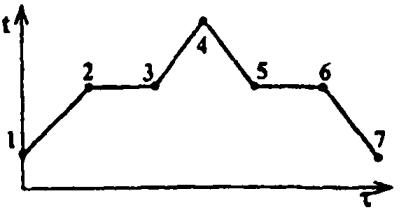


Рис. 148

1) 6; 2) 5; 3) 2; 4) 3; 5) 7.

Решение.

Так как тело кристаллическое, то оно имеет постоянную температуру плавления ⇒ пока все тело не расплавится, тепло будет только подводиться ⇒ участок плавления тела — это участок 2–3. До этого состояния тело нагревалось до температуры плавления (участок 1–2), после того как все тело расплавилось (участок 3–4) — нагревается жидкость, затем жидкость охлаждается (участок 4–5) до температуры плавления и при этой температуре происходит процесс, обратный плавлению: отвердевание (участок 5–6). Заключительным процессом является процесс охлаждения кристаллического вещества (участок 6–7).

После такого разбора всех процессов можем ответить на вопрос задачи: началу процесса плавления соответствует точка 2 ⇒ ответ № 3.

Ответ: № 3.

Задача 11.

В кастрюлю со льдом, масса которого равна m_1 = 100 г, а температура 0 °С, влили воду, масса которой равна m_2 = 600 г, а температура 60 °С. Удельная теплоемкость воды $c = 4{,}2\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$, удельная теплота плавления льда

330 $\frac{кДж}{кг}$, теплоемкостью сосуда пренебречь. После того, как весь лед растаял, в сосуде установилась температура...

1) 12 °С; 2) 19 °С; 3) 25 °С; 4) 36 °С; 5) 40 °С.

Дано:	СИ
$m_л = 100$ г	$= 0{,}1$ кг
$m_в = 600$ г	$= 0{,}6$ кг
$t_л = 0$ °С	
$t_в = 60$ °С	
$c_в = 4{,}2\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$= 4{,}2 \cdot 10^3\ \frac{Дж}{кг \cdot К}$
$\lambda_л = 330\ \frac{кДж}{кг}$	$= 3 \cdot 10^4\ \frac{Дж}{кг}$
$\theta - ?$	

Решение:

Запишем условие в столбик с учетом специфики задачи $m_1 = m_л$, $m_2 = m_в$, температура, установившаяся в результате теплообмена — θ. Тогда уравнение теплового баланса, учитывая, что слева пишется то, что отдает тепло, а справа — то, что принимает, будет выглядеть:

$$c_в m_в (t_в - \theta) = л_л m_л + c_в m_л (\theta - 0) \Rightarrow$$

$$\theta = \frac{c_в m_в t_в - \lambda m_л}{c_в (m_л + m_в)} = \frac{4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 0{,}6 \cdot 60 - 33 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1}{4{,}2 \cdot 10^3 (0{,}1 + 0{,}6)} =$$

$$= \frac{10^3 (36 \cdot 4{,}2 - 33)}{4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 0{,}7} = 40{,}20\ (°С).$$

Проанализировав варианты ответа, видим, что правильный ответ — № 5.

Ответ: № 5.

Задача 12.

Автомобиль движется с постоянной скоростью 15 $\frac{м}{с}$ по горизонтальному шоссе, развивая мощность 20 кВт.

Удельная теплота сгорания бензина равна 46 $\frac{МДж}{кг}$. Если ***КПД*** двигателя автомобиля равен 18,6%, то, проехав 30 км, автомобиль израсходовал бензина:

1) 3 кг; 2) 4 кг; 3) 5 кг; 4) 6 кг; 5) 7 кг.

Дано:	**СИ**
$\upsilon = const$	
$\upsilon = 15\ \frac{м}{с}$	
$N_п = 20$ кВт	$= 2\cdot10^4$ Вт
$S = 30$ км	$= 3\cdot10^4$ м
$q_б = 46\ \frac{МДж}{кг}$	$= 46\cdot10^6\ \frac{Дж}{кг}$
$\eta = 18{,}6$ %	
$m_б - ?$	

Решение:

Так как в задаче дан ***КПД***, начнем решать ее с записи ***КПД***:

$$\eta = \frac{N_п}{N_з}\ 100\ \%.$$

$$N_з = \frac{Q}{t};$$

$$\upsilon = \frac{S}{t} \Rightarrow t = \frac{S}{\upsilon};$$

$$Q = m_б\, q_б \Rightarrow$$

$$N_з = \frac{m_б \cdot q_б \cdot \upsilon}{S} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{N_п \cdot S \cdot 100\%}{m_б \cdot q_б \cdot \upsilon} \Rightarrow m_б = \frac{N_п \cdot S \cdot 100\%}{\eta \cdot q_б \cdot \upsilon}.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[m_б] = \frac{Вт \cdot м \cdot \% \cdot кг \cdot с}{\% \cdot Дж \cdot м} = \text{кг}.$$

$$m_б = \frac{2\cdot10^4 \cdot 3\cdot10^4 \cdot 100}{18{,}6 \cdot 46 \cdot 10^6 \cdot 15} = 4{,}67\ (\text{кг}) \approx 5\ \text{кг}.$$

Проанализировав варианты ответа, видим, что правильный ответ — № 3.

Ответ: № 3.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 7.

Задача 1.

Паровой молот массой 10 т свободно падает с высоты 2,5 м на железную болванку массой 200 кг. На нагревание болванки идет 30% количества теплоты, выделенного при ударах. Сколько раз падал молот, если температура болванки поднялась на 20 °С? Удельная теплоемкость железа равна $0{,}46 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot К}$.

Ответ: 25 раз.

Задача 2.

Сколько надо затратить теплоты, чтобы 5 кг льда, взятого при температуре –20 °С, расплавить и полученную воду нагреть до +15 °С? (удельная теплоемкость воды равна $4{,}2 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot К}$; удельная теплоемкость льда — $2{,}1 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot К}$; удельная теплота плавления льда — $3{,}35 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг}$).

Ответ: $2{,}2 \cdot 10^6$ Дж.

Задача 3.

Для нагревания на спиртовке 300 г воды в железном стакане с теплоемкостью $42 \frac{Дж}{кг}$ от 18 °С до 68 °С было сожжено 7 г спирта. Найти ***КПД*** спиртовки (удельная теплоемкость воды — $4{,}19 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot К}$; удельная теплота сгорания спирта — $29 \cdot 10^6 \frac{Дж}{кг}$).

Ответ: 32%.

Задача 4.

Сколько расплавится свинца, удельная теплоемкость которого — 130 $\frac{Дж}{кг \cdot К}$, удельная телота плавления — $2{,}5 \cdot 10^4$ $\frac{Дж}{кг}$ и температура плавления 327 °С, если пяти килограммам свинца с начальной температурой 27 °С сообщить 270 кДж теплоты?

Ответ: 3 кг.

Задача 5.

Под поршнем цилиндра находится 5 кг кислорода при T = 100 К. Сначала при постоянном объеме добиваются увеличения давления вдвое. Затем при постоянном давлении уменьшают его объем втрое. Чему равна производимая при этом работа? Изобразить процессы, происходящие с газом, на рисунке в координатах.

Ответ: $1{,}73 \cdot 10^5$ Дж.

Задача 6.

Температура воздуха в комнате 22 °С, точка росы 15 °С. Какова абсолютная и относительная влажность воздуха в комнате? Сколько воды выделится из воздуха в этой комнате, если температура понизится до 10 °С? Объем комнаты 200 м^3. Давление насыщающего пара при температуре 15 °С равно 1,71 кПА, при температуре 22 °С — 2,61 кПа, при температуре 10 °С — 1,2 кПа.

Ответ: 0,019 $\frac{кг}{м^3}$; 66 %; 1,84 кг.

Задача 7.

Газ, совершающий цикл Карно, отдает холодильнику K-ю часть количества теплоты, получаемой от нагревателя. Определить температуру нагревателя, если температура холодильника равна Т.

Ответ: $T \cdot K$.

Задача 8.

Если тепловой двигатель при температуре 127 °С получил от нагревателя 400 кДж теплоты, а при температуре 27 °С отдал холодильнику 350 кДж теплоты, то на сколько процентов отличаются ***КПД*** этого двигателя и ***КПД*** идеального теплового двигателя для этих значений температур?

Ответ: меньше на 12,5 %.

Задача 9.

Удельная теплоемкость масла в три раза больше удельной теплоемкости стали. При закалке стальную деталь массой 0,2 кг опустили в масло, взятое при 10 °С в количестве 2 кг. Какой была температура детали, если температура масла поднялась при этом до 35 °С?

Ответ: 785 °С.

Задача 10.

Удельная теплоемкость воды равна $4{,}2 \cdot 10^3 \ \frac{Дж}{кг \cdot К}$, а ее удельная теплота парообразования — $2{,}3 \ \frac{МДж}{кг}$. В кастрюлю налили холодной воды при 9 °С и поставили на плиту, не накрывая крышкой. Если вода закипела через 10 мин, то за какое время после начала кипения она полностью испарится?

Ответ: 60 мин.

Задача 11.

В плавильную печь было заложено 900 кг стали, взятой при температуре 20 °С (температура плавления равна 1400 °С, удельная теплоемкость $0{,}46 \ \frac{кДж}{кг \cdot К}$, удельная теплота плавления $62 \ \frac{кДж}{кг}$). Если ***КПД*** печи равен 11%, то

чему равна масса сожженного при плавлении дизельного топлива (теплота сгорания 26 $\frac{МДж}{кг}$)?

Ответ: 220 кг.

Задача 12.

В ванну, содержащую V_1 = 180 л холодной воды, взятой при температуре 20 °С, долили горячую воду с температурой 70 °С. Если в результате ванна оказалась полностью заполненной водой при температуре 40 °С, то чему равен объем ванны?

Ответ: 300 л.

Тест № 7

Задача 1.

Внутренняя энергия 2 молей одноатомного идеального газа равна 5000 Дж. В результате изотермического расширения газ совершил работу 1000 Дж. Внутренняя энергия после расширения равна:

1) 6000 Дж; 2) 7000 Дж; 3) 4000 Дж;
4) 3000 Дж; 5) 5000 Дж.

Задача 2.

Одноатомный газ нагревают при постоянном давлении. Какая доля сообщенного газу тепла Q идет на совершение работы?

1) 0,2Q; 2) 0,4Q; 3) 0,6Q; 4) 0,8Q; 5) 0,5Q.

Задача 3.

Если бы удалось использовать энергию, необходимую для подъема груза массой 10^3 кг на высоту 8 м, для нагре-

вания 0,25 кг воды, то на сколько кельвин повысилась бы ее температура?

1) 40; 2) 160; 3) 20; 4) 50; 5) 80.

Задача 4.

Автомобиль движется с постоянной скоростью по горизонтальному шоссе, развивая мощность 35 кВт. Проехав 80 км, автомобиль израсходовал 9 кг бензина. Если удельная теплота сгорания бензина равна 46 $\frac{МДж}{кг}$ и *КПД* двигателя автомобиля равен 22,5%, то скорость автомобиля равна:

1) 5 $\frac{м}{с}$; 2) 11 $\frac{м}{с}$; 3) 15 $\frac{м}{с}$; 4) 25 $\frac{м}{с}$; 5) 30 $\frac{м}{с}$.

Задача 5.

В калориметре теплоемкостью C = 63 $\frac{Дж}{К}$ находится m_1 = 250 г масла при температуре t_1 = 12 °C. В масло опустили медную деталь массой m_2 = 500 г при температуре t_2 = 100 °C. Удельная теплоемкость меди c = 0,38 $\frac{кДж}{кг \cdot К}$. Если после установления равновесия температура стала равна θ = 33 °C, то удельная теплоемкость масла равна:

1) 2,2 $\frac{кДж}{кг \cdot К}$; 2) 4,2 $\frac{кДж}{кг \cdot К}$; 3) 4,9 $\frac{кДж}{кг \cdot К}$;
4) 5,8 $\frac{кДж}{кг \cdot К}$; 5) 7,2 $\frac{кДж}{кг \cdot К}$.

Задача 6.

Если над идеальным газом совершена работа внешними силами таким образом, что в любой момент времени

совершенная работа равнялась изменению внутренней энергии газа, то осуществлялся ... процесс.

1) адиабатический; 2) изотермический;
3) изохорический; 4) изобарический;
5) такой процесс невозможен.

Задача 7.

Если молот массы M падает на стальную болванку массой m с высоты h, то с учетом того, что на нагревание болванки идет 50% всей энергии молота, болванка нагреется на ΔT, равное (c — удельная теплоемкость стали)

1) $\frac{Mgh}{2cm}$; 2) $\frac{2Mgh}{cm}$; 3) $\frac{mgh}{cM}$;
4) $\frac{cm}{2Mgh}$; 5) $\frac{2cm}{Mgh}$.

Задача 8.

В первом закрытом сосуде находятся вода и насыщенный пар, во втором — только водяной пар. Как изменится давление в этих сосудах при повышении температуры?

1) увеличится в обоих сосудах;
2) в первом увеличится, во втором — не изменится;
3) в первом не изменится, во втором — увеличится;
4) в обоих сосудах не изменится;
5) в первом уменьшится, во втором — увеличится.

Задача 9.

Две жидкости одинаковой удельной теплоемкости (c_1=c_2), но разной массы ($m_2 = 3m_1$) и имеющие разную температуру ($T_1 = 2T_2$) смешали в калориметре. Какая в результате установилась температура смеси?

1) $\frac{3}{8}T_1$; 2) $\frac{5}{8}T_1$; 3) $\frac{7}{8}T_1$; 4) $\frac{5}{4}T_1$; 5) $\frac{3}{4}T_1$.

Задача 10.

Какое количество теплоты нужно передать двум молям идеального одноатомного газа, чтобы увеличить его объем в 3 раза при постоянном давлении? Начальная температура газа T_0.

1) $2\,RT_0$; 2) $4\,RT_0$; 3) $10\,RT_0$;
4) $6\,RT_0$; 5) $5\,RT_0$.

Задача 11.

В кастрюлю со льдом, масса которого равна $m_1 = 200$ г, а температура $t_1 = 0$ °С, влили воду, масса которой равна $m_2 = 700$ г, а температура t_2. После того как лед растаял, в сосуде установилась температура $\theta = 40$ °С. Если удельная теплоемкость воды $c = 4{,}2\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$, удельная теплота плавления льда — $330\ \frac{кДж}{кг}$ (теплоемкостью сосуда пренебречь), то чему равна первоначальная температура воды?

1) 53 °С; 2) 62 °С; 3) 68 °С; 4) 74 °С; 5) 79 °С.

Задача 12.

Мини-электростанция вырабатывает электричество для питания установки мощностью $P = 800$ Вт, при этом за один час работы расходуется дизельное топливо массой 0,5 кг. Если ***КПД*** электростанции равен 14,4%, то чему равна теплота сгорания топлива?

1) $30\ \frac{МДж}{кг}$; 2) $40\ \frac{МДж}{кг}$; 3) $50\ \frac{МДж}{кг}$;
4) $60\ \frac{МДж}{кг}$; 5) $70\ \frac{МДж}{кг}$.

ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Программа по электростатике содержит следующие вопросы:

Электризация тел. Электрический заряд. Взаимодействие заряженных тел. Элементарный электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Закон Кулона в вакууме и в среде. Диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость среды. Диэлектрики в электрическом поле.

Электростатическое поле. Напряженность электрического поля. Электрическое поле точечного заряда. Поверхностная плотность заряда.

Работа электрического поля при перемещении заряда. Потенциальность электростатического поля. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и разностью потенциалов. Потенциал поля точечного заряда. Принцип суперпозиции полей.

Электроемкость. Конденсаторы. Электроемкость сферического проводника. Электроемкость плоского конденсатора. Типы конденсаторов. Соединения конденсаторов.

Энергия электрического поля плоского конденсатора. Энергия электрического поля.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

5.1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Электростатика — раздел физики, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов, осуществляемое посредством электростатического поля.

5.1.1. Понятие о величине заряда

В природе существует два рода электрических зарядов, условно называемые ***положительными*** и ***отрицательными***.

Носителями электрических зарядов являются элементарные частицы:

- ***электрон*** — наименьший существующий в природе отрицательный электрический заряд:

$q = e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $[q]$ = кулон = Кл;

- ***протон*** и ***позитрон*** (античастица электрона) — наименьший существующий в природе положительный электрический заряд:

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрон и протон обладают неделимым зарядом, который носит название ***элементарного*** (e) $\Rightarrow$

- любой электрический заряд представляет собой целое кратное элементарного электрического заряда e;
- заряд 1 Кл соответствует заряду приблизительно $6{,}24 \cdot 10^{18}$ электронов.

Величиной заряда, или ***количеством электричества,*** называется избыток электрических зарядов одного знака в каком-либо теле.

Общий электрический заряд любого тела является ***алгебраической*** суммой всех электрических зарядов, находящихся в этом теле.

Тело считается ***электрически заряженным***, если имеет неодинаковое число отрицательных и положительных элементарных зарядов, причем его заряд измеряется целым числом элементарных зарядов.

В ***электрически нейтральных*** телах имеется одинаковое число элементарных зарядов противоположного знака.

Многие предметы после натирания притягивают к себе бумажки, соринки. Такое явление притяжения к натертым

предметам обусловлено находящимися на них электрическими зарядами, а тела называются ***наэлектризованными***.

Одноименные заряды ***отталкиваются***, а ***разноименные — притягиваются***.

Наэлектризовать тело можно не только с помощью трения, но и с помощью соприкосновения с другим заряженным телом. При соприкосновении заряды частично переходят с наэлектризованного тела. При этом заряды не уничтожаются, а лишь ***перераспределяются*** между телами.

5.1.2. Электростатическая индукция

В металлах наряду с электронами, связанными с ядром, существует большое количество подвижных ***свободных*** электронов. Ядра же, заряженные положительно, закреплены в узлах кристаллической решетки. В целом проводник нейтрален и внутри его электрическое поле отсутствует.

Если незаряженный нейтральный проводник внести в электрическое поле, то это поле вызовет перемещение свободных электрических зарядов (рис. 149).

Если электрическое поле создается положительным зарядом, то на ***ближайшем*** к нему конце проводника будут сосредоточены ***отрицательные заряды***, а на ***удаленном — положительные***.

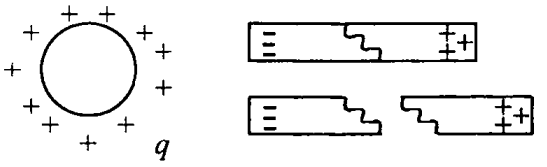


Рис. 149

Если, наоборот, поле создается ***отрицательным*** зарядом, — ***ближайший*** к заряженному телу конец проводника оказывается заряженным ***положительно***.

Если проводник ***разрезать*** на две части, то одна из них окажется заряженной ***положительно***, а другая — ***отрицательно***.

Если проводник вынести из электрического поля, не разрезая, то он снова окажется ***нейтральным***.

Электростатической индукцией называется явление наведения противоположных зарядов на концах изолированного ***проводника*** при внесении его в электрическое поле ⇒ ***внутри проводника поля нет***.

5.1.3. Законы электростатики

Закон сохранения электрического заряда: в изолированной системе полная алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной; заряды могут только передаваться от одного тела другому или смещаться внутри тела:

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n.$$

Закон Кулона: сила взаимодействия между двумя точечными неподвижными зарядами прямо пропорциональна величинам этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль линии, соединяющей центры этих зарядов, таким образом, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0},$$

ε_0 — ***электрическая постоянная***,

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{Ф}{м}, \Rightarrow$$

$$k = 9 \cdot 10^9\ \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}.$$

Эта запись является ***законом Кулона для вакуума***. При помещении электрических зарядов в среду, сила взаимодействия между ними меняется: становится ***меньше***.

Модуль силы электростатического взаимодействия точечных зарядов или равномерно заряженных шаров, находящихся в однородном и безграничном, газообразном или жидком диэлектрике:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2},$$

где ε — ***диэлектрическая проницаемость среды***, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в среде меньше, чем в вакууме.

Для газов и вакуума $\varepsilon = 1$, для керосина $\varepsilon = 2$, для стекла $\varepsilon = 7$, для воды $\varepsilon = 81$.

5.2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое (электростатическое) поле — особая форма материи, передающая воздействие одного электрического заряда на другой электрический заряд в соответствии с законом Кулона.

Если в какой-то точке поля имеется точечный электрический заряд, то на любой пробный заряд, помещенный в каждую точку окружающей среды, будет действовать электрическая сила ⇒ поле вокруг заряда называется ***силовым*** полем.

У электростатического поля две характеристики: *силовая* — напряженность и *энергетическая* — потенциал.

5.2.1. Напряженность электрического поля

Силовой характеристикой электрического поля является ***вектор $\vec{E}$ напряженности поля***:

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q},\ E=\frac{F}{q}.\ [E]=\frac{H}{Кл}=\frac{В}{м}.$$

Напряженность численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Из закона Кулона $F=k\frac{q_1q_2}{\varepsilon r^2}=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$; $\Rightarrow$

Напряженность электростатического поля точечного заряда q в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ε:

$$E=k\frac{q}{\varepsilon r^2}=\frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2},$$

где q — заряд, создающий поле.

Напряженность электростатического поля ***шара*** радиуса R с зарядом q, равномерно распределенным по его поверхности, в некоторой точке диэлектрика, находящейся на расстоянии r от поверхности шара:

$$E=\frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0(R+r)^2}.$$

Принцип суперпозиции полей: если в пространстве существуют поля нескольких зарядов, то они накладываются друг на друга (супер — сверх). $\Rightarrow$

Напряженность электрического поля системы N зарядов равна ***векторной сумме*** напряженностей полей, создаваемых каждым из них в отдельности:

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2+...+\vec{E}_n.\ \Rightarrow$$

Если поле создается сразу несколькими зарядами, то напряженность E в какой-либо точке поля находится как геометрическая сумма напряженностей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности (рис. 150).

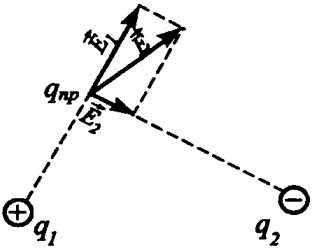


Рис. 150

Однородное электрическое поле — это поле, числовое значение и направление напряженности которого одинаковы в любой точке этого поля (пример — поле (рис. 151) внутри заряженного плоского конденсатора).

Линии напряженности этого поля оказываются параллельными, если расстояние между пластинами мало по сравнению с их линейными размерами.

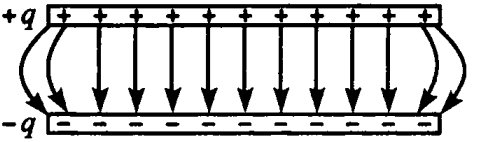


Рис. 151

5.2.2. Линии напряженности

Чтобы наглядно представлять электрическое поле в пространстве, окружающем заряд q, Фарадей предложил изображать электрическое поле *линиями напряженности*.

Линии напряженности — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности (рис. 152).

Они начинаются на положительном заряде (рис. 153), а заканчиваются на отрицательном или в бесконечности, где поля нет (рис. 154).

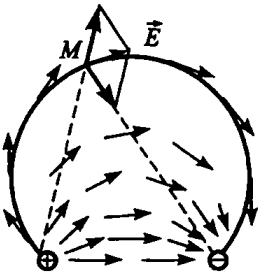


Рис. 152

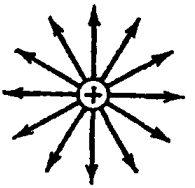


Рис. 153

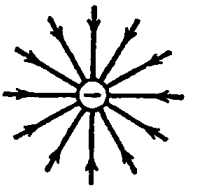


Рис. 154

Линии, потенциал которых одинаков, назваются ***эквипотенциальными*** линиями. Эквипотенциальные линии ***перпендикулярны*** линиям напряженности.

На рисунке 155 изображены поля двух равных разноименных зарядов, на рисунке 156 — поля двух равных одноименных зарядов.

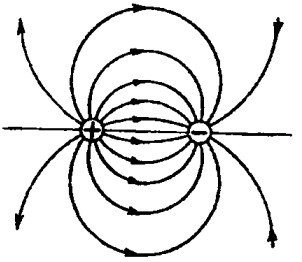


Рис. 155

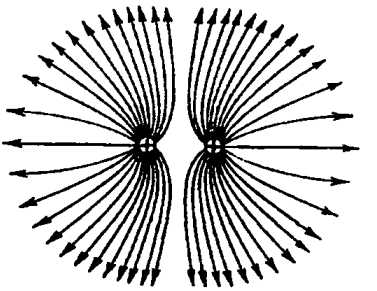


Рис. 156

5.2.3. Поверхностная плотность заряда

Если проводник зарядить, передав ему дополнительные заряды, то избыточные электрические заряды будут удаляться друг от друга под воздействием сил отталкивания. Устойчивое равновесие электрических зарядов достигается, когда они располагаются на внешней поверхности проводника, что соответствует ***минимуму потенциальной энергии***.

Поверхностная плотность зарядов равна электрическому заряду, который помещен на единице площади поверхности проводника σ:

$$\sigma = \frac{q}{S}, \ [\sigma] = \frac{Кл}{м^2}.$$

Поверхностная плотность зарядов в состоянии равновесия ***больше*** в местах с большей кривизной поверхности (***выступах***) и ***меньше*** в местах с меньшей кривизной (***впадинах***). На этом основано действие молниеотводов. По этой же причине нельзя находиться под одиноко стоящим деревом в грозу.

Равномерно заряженная бесконечная плоскость создает однородное электростатическое поле, модуль напряженности которого равен:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

5.2.4. Потенциал. Разность потенциалов

Потенциал электростатического поля численно равен работе по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность, где поля нет:

$$\varphi = \frac{A}{q}.$$

Разность потенциалов численно равна работе по перемещению единичного положительного заряда из одной точки поля в другую:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \ [\varphi] = [\Delta\varphi] = В.$$

Работа по перемещению заряда не зависит от формы пути, а определяется только начальной и конечной точка-

ми ⇒ силы электростатического поля являются консервативными ⇒ работа консервативных сил по замкнутому контуру равна нулю ⇒ ***работа сил электростатического поля по замкнутому контуру равна нулю.***

Потенциал электростатического поля точечного заряда в точке диэлектрика, удаленной от заряда на расстояние r:

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}.$$

Потенциал электростатического поля ***шара*** радиуса R с зарядом q, равномерно распределенным по его поверхности, в некоторой точке диэлектрика, находящейся на расстоянии r от поверхности шара:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 (R + r)}.$$

Потенциал поля ***положительного*** заряда ***уменьшается*** при ***удалении*** от заряда, а потенциал поля ***отрицательного*** заряда — ***увеличивается***.

В проводниках

- ***положительные заряды*** перемещаются от потенциала $\varphi_1 > \varphi_2$ к φ_2;
- ***отрицательные заряды — наоборот.***

Принцип суперпозиции полей: поскольку потенциал является скалярной величиной, то в случае, когда поле создано несколькими зарядами, ***потенциал в любой точке равен алгебраической сумме потенциалов, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности.***

5.2.5. Связь напряженности с потенциалом

Связь между напряженностью E и разностью потенциалов $\Delta\varphi$ электростатического поля можно получить следующим образом:

$$\left.\begin{array}{l} A = q\Delta\varphi, \\ A = Fd, \\ E = \dfrac{F}{q} \Rightarrow F = Eq \end{array}\right\} q\Delta\varphi = Eqd \Rightarrow$$

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d},\ [E] = \frac{В}{м}.$$

Здесь d — расстояние между начальной и конечной точками (между обкладками конденсатора в случае плоского конденсатора).

Таким образом у напряженности две размерности:

$$[E] = \frac{Н}{Кл} = \frac{В}{м}.$$

Условие статического распределения зарядов требует, чтобы внутри сферы напряженность поля (рис. 157) равнялась пулю (на этом основана ***электростатическая защита:*** если прибор поместить внутрь металлической сетки, то внешние электрические поля не будут проникать внутрь сетки).

Из того же условия следует, что потенциал φ в любой точке внутри сферы одинаков и равен потенциалу φ на поверхности сферы (рис. 158).

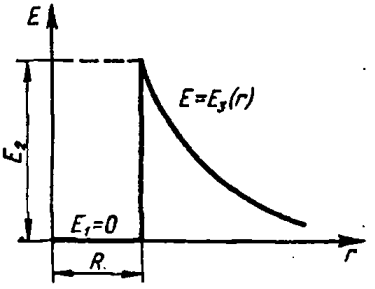


Рис. 157

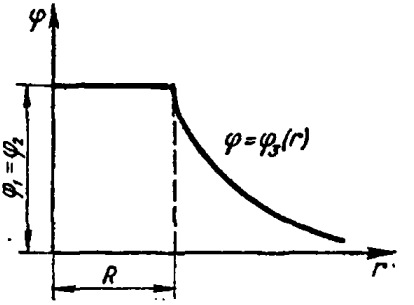


Рис. 158

Линии напряженности направлены в сторону убывания потенциала (рис. 159): $\varphi_2 < \varphi_1$.

Поскольку сила, действующая на заряд q в электрическом поле, прямо пропорциональна величине заряда q, то работа сил поля при перемещении заряда также прямо пропорциональна величине заряда q. Следовательно, и потенциальная энергия заряда в произвольной точке электрического поля прямо пропорциональна величине этого заряда:

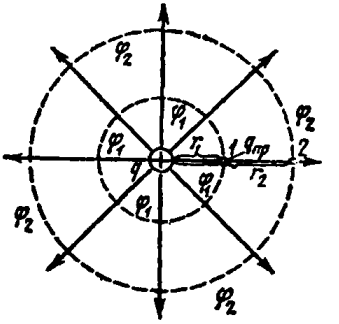


Рис. 159

$$П = q\varphi.$$

Потенциал измеряется потенциальной энергией единичного положительного заряда, находящегося в данной точке поля:

$$\varphi = \frac{П}{q}.$$

5.2.6. Работа сил электростатического поля

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда q_1 между двумя точками поля, созданного зарядом q:

$$\Delta A = -\Delta П,$$

где $\Delta П = П_2 - П_1$,

$П_2$ и $П_1$ — потенциальная энергия заряда соответственно в конечной и начальной точках его траектории.

Потенциальная энергия равна работе по перемещению заряда из одной точки в другую:

$$П = A = q\Delta\varphi =$$

$$= q\frac{k}{\varepsilon}\left(\frac{q_1}{r_1} - \frac{q_1}{r_2}\right) = \frac{kqq_1}{\varepsilon}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{qq_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Потенциальная энергия заряда q_1, помещенного в точку поля на расстоянии r от заряда q, равна:

$$П = \frac{kqq_1}{\varepsilon r} = \frac{qq_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}.$$

Когда поле создано несколькими зарядами, то потенциальная энергия заряда q, помещенного в любую точку такого поля, равна алгебраической сумме энергий, обусловленных полем каждого заряда в отдельности в этой точке.

Если два одинаково заряженных шарика находятся на расстоянии r друг от друга, то потенциальная энергия электрического поля этих двух зарядов будет равна:

$$П = W_п = \frac{kq^2}{\varepsilon r} = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}.$$

5.2.7. Диэлектрики в электрическом поле

В диэлектрике отсутствуют свободные носители зарядов. Все электрические заряды диэлектрика входят в состав его молекул и могут смещаться лишь на очень малые расстояния: в пределах молекулы или атома.

Диэлектрик уменьшает силу взаимодействия зарядов. Смещение зарядов внутри молекул диэлектрика приводит к ***поляризации*** диэлектрика: атом, попадая во внешнее электрическое поле, превращается в электрический диполь, который создает свое электрическое поле.

Поле внутри диэлектрика, созданное его поляризационными зарядами, направлено навстречу внешнему полю, т.е. ослабляет внешнее поле, но полностью его не уничтожает.

5.3. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

5.3.1. Электроемкость уединенного проводника

Электроемкостью уединенного проводника называется физическая величина, измеряемая отношением сообщенного ему заряда к возникающему в результате этого потенциалу:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Электроемкость является свойством ***проводника*** и характеризует его способность накапливать электрические заряды.

$$[C] = \frac{Кл}{В} = Ф = \text{Фарад}.$$

Так как фарад — очень большая величина, на практике применяются:

- 1 мкФ = 10^{-6} Ф;
- 1 нФ = 10^{-9} Ф;
- 1 пФ = 10^{-12} Ф.

Электроемкость сферического проводника:

$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R$,

где R — радиус сферы.

Электроемкость зависит:

- от формы проводника;
- от его размеров:
- от диэлектрической проницаемости среды;
- от наличия вблизи заряженных тел.

Электроемкость не зависит:

- от материала проводника:
- от наличия внутри пустот и полостей, так как заряд скапливается на поверхности, а внутри проводника поле равно нулю.

5.3.2. Электроемкость конденсатора

Конденсатором называется система из двух разноименно заряженных проводников, разделенных диэлектриком таким образом, чтобы все электрическое поле было сосредоточенно между проводниками, называемыми ***обкладками***, и служащая для накопления электрических зарядов и электрической энергии.

Два проводника, на которых накапливаются заряды, называются ***обкладками***.

Накопление зарядов на обкладках называется ***зарядкой*** конденсатора. Нейтрализация зарядов конденсатора при соединении его обкладок проводником называется ***разрядкой***.

Электроемкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Конденсаторы бывают:

- в зависимости от формы: плоские, сферические, цилиндрические;
- в зависимости от размеров: постоянной и переменной емкости;
- в зависимости от диэлектрической проницаемости вещества между обкладками: воздушные, электролитические, керамические, слюдяные, бумаго-масляные и т.д.

Емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где S — площадь обкладки; d — расстояние зазора между обкладками; ε — диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего зазор.

Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

где R_1 и R_2 — радиусы сфер.

Несмотря на то, что обкладок у конденсатора две, заряжается всегда только одна обкладка: на другой заряд индуцируется.

5.3.3. Соединения конденсаторов

Для увеличения емкости конденсаторы соединяют в батареи.

В батареях обкладки конденсаторов могут соединяться последовательно и параллельно.

Последовательным называется такое соединение конденсаторов в батарею, когда соединяются разноименно заряженные обкладки: отрицательно заряженная обкладка соединяется с положительно заряженной.

При ***последовательном соединении*** (рис. 160) конденсаторов в батарею:

- ***заряд q остается постоянным*** на всех конденсаторах:
  $q_б = q_1 = q_2 = ... = q_n$;
- $U_б = U_1 + U_2 + ... + U_n = \sum_{i=1}^{n} U_i$;
- $\frac{1}{C_б} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n} =$

$= \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$ — складываются величины, обратные емкостям.

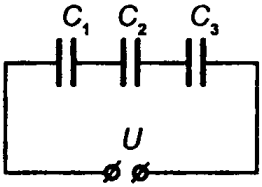


Рис. 160

Здесь $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$ — напряжение на обкладках конденсаторов.

Емкость батареи ($C_б$), составленной из n ***одинаковых***, соединенных последовательно конденсаторов, в n раз меньше емкости одного конденсатора:

$$C_б = \frac{C}{n}.$$

При ***параллельном соединении*** конденсаторов в батарею положительно заряженные обкладки объединяются в одну группу, отрицательно заряженные — в другую.

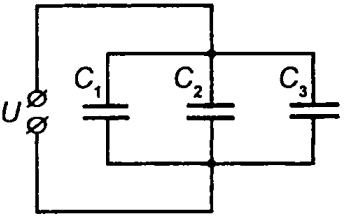


Рис. 161

При ***параллельном соединении*** (рис. 161):

- $U_б = U_1 = U_2 = ... = U_n$ — все конденсаторы имеют одну и ту же разность потенциалов между обкладками;
- $q_б = q_1 + q_2 + ... + q_n = \sum_{i=1}^{n} q_i = U_б(C_1 + C_2 + ... + C_n)$;
- $C_б = C_1 + C_2 + ... + C_n = \sum_{i=1}^{n} C_i$ — складываются емкости.

Емкость батареи, составленной из n ***одинаковых***, соединенных параллельно конденсаторов, в n раз больше емкости одного конденсатора:

$C_б = nC$.

5.3.4. Соединения заряженных шаров

Пусть имеется два шарика радиусами R_1 и R_2, имеющие разные заряды q_1 и q_2. Шарики соединяют проволокой (рис. 162). Какой заряд и с какого шарика на какой будет переходить?

Сравнения величины шариков или величины зарядов не дадут ответа на данный вопрос.

Рис. 162

Если заряды начнут переходить с одного шарика на другой, то в этот момент будет наблюдаться электрический ток, а он возможен только при наличии разности потенциалов ⇒ ***заряды будут переходить с того шарика, где потенциал больше, на тот, где потенциал меньше, до тех пор, пока потенциалы не выровняются***.

При этом неизменным остается суммарный заряд шариков, так как система замкнутая:

$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$,

где q'_1 и q'_2 — заряды, оставшиеся на шариках после соединения их проволокой.

Но $q_1 = C_1\varphi_1$; $q_2 = C_2\varphi_2 \Rightarrow$

$C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2 = \varphi'(C_1 + C_2)$

где φ' — потенциал обоих шаров после взаимодействия ⇒

$$\varphi' = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \cdot \varphi_1 + C_2 \cdot \varphi_2}{C_1 + C_2}.$$

Так как $C_1 = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1$, $C_2 = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_2 \Rightarrow$

$$\varphi' = \frac{R_1 \cdot \varphi_1 + R_2 \cdot \varphi_2}{R_1 + R_2}.$$

Заряды, оставшиеся на шариках, можно рассчитать:

$q'_1 = C_1\varphi'$ и $q'_2 = C_2\varphi'$.

5.3.5. Энергия электрического поля

Если проводник не находится во внешнем электростатическом поле, то его энергия является собственной — W и вычисляется по формуле:

$$W_э = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2},$$

где C — емкость проводника; q и φ — его заряд и потенциал.

Полная электрическая энергия системы, состоящей из N заряженных проводников:

$$W_э = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i\varphi_i,$$

где q_i — заряд i–го проводника, φ_i — потенциал i–го проводника.

Энергия заряженного конденсатора равна:

$$W_э = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{qU}{2}.$$

В случае, если конденсатор:

- не отключается от источника питания после зарядки ($U = const$), его энергия равна:

$$W_э = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{CU^2}{2},$$

- отключается ($q = const$):

$$W_э = \frac{q^2}{2C}.$$

Энергия однородного электрического поля, сосредоточенного в объеме V изотропной среды:

$$W_э = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}V,$$

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$ — ***объемная плотность энергии.***

Сила притяжения пластин плоского конденсатора:

$$F = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 S}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d^2} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Указания к решению задач

Задачи о взаимодействии точечных зарядов и систем, сводящихся к ним, решаются с применением закона Кулона в соединении с законами механики. При этом необходимо:

1. Расставить силы, действующие на точечный заряд, помещенный в электрическое поле, и записать для него основное уравнение динамики материальной точки.

2. Выразить силы электрического взаимодействия через заряды и поля и, подставив их в основное уравнение, записать его в развернутом виде.

3. Добавить к составленному уравнению уравнение закона сохранения зарядов, если при взаимодействии заряженных тел между ними происходит перераспределение зарядов. Полученную систему уравнений решить относительно неизвестной величины.

4. Делать логические выводы из условия задачи: если в условии говорится, что действуют силы кулоновского отталкивания, то заряды — одноименные, а если силы притяжения — разноименные.

5. При решении задач на расчет полей, следует обратить особое внимание на векторный характер напряженности $E \Rightarrow$ складывать векторы напряженностей геометрически (принцип суперпозиции полей).

6. Для нахождения общей емкости в задачах, где рассматривается система заряженных тел (обычно плоских конденсаторов), сначала установить, какие из конденсаторов

соединены между собой последовательно, а какие — параллельно.

7. Помнить, что если плоский конденсатор подключен к источнику питания, то при раздвижении (сближении) или смещении пластин, внесении (удалении) диэлектрика ***напряжение между его обкладками остается неизменным***. Величины q, C, E, F могут при этом меняться. Если конденсатор после зарядки отключили от источника питания, то при всех указанных выше изменениях ***заряд на конденсаторе не меняется***.

Примеры решения задач

Задача 1.

Электрическое поле образовано двумя одинаковыми разноименными точечными зарядами 5 нКл. Расстояние между зарядами 10 см. Определить напряженность поля: 1) в точке, лежащей посредине между зарядами; 2) в точке, лежащей на продолжении линии, соединяющей центры зарядов, на расстоянии 10 см от отрицательного заряда (рис. 163).

Дано:	СИ	Решение:
$q_1 = 5$ нКл	$= 5 \cdot 10^{-9}$ Кл	В соответствии с принципом суперпозиции полей, напряженность поля, созданного двумя зарядами, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых отдельными зарядами: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$,
$q_2 = -5$ нКл	$= -5 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$r_1 = 10$ см	$= 0{,}1$ м	
$r = 10$ см	$= 0{,}1$ м	
$k = 9 \cdot 10^9 \ \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$		
$\varepsilon = 1$		
$E_A - ?$ $E_B - ?$		

где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — векторы напряженностей полей, создаваемых соответственно положительным и отрицательным зарядами.

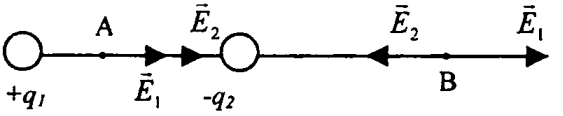


Рис. 162

Поместим в точку А единичный положительный заряд. Тогда со стороны заряда q_1 на него будет действовать кулоновская сила отталкивания, а со стороны заряда q_2 — кулоновская сила притяжения.

По определению, напряженность характеризуется силой, действующей на единичный положительный заряд, $\Rightarrow$ в точке А напряженности направлены в одну сторону и в скалярном виде складываются:

$$E_A = E_1 + E_2 + E_1 = E_2 = k\frac{|q|}{\left(\frac{r}{2}\right)^2} \Rightarrow$$

$$E_A = k\frac{2|q|}{\left(\frac{r}{2}\right)^2} = 9\cdot 10^9 \frac{2\cdot 5\cdot 10^{-9}}{25\cdot 10^{-4}} = 3{,}6\cdot 10^4 \left(\frac{В}{м}\right),$$

(точка А лежит посредине между зарядами и заряды одинаковы по модулю).

Сделаем проверку по размерности:

$$[E] = \frac{Н\cdot м\cdot Кл}{Кл^2\cdot м^2} = \frac{Н}{Кл} = \frac{Н\cdot м}{Кл\cdot м} = \frac{Дж}{А\cdot с\cdot м} = \frac{А\cdot В\cdot с}{А\cdot с\cdot м} = \frac{В}{м}.$$

Точка В находится на расстоянии r_1 от заряда q_2 и на расстоянии $(r + r_1) = 2r$ от заряда q_1. В этой точке напряженности направлены в противоположные стороны, $\Rightarrow$ в скалярном виде напряженности вычитаются:

$$E_B = |E_1 - E_2|.$$

$$E_1 = k\frac{|q|}{(r)^2},\ E_2 = k\frac{|q|}{(2r)^2} \Rightarrow$$

$$E_B = k\frac{|q|}{(r)^2}\left(1-\frac{1}{4}\right) = 9\cdot10^9\ \frac{5\cdot10^{-9}\cdot3}{10^{-2}\cdot4} = 3{,}4\cdot10^3\ (\frac{В}{м}).$$

Ответ: $E_A = 3{,}6\cdot10^4\ \frac{В}{м}$, $E_B = 3{,}4\cdot10^3\ \frac{В}{м}$.

Задача 2.

На шелковых нитях длиной 50 см подвешены в одной точке в воздухе два маленьких одинаковых шарика массой по 0,2 г каждый, заряженных одинаково. Определить заряд каждого шарика, если они отошли друг от друга на 8 см. Весом нитей пренебречь.

Дано:	СИ
$l = 50$ см	$= 0{,}5$ м
$m = 0{,}2$ г	$= 2\cdot10^{-4}$ кг
$r = 8$ см	$= 8\cdot10^{-2}$ м
$\varepsilon = 1$	
$k = 9\cdot10^9\ \frac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$	
q – ?	

Решение:

На каждый шарик действуют силы: сила тяжести $m\vec{g}$, сила кулоновского отталкивания $\vec{F}_k$ и сила натяжения нити — $\vec{F}_k$.

Выберем систему отсчета, как показано на рис. 164.

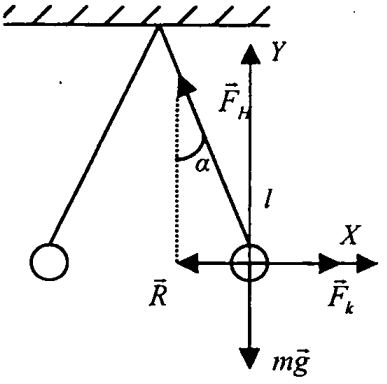


Рис. 164

Так как шарики находятся в равновесии, сумма действующих на них сил равна нулю, т.е. запишем условие равновесия:

$$m\vec{g} + \vec{F}_k + \vec{F}_k = 0.$$

Или в проекциях на оси:

OX: $F_H \sin\alpha = F_k$.

OY: $F_H \cos\alpha = mg$.

Разделим одно равенство на другое:

$$tg\alpha = \frac{F_k}{mg}.$$

По закону Кулона:

$$F = k\frac{q^2}{r^2\varepsilon} \Rightarrow$$

$$tg\alpha = k\frac{q^2}{r^2\varepsilon mg} \Rightarrow q^2 = \frac{r^2\varepsilon mgtg\alpha}{k}.$$

Найдем $tg\alpha = \dfrac{r}{2\sqrt{l^2 - \dfrac{r^2}{4}}} \Rightarrow$

$$q = \sqrt{\frac{r^2\varepsilon mgr}{2k\sqrt{l^2 - \frac{r^2}{4}}}} = r\sqrt{\frac{r\varepsilon mg}{2k\sqrt{l^2 - \frac{r^2}{4}}}}.$$

$$[q] = м\sqrt{\frac{Кл^2 \cdot м \cdot кг \cdot м}{Н \cdot м \cdot с^2 \cdot \sqrt{м^2}}} = м^2\frac{Кл}{с}\sqrt{\frac{кг \cdot с^2}{кг \cdot м^2 \cdot м^2}} =$$

$$= м^2\frac{Кл}{с} \cdot \frac{с}{м^2} = Кл.$$

$$q = 0{,}08\sqrt{\frac{0{,}08 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 10}{9 \cdot 10^9 \cdot 2\sqrt{(0.25 - 0{,}0016)}}} = 1{,}06 \cdot 10^{-8}\ (Кл).$$

Ответ: $q = 1{,}06 \cdot 10^{-8}$ Кл.

Задача 3.

Пылинка массой 10^{-8} г находится в воздухе между двумя горизонтальными разноименно и равномерно заряженными пластинами с разностью потенциалов 5 кВ. Расстояние между пластинами 5 см. Каким зарядом обладает пылинка, если ее вес уравновешивается действием на нее электрической силы?

Дано:	СИ
$m = 10^{-8}$ г	$= 10^{-11}$ кг
$\Delta\varphi = 5$ кВ	$= 5\cdot10^{3}$ В
$\varepsilon = 1$	
$d = 5$ см	$= 5\cdot10^{-2}$ м
$q - ?$	

Решение:

Пылинка находится во взвешенном состоянии (рис. 165) при условии:

$$m\vec{g} + \vec{F}_э = 0 \Rightarrow$$

$$mg = F_э;$$

$$E = \frac{F_э}{q} \Rightarrow F_э = Eq.$$

Напряженность связана с разностью потенциалов:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d} \Rightarrow mg = \frac{q\cdot\Delta\varphi}{d} \Rightarrow$$

$$q = \frac{mgd}{\Delta\varphi}.$$

$$[q] = \frac{кг\cdot м\cdot м}{с^2\cdot В} = \frac{Дж}{В} =$$

$$= \frac{А\cdot В\cdot с}{В} = Ас = Кл.$$

$$q = \frac{10^{-11}\cdot10\cdot5\cdot10^{-2}}{5\cdot10^{3}} = 10^{-15}\ Кл.$$

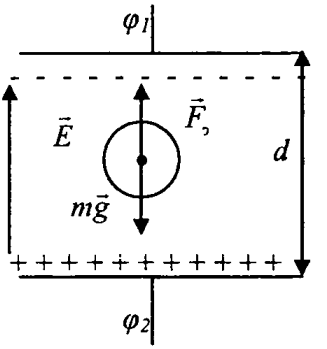


Рис. 165

Ответ: $q = 10^{-15}$ *Кл.*

Задача 4.

Электрон вылетает из точки, потенциал которой равен 5000 В, имея скорость, равную $3\cdot10^{7}\ \frac{м}{с}$ и направленную вдоль силовой линии поля. Найти потенциал точки поля, в которой скорость электрона станет равной нулю.

Дано:
$\varphi_1 = 5000$ В
$\upsilon_1 = 3\cdot10^{7}\ \frac{м}{с}$
$\upsilon_2 = 0$
$e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл
$m_e = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг
$\varphi_2 - ?$

Решение:

Так как электрон — отрицательная частица, то он будет испытывать под действием сил электрического поля тор-

можение. Электрон будет совершать работу против сил электрического поля за счет своей кинетической энергии:

$$\Delta W_k = A_э$$

$$A_э = e(\varphi_1 - \varphi_2) \Rightarrow$$

$$\frac{m\upsilon_1^2}{2} - \frac{m\upsilon_2^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Учитывая то, что $\upsilon_2 = 0 \Rightarrow \frac{m\upsilon_1^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2) \Rightarrow$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \frac{m\upsilon_1^2}{2e} = 5000 - \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{14}}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 2440 \text{ (В)}.$$

$$[\varphi] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2 \cdot Кл} = \frac{Дж}{Кл} = \frac{А \cdot В \cdot с}{А \cdot с} = \text{В}.$$

Ответ: $\varphi_2 = 2440$ В.

Задача 5.

Два заряда $q_1 = q_2 = 4 \cdot 10^{-9}$ Кл находятся в воздухе на расстоянии 10 см. Третий заряд $q_3 = 10^{-9}$ Кл находится на расстоянии 10 см от обоих зарядов. Какова результирующая сила, действующая на третий заряд со стороны первых двух?

Дано:	СИ
$q_1 = q_2 = 4 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$d = l = 10$ см	$= 0{,}1$ м
$q_3 = 10^{-9}$ Кл	
F – ?	

Решение:

Так как все заряды одноименные, между ними действуют силы кулоновского ***отталкивания***.

Результирующая сила:

$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ (рис. 166).

Поскольку заряды одинаковые, $F_1 = F_2$.

Стороны треугольника равны $\Rightarrow \alpha = 60°$, $\beta = 30° \Rightarrow$

$$CM = \frac{F}{2} = F_1 \cos\beta \Rightarrow$$

$F = 2F_1\cos\beta.$

$F_1 = k\dfrac{|q_1|\cdot|q_3|}{r^2\varepsilon}.$

$F = 2F_1\cos\beta =$

$= \dfrac{2\cdot 9\cdot 10^9\cdot 4\cdot 10^{-9}\cdot 10^{-9}\cdot\sqrt{3}}{2\cdot 10^{-2}} =$

$= 6{,}2\cdot 10^{-6}$ (Н).

Ответ: $F = 6{,}2\cdot 10^{-6}$ Н.

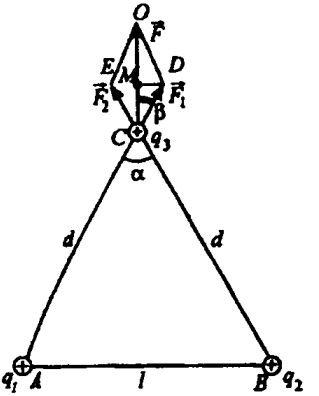


Рис. 166

Задача 6.

Потенциальная электростатическая системы четырех положительных зарядов q, расположенных в вакууме вдоль одной прямой на расстоянии a друг от друга, равна:

1) $\dfrac{3q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}$ 2) $\dfrac{13q^2}{12\pi\varepsilon_0 a}$ 3) $\dfrac{q^2}{\pi\varepsilon_0 a}$

4) $\dfrac{3q}{4\pi\varepsilon_0 a}$ 5) $\dfrac{3q^2}{4\pi\varepsilon_0 a^2}$

Дано:	**Решение:**
q $n = 4$ a	Если два одинаково заряженных шарика находятся на расстоянии a друг от друга, то потенциальная энергия электрического поля этих двух зарядов будет равна:
$П - ?$	

$$П_1 = \frac{kq^2}{a} = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}.$$

Когда поле создано несколькими зарядами, то потенциальная энергия заряда q, помещенного в любую точку такого поля, равна алгебраической сумме энергий, обусловленных полем каждого заряда в отдельности в этой точке.

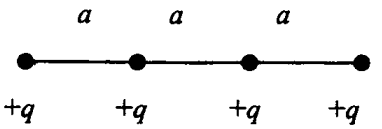


Рис. 167

Потенциальная энергия поля, создаваемого системой зарядов, изображенных на рисунке 167:

$$П = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}\left(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+1+\frac{1}{2}+1\right) = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}\,4\frac{1}{3} = \frac{13q^2}{12\pi\varepsilon_0 a}.$$

Первые три слагаемые в скобках:

$$\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}\left(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}\right) —$$

отображают потенциальную энергию взаимодействия первого шарика со вторым, находящимся от него на расстоянии a, третьим — на расстоянии $2a$ и четвертым — на расстоянии $3a$;

следующие два:

$$\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}\left(1+\frac{1}{2}\right) —$$

потенциальная энергия взаимодействия второго шарика с третьим, находящимся от него на расстоянии a, и четвертым — на расстоянии $2a$;

и последнее слагаемое:

$$\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}\,(1) —$$

потенциальная энергия взаимодействия третьего шарика с четвертым, находящимся от него на расстоянии a.

Таким образом, здесь, подобно многоступенчатой ракете, отбрасываются уже использованные варианты взаимодействия.

Проанализировав имеющиеся варианты ответов, выбираем правильный ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 7.

Металлический шар радиусом r_1, заряженный до потенциала φ_1, окружают концентрической сферической проводящей оболочкой радиусом r_2. Чему равен потенциал шара, если оболочку заземлить?

Дано:	**Решение:**
r_1	Пока шар не был окружен оболочкой, его электроемкость равнялась:
φ_1	
r_2	$C_1 = \dfrac{q}{\varphi_1} \Rightarrow$
$\varphi_2 - ?$	

$$q = C_1\varphi_1.$$

С другой стороны, электроемкость сферического проводника равна:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r,$$

где r — радиус сферы $\Rightarrow$

$$q = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1\varphi_1.$$

Когда шар окружили проводящей оболочкой, а затем ее заземлили, вся система превратилась в сферический конденсатор (рис. 168), электроемкость которого стала:

$$C_2 = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1} \Rightarrow$$

$$q = C_2\varphi_2.$$

Заряд системы не изменился $\Rightarrow$ по закону сохранения электрического заряда:

$$\frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1}\varphi_2 = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1\varphi_1. \Rightarrow$$

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1(r_2 - r_1)}{r_2} = \varphi_1\left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right).$$

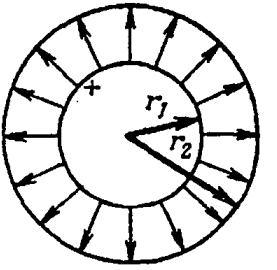


Рис. 168

Так как потенциал внутри сферы одинаков, потенциал на первом шаре равен потенциалу на втором.

Ответ: $\varphi_2 = \dfrac{\varphi_1(r_2 - r_1)}{r_2} = \varphi_1\left(1 - \dfrac{r_1}{r_2}\right)$.

Задача 8.

На рисунке 169 дана зависимость потенциала электростатического поля от координаты. Напряженность поля равна нулю на участках:

1) 1–2 и 4–5;
2) 2–3 и 3–4;
3) 2–3;
4) 3–4;
5) напряженность везде отлична от нуля.

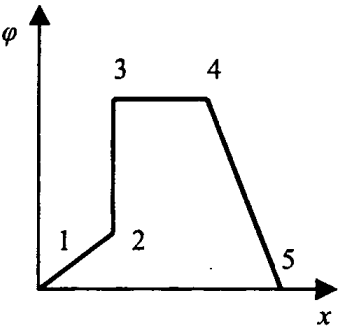


Рис. 169

Решение:

Связь между двумя характеристиками электростатического поля — напряженностью и потенциалов выражается в виде:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{d},$$

где $\Delta\varphi$ — изменение потенциала;

d — расстояние между точками, где это изменение происходит.

Для того чтобы $E = 0$, необходимо равенство нулю $\Delta\varphi$:

$\Delta\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = const \Rightarrow$

на участке 3–4 это условие выполняется $\Rightarrow$

выбираем правильный ответ — № 4.

Ответ: № 4.

Задача 9.

Два маленьких одинаковых металлических шарика заряжены положительными зарядами q и $4q$. Центры шариков находятся на расстоянии r друг от друга. Шарики привели в соприкосновение. На какое расстояние x после этого нужно развести их центры, чтобы сила взаимодействия осталась прежней?

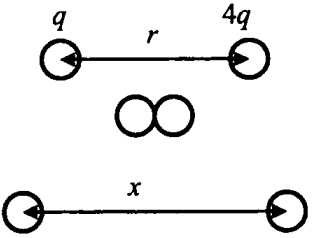


Рис. 170

1) $x = 0{,}80\ r$; 2) $x = 1{,}80\ r$; 3) $x = 2{,}00\ r$;
4) $x = 1{,}25\ r$; 5) $x = r$.

Дано:
q
$4q$
r
$F = const$
$x - ?$

Решение:

Так как шарики заряжены одноименными зарядами, то по закону Кулона они отталкиваются (рис. 170) и до соприкосновения взаимодействуют с силой, определяемой по закону Кулона как:

$$F_1 = k\frac{q \cdot 4q}{r^2\varepsilon} = 4k\frac{q^2}{r^2},\ (\varepsilon = 1).$$

После того, как шарики привели в соприкосновение, их суммарный заряд q_1:

$q_1 = q + 4q$

распределился поровну по обоим шарикам и заряд каждого шарика после их раздвижения q_2 стал равен:

$$q_2 = \frac{1}{2}\ (q + 4q) = \frac{5}{2}\ q = 2{,}5q. \Rightarrow$$

Сила взаимодействия зарядов F_2:

$$F_2 = k\frac{2{,}5q \cdot 2{,}5q}{x^2} = 6{,}25\ k\frac{q^2}{x^2}.$$

Так сила взаимодействия не изменилась ($F = const$) $\Rightarrow$

$$4k\frac{q^2}{r^2} = 6{,}25\ k\frac{q^2}{x^2} \Rightarrow x = \frac{2{,}5\cdot r}{2} = 1{,}25r.$$

Проанализировав представленные варианты ответов, выбираем правильный — № 4.

Ответ: № 4.

Задача 10.

Общая емкость изображенной на рисунке 171 батареи конденсаторов ($C_1 = C_2 = C_3 = 2$ мкФ) равна

1) 6 мкФ
2) 5 мкФ
3) $\frac{4}{3}$ мкФ
4) $\frac{3}{4}$ мкФ
5) 3 мкФ

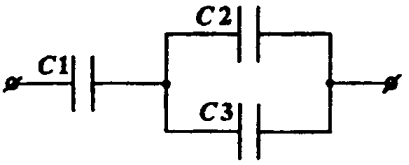


Рис. 171

Дано:
$C_1 = C_2 = C_3 = 2$ мкФ
$C_б$ – ?

Решение:

Если в схеме имеются последовательные и параллельные соединения, то их нужно заменять на эквивалентные, начиная с параллельного соединения: при параллельном соединении электроемкости складываются $\Rightarrow$

$C_{2,3} = C_2 + C_3 = 4$ мкФ.

При последовательном — складываются величины, обратные емкостям:

$$\frac{1}{C_б} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{2,3}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4} \Rightarrow$$

$C_б = \frac{4}{3}$ мкФ $\Rightarrow$ правильным будет ответ под номером № 3.

Ответ: № 3.

Задача 11.

Пространство между обкладками плоского заряженного конденсатора заполнено диэлектриком с $\varepsilon = 4$. Как изменится энергия конденсатора, если он все время остается подключенным к источнику напряжения?

1) увеличится в 4 раза;
2) уменьшится в 4 раза;
3) увеличится в 2 раза;
4) уменьшится в 2 раза;
5) не изменится.

Дано:	**Решение:**
$\varepsilon = 1$ $\varepsilon = 4$ $U = const$ $C_б - ?$	Так как конденсатор все время остается подключенным к источнику напряжения, выбираем формулу для энергии через напряжение:

$$W_э = \frac{CU^2}{2}.$$

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \Rightarrow$$

$$W_1 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_0 SU^2}{2d},\ W_2 = \frac{\varepsilon_2\varepsilon_0 SU^2}{2d} \Rightarrow$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 4 \Rightarrow W_2 = 4W_1 \Rightarrow$$

Энергия увеличится в 4 раза $\Rightarrow$ Правильный ответ — № 1.

Ответ: № 1.

Задача 12.

Проводящая сфера радиусом R = 6 см, имеет заряд q. Напряженность поля на поверхности сферы $E_2 = 220\ \frac{В}{м}$, а напряженность поля в некоторой точке, находящейся вне

сферы, равна $E_1 = 55\ \frac{В}{м}$. Расстояние от этой точки до центра сферы равно:

1) 8 см; 2) 12 см; 3) 18 см; 4) 24 см; 5) 36 см.

Дано:	СИ
$R = 6$ см	$= 6 \cdot 10^{-2}$ м
$E_ш = 220\ \frac{В}{м}$	
$E_1 = 55\ \frac{В}{м}$	
$e = 1$	
$r_1 - ?$	

Решение:

Напряженность поля на поверхности сферы:

$$E_ш = k\frac{q}{\varepsilon R_ш^2} = k\frac{q}{R_ш^2}.$$

Напряженность поля в некоторой точке, находящейся на расстоянии r_1 от центра сферы (рис. 172):

$$E_1 = k\frac{q}{r_1^2}.$$

Разделив одно равенство на другое, получим:

$$\frac{E_ш}{E_1} = \frac{r_1^2}{R_ш^2} \Rightarrow$$

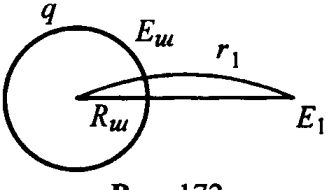


Рис. 172

$$r_1 = R_ш\sqrt{\frac{E_ш}{E_1}} = 6 \cdot 10^{-2}\sqrt{\frac{220}{55}} = 12 \cdot 10^{-2}\ (м) = 12\ (см).$$

Проанализировав варианты ответов, видим, что правильный ответ — № 2.

Ответ: № 2.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 8.

Задача 1.

Два одинаковых шарика на нитях равной длины подвешены в одной точке. Когда их заряжают одноименными зарядами, нити расходятся на некоторый угол. Какой должна быть плотность материала шариков ρ_0, чтобы этот угол не изменился при погружении системы в жидкость плотностью ρ и диэлектрической проницаемостью ε.

Ответ: $\dfrac{\rho\varepsilon}{\varepsilon-1}$.

Задача 2.

Три положительных точечных заряда q расположены в вакууме вдоль прямой на расстоянии a друг от друга. Какую нужно совершить работу, чтобы расположить эти заряды в вершинах равностороннего треугольника со стороной a (рис. 173)?

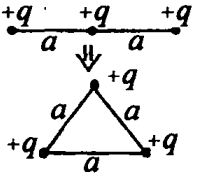


Рис. 173

Ответ: $\dfrac{q^2}{8\pi\varepsilon_0 a}$.

Задача 3.

Если металлический шар радиусом R_1, заряженный до потенциала φ_1, соединить тонкой проволокой с незаряженным металлическим шаром радиусом R_2, то чему окажется равным общий потенциал соединения φ?

Ответ: $\dfrac{R_1}{R_1+R_2}\varphi_1$.

Задача 4.

Пусть m и e — масса и величина заряда электрона. Если в вакууме из бесконечности вдоль одной прямой навстречу друг другу со скоростями υ и 3υ движутся два электрона, то каким будет минимальное расстояние, на которое они могут сблизиться, без учета гравитационного взаимодействия?

Ответ: $\dfrac{e^2}{16\pi\varepsilon_0 m\upsilon^2}$.

Задача 5.

Плоский конденсатор с расстоянием между пластинами 0,4 мм заряжен от источника напряжения до разности потенциалов 20 В и отключен от источника. Какая разность потенциалов установится между пластинами конденсатора, если их раздвинуть до расстояния 4 мм?

Ответ: 200 В.

Задача 6.

Найти напряжение между точками А и В (рис. 174), если АВ = 8 см, $\alpha = 30^\circ$, а напряженность поля равна 50 $\dfrac{кВ}{м}$.

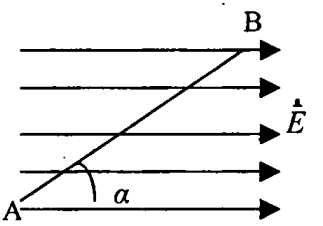


Рис. 174

Ответ: 3,5 кВ.

Задача 7.

В основании равностороннего треугольника со стороной a находятся заряды по $+q$ каждый, а в вершине — заряд $-q$. Какова напряженность в центре треугольника?

Ответ: $\dfrac{3q}{2\pi\varepsilon_0 a^2}$.

Задача 8.

Во сколько раз напряженность электрического поля на поверхности капли, образовавшейся из слияния N маленьких одинаково заряженных капелек, больше напряженности на поверхности маленькой капельки до слияния (считать, что капли имеют сферическую форму)?

Ответ: $\sqrt[3]{N}$.

Задача 9.

Три конденсатора одинаковой емкости: $C_1 = C_2 = C_3 = 0{,}2$ мкФ соединены, как показано на рисунке 175, и подключены к источнику постоянного напряжения 200 В. Определить электрическую энергию, запасенную батареей конденсаторов.

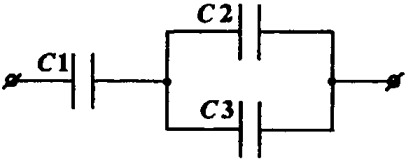


Рис. 175

Ответ: $2{,}7 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Задача 10.

Электрон вылетает из точки электростатического поля, потенциал которой φ, со скоростью υ в направлении силовых линий. Определить потенциал точки, в которой электрон остановится. Модуль заряда электрона e, масса m.

Ответ: $\varphi - \dfrac{m\upsilon^2}{2e}$.

Задача 11.

Металлический шар радиусом 5 см заряжен до потенциала 150 В. Найти потенциал и напряженность поля в точке, удаленной от поверхности шара на расстояние 10 см.

Ответ: 50 В; $3{,}3 \cdot 10^2 \dfrac{В}{м}$.

Задача 12.

Три точечных заряда q_1, q_2 и q_3 расположены, как показано на рисунке 176, при этом $q_1 = q_0$, $q_2 = 2q_0$, $q_3 = 2q_0$. Если сила взаимодействия между зарядами q_1 и q_3 равна $F_{13} = 4$Н , то чему равна сумма сил, действующих на заряд q_3?

Ответ: 22,6 Н.

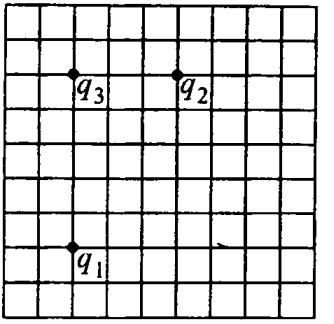


Рис. 176

Тест № 8

Задача 1.

Два заряда q_1 и q_2, находясь на расстоянии r друг от друга в воде, взаимодействуют с силой F. На каком расстоянии их следует поместить в вакууме, чтобы сила взаимодействия осталась прежней; диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon = 81$.

1) $81\,r$; 2) $9\,r$; 3) $3\,r$; 4) $\frac{r}{3}$; 5) $\frac{r}{9}$.

Задача 2.

Электрический диполь представляет собой два одинаковых по величине и противоположных по знаку заряда q, помещённых на расстоянии l друг от друга (рис. 177). Найти величину напряжённости поля в точке А, равноудалённой от двух зарядов на расстоянии r.

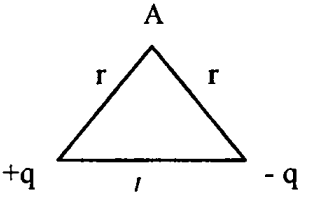


Рис. 177

1) $\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 lr}$; 2) $\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 lr^2}$; 3) $\frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$;

4) $\frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$; 5) $\frac{2ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$.

Задача 3.

Электрон, двигавшийся со скоростью x, влетает в параллельное его движению однородное электрическое поле с напряжённостью E. Масса электрона m, заряд e. Какое расстояние s пройдёт электрон в поле до момента остановки и какое время t ему для этого понадобится?

1) $s=\frac{mu^2}{eE}; t=\frac{mu}{2eE}$; 2) $s=\frac{m\upsilon^2}{eE^2}; t=\frac{m\upsilon^2}{eE}$;

3) $s=\frac{m\upsilon^2}{2eE}; t=\frac{m\upsilon}{eE}$; 4) $s=\frac{2m\upsilon^2}{eE}; t=\frac{2m\upsilon}{eE}$;

5) $s=\frac{m\upsilon^2}{2eE^2}; t=\frac{m\upsilon}{eE^2}$.

Задача 4.

Во сколько раз изменится энергия плоского конденсатора, подключённого к батарее, если из заполненного полностью пространства между пластинами вынуть диэлектрик с проницаемостью ε?

1) $\frac{W_2}{W_1}=\varepsilon+1$; 2) $\frac{W_2}{W_1}=\varepsilon$; 3) $\frac{W_2}{W_1}=\frac{1}{\varepsilon}$;

4) $\frac{W_2}{W_1}=\frac{\varepsilon}{\varepsilon+1}$; 5) $\frac{W_2}{W_1}=\frac{\varepsilon+1}{\varepsilon}$.

Задача 5.

Потенциал одной маленькой заряженной сферической капли ртути равен φ. Каким станет потенциал большой капли ртути, получившейся при слиянии N таких капель в одну?

1) φ; 2) $\varphi\cdot N$; 3) $\varphi\cdot N^{\frac{2}{3}}$; 4) $\varphi\cdot N^{\frac{1}{3}}$; 5) $\varphi\cdot\frac{1}{N}$.

Задача 6.

Проводящая сфера радиусом R = 4 см имеет заряд q. Отношение потенциала поля на поверхности сферы к потенциалу поля в некоторой точке, находящейся вне сферы на расстоянии r = 16 см от ее центра, равно:

1) 0,25; 2) 2; 3) 4; 4) 6; 5) 8.

Задача 7.

Три маленьких одноименных шарика с зарядом q каждый (рис. 178) удерживаются в вакууме вдоль одной прямой на расстоянии a друг от друга двумя нитями. Какую максимальную кинетическую энергию приобретет крайний шарик, если обе нити одновременно пережечь?

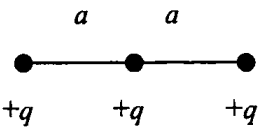


Рис. 178

1) $\frac{5q^2}{8\pi\varepsilon_0 a}$; 2) $\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 a}$; 3) $\frac{5q^2}{16\pi\varepsilon_0 a}$;

4) $\frac{q^2}{2\pi\varepsilon_0 a}$; 5) $\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 a^2}$.

Задача 8.

Проводящий шар радиусом R имеет положительный заряд $+q$. Если на расстоянии $2R$ от центра шара поместить точечный отрицательный заряд $-2q$, то потенциал в центре шара

1) уменьшится в 2 раза; 2) не изменится;
3) станет равным нулю; 4) увеличится в 3 раза;
5) изменит знак на противоположный.

Задача 9.

Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов U и отключен от источника тока. Если

расстояние между обкладками конденсатора увеличить в k раз, то разность потенциалов станет равной:

1) $(k-1)U$; 2) $\frac{U}{k}$; 3) kU; 4) k^2U; 5) U.

Задача 10.

Заряженный конденсатор емкостью C_1 подключили параллельно к незаряженному конденсатору емкостью C_2 = 3 мкФ. При этом напряжение на батарее конденсаторов стало равно 100 В, а ее энергия — $2{,}5\cdot10^{-2}$ Дж. Определить емкость конденсатора C_1.

1) 0,5 мкФ; 2) 1,0 мкФ; 3) 1,5 мкФ;
4) 2,0 мкФ; 5) 4,0 мкФ.

Задача 11.

Проводящая сфера радиусом R = 4 см имеет заряд q. Если напряженность поля в некоторой точке, находящейся вне сферы на расстоянии a = 12 см от ее поверхности, равна $E = 30\ \frac{В}{м}$, то напряженность поля на поверхности сферы равна:

1) $7{,}5\ \frac{В}{м}$; 2) $15\ \frac{В}{м}$; 3) $60\ \frac{В}{м}$; 4) $120\ \frac{В}{м}$; 5) $480\ \frac{В}{м}$.

Задача 12.

Три точечных заряда q_1, q_2 и q_3 расположены, как показано на рисунке 179, при этом $q_1 = 3q_0$, $q_2 = q_0$, $q_3 = 2q_0$. Если сила взаимодействия между зарядами q_1 и q_3 равна F_{13} = 4Н , то сумма сил, действующих на заряд q_3, равна:

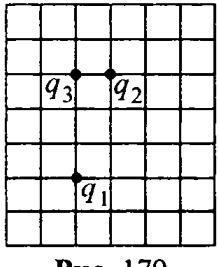


Рис. 179

1) 5,1 Н; 2) 9,6 Н; 3) 11,2 Н;
4) 12,6 Н; 5) 16 Н.

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Программа по физике содержит следующие вопросы по этому разделу:

Электрический ток. Сила тока. Плотность тока. Напряжение. Носители свободных электрических зарядов в металлах, жидкостях и газах.

Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводников. Последовательное и параллельное соединение проводников. Электродвижущая сила источника тока. Закон Ома для полной цепи. Работа и мощность тока. Закон Джоуля–Ленца. Внесистемная единица работы — 1 кВт·ч.

Измерение силы тока, напряжения, сопротивления проводников.

Электрический ток в различных средах. Электронная проводимость металлов. Зависимость сопротивления от температуры. Сверхпроводимость. Электрический ток в электролитах. Законы электролиза. Электрический ток в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряд. Ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Диод. Триод. Электронно-лучевая трубка.

Полупроводники. Электропроводность полупроводников и ее зависимость от температуры. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковый диод. Транзистор. *p–n*-переход.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

6.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электрическим током называется упорядоченное движение заряженных частиц.

Условия существования электрического тока:

- наличие заряженных частиц;
- наличие разности потенциалов, т.е. наличие электрического поля.

Электрический ток способен оказывать:

- тепловое действие;
- химическое действие;
- магнитное действие.

6.1.1. Сила и плотность тока

Сила тока I:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

где Δq — заряд, проходящий за единицу времени через поперечное сечение проводника.

Если сила тока не изменяется со временем, электрический ток называют ***постоянным***. Сила постоянного тока также может быть определена:

$$I = \frac{q}{t}. \; [I] = \frac{Кл}{c} = \frac{A \cdot c}{c} = A.$$

Сила тока представляет собой ***одну из основных величин*** международной системы единиц (СИ).

Сила постоянного тока в металлическом проводнике с площадью сечения S:

$$I = ne\bar{\upsilon}S,$$

где n — число носителей заряда (электронов проводимости);

e — абсолютное значение заряда электрона;

$\bar{\upsilon}$ — средняя скорость упорядоченного движения электронов.

Плотность тока в проводнике:

$$j = \frac{I}{S}, \; [j] = \frac{A}{м^2},$$

где I — сила тока,

S — площадь поперечного сечения проводника.

Плотность тока проводимости в металлах:

$j = ne\bar{v}$.

6.1.2. Сопротивление проводника и проводимость

Электрическое сопротивление проводника вызвано столкновениями движущихся носителей тока между собой или с другими частицами (например, в металле — с ионами, находящимися в узлах решетки). Оно зависит от вещества и геометрических размеров проводника.

Электрическое сопротивление R цилиндрического проводника длиной l и площадью поперечного сечение S:

$$R = \rho\frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление проводника.

$[R]$ = Ом = $\frac{B}{A}$, $[\rho]$ = Ом·м.

Электрическая проводимость G:

$$G = \frac{1}{R}.\ [G] = \frac{1}{Ом} = \frac{A}{B} = \text{сименс} = \text{См}.$$

Величина, обратная удельному сопротивлению проводника, называется ***удельной проводимостью*** σ:

$$\sigma = \frac{1}{\rho},\ [\sigma] = \frac{См}{м}.$$

Сопротивление проводника, так же как и удельное сопротивление, зависит от температуры:

$R = R_0(1 + \alpha t)$;

$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$,

где R_0 и ρ_0 — сопротивление и удельное сопротивление при 0 °С;

t — температура по шкале Цельсия;

α — температурный коэффициент сопротивления $[\alpha] = K^{-1}$.

У ***металлических проводников*** сопротивление ***увеличивается*** с ростом температуры, у ***электролитов*** (растворы солей, щелочей, кислот) — ***уменьшается***.

6.1.3. Источники тока

Если соединить проводником два разноименно заряженные проводящие тела, то возникнет кратковременный электрический ток.

Для получения длительного тока нужно на положительный полюс подавать положительные заряды, а на отрицательный — отрицательные.

Сделать это силы электрического происхождения не могут (рис. 180), так как одноименные заряды отталкиваются.

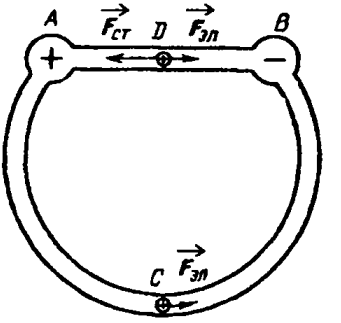


Рис. 180

Электродвижущая сила источника тока *(ЭДС)* равна работе ***сторонних*** сил по перемещению ***единичного положительного*** заряда по замкнутому контуру (или внутри источника тока):

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q},$$

где $A_{ст}$ — работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда. $[\varepsilon]$ = В.

Сторонними называются силы неэлектрического происхождения:

- в аккумуляторе — химические силы (электролиз);
- в генераторе — механические силы.

Сопротивление самого источника тока r называют ***внутренним сопротивлением цепи***, а сопротивление проводника или потребителя тока R — ***внешним сопротивлением цепи***.

Напряжением на концах участка цепи или ***падением напряжения*** U на участке цепи в том случае, если на этом участке не приложена *ЭДС*, называется величина, равная U:

$U = (\varphi_1 - \varphi_2)$.

Физический смысл *ЭДС* — это напряжение на полюсах источника тока при разомкнутой цепи.

Напряжение на полюсах источника $U_{кл}$ (рис. 181) при замкнутой цепи — это падение напряжения на внешней цепи. Оно меньше *ЭДС* источника на величину падения напряжения внутри источника.

Напряжение, сопротивление и сила тока в цепи связаны определенными законами.

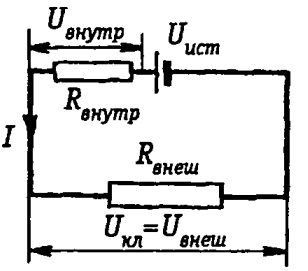


Рис. 181

6.2. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

6.2.1. Законы Ома

Закон Ома для участка цепи, не содержащего ЭДС: сила тока на участка цепи, не содержащем ЭДС (рис. 182), прямо пропорциональна разности потенциалов на концах этого участка цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}.$$

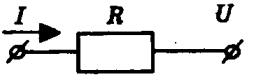


Рис. 182

Закон Ома для замкнутого контура: сила тока в замкнутом контуре прямо пропорциональна ЭДС источника

тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению контура:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где ε — электродвижущая сила источника тока;

R — внешнее сопротивление (общее сопротивление всех проводников и потребителей, независимо от соединения);

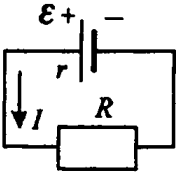


Рис. 183

r — сопротивление источника тока или внутреннее сопротивление (рис. 183).

Падение напряжения на внешнем участке цепи:

$U = \varepsilon - Ir$,

на ***внутреннем:***

$u = Ir$.

В случае замкнутой электрической цепи *ЭДС* источника равна сумме всех падений напряжений:

$\varepsilon = U + u$.

6.2.2. Соединения проводников

Последовательное соединение проводников:

- через любое сопротивление R пройдет один и тот же заряд $\Rightarrow I = I_1 = I_2 = I_3 = const$;
- $U = U_1 + U_2 + U_3 \Rightarrow$ падение напряжения в цепи равно сумме падений напряжения на отдельных участках (рис. 184);

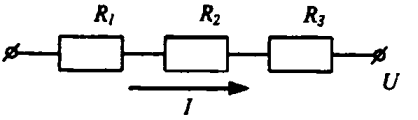


Рис. 184

- $R = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n \Rightarrow$ общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений проводников;
- $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$.

Параллельное соединение проводников:

- сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов в разветвленных ее участках: $I = I_1 + I_2 + I_3$ (рис. 185);
- падение напряжения в параллельно соединенных участках цепи одинакво: $U = const$;
- при параллельном соединении проводников складываются проводимости:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R} + ... + \frac{1}{R_n};$$

- $I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$.

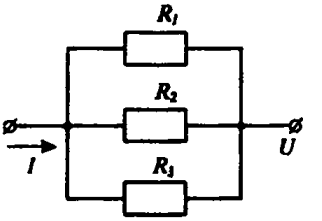


Рис. 185

6.2.3. Соединения источников тока

При последовательном соединении источников тока с e_1 и e_2, имеющих внутренние сопротивления r_1 и r_2 соответственно, общая *ЭДС*:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \Rightarrow$$

$$I_{посл} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R + r_1 + r_2}.$$

При одинаковых *ЭДС* отдельных n элементов общая *ЭДС* батареи:

$$\varepsilon_{общ} = n\varepsilon,$$

общее внутреннее сопротивление:

$$r_{общ} = nr \Rightarrow$$

$$I_{посл} = \frac{n\varepsilon}{R + nr}.$$

При параллельном соединении источников тока ε_1 и ε_2, если выполняется условие, что $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$:

$$I_{пар} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{2}}.$$

Если n отдельных одинаковых элементов, то:

$$I_{пар} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}.$$

Короткое замыкание — замыкание полюсов источника проводником с малым сопротивлением: при коротком замыкании ток $I_{к.з.}$:

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

6.2.4. Измерение тока и напряжения

Прибор для измерения тока называют ***амперметром***. Он включается в цепь последовательно.

Прибор для измерения напряжения называют ***вольтметром***. Он включается в цепь параллельно.

Для измерения слабых токов, малых напряжений и зарядов применяется ***гальванометр***.

На рисунке 186, а представлены условные обозначения амперметра, вольтметра и гальванометра, а на рисунке 186, б — схемы их включения.

Вольтметр, присоединенный к полюсам источника *ЭДС*, при замкнутой цепи покажет ***напряжение во внешней цепи***.

Вольтметр, присоединенный к полюсам источника *ЭДС*, при разомкнутой цепи покажет ***ЭДС источника тока***.

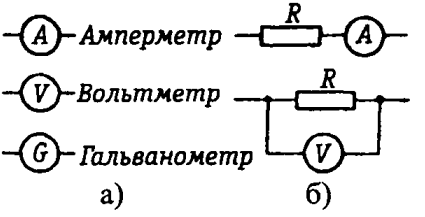


Рис. 186

Иногда нужно расширить пределы измерений

амперметра и вольтметра в n раз. Для этого используются шунты, которые можно рассчитать.

Сопротивление шунта амперметра подсоединяется параллельно амперметру и равно:

$$R_ш = \frac{R_A}{n-1}.$$

Сопротивление шунта вольтметра включается последовательно и равно:

$$R_ш = R_V(n-1).$$

6.2.5. Работа и мощность тока

Работа постоянного электрического тока:

$$A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2t}{R},$$

где q — заряд, прошедший по проводнику;

U — падение напряжения в проводнике;

I — сила тока;

R — сопротивление;

t — время прохождения тока.

$[A]$ = Дж = Кл·В = А·В·с.

Мощность электрического тока P:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}. \ [P] = \text{Вт}.$$

Полная мощность, выделяемая в цепи:

$P = I\varepsilon$.

6.2.6. Коэффициент полезного действия (*КПД*)

К известным из механики формулам расчета ***КПД***:

$$\eta = \frac{A_{пол}}{A_{затр}} 100\%, \ \eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} 100\%$$

в электродинамике добавляются:

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q_{затр}} 100\% ,$$

где $Q_{пол}$ — полезное количество теплоты;

$Q_{зат}$ — затраченное.

КПД электрогенератора, когда в цепи имеются одни сопротивления:

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r}$$

(***КПД*** может быть безразмерным).

КПД батареи с *ЭДС*, равной ε:

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon},$$

где U — падение напряжения на внешнем сопротивлении.

6.2.7. Закон Джоуля–Ленца

Закон Джоуля–Ленца: количество теплоты, которое выделяется током в проводнике, равно:

$Q = I^2 Rt$,

где R — сопротивление проводника;

t — время прохождения тока;

I — сила тока.

Если прибор включается в одну и ту же цепь (напряжение одинаково), то закон Джоуля–Ленца нужно применять в форме:

$$Q = \frac{U^2 t}{R}.$$

6.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

6.3.1. Электрический ток в электролитах

Электролизом называется процесс выделения составных частей химических соединений на электродах при прохождении тока через электролит или расплав этих соединений.

Электролитами называются растворы химических соединений в воде или в других растворителях, а также расплавы, проводящие электрический ток. ***Электролит*** — это жидкий проводник, в котором подвижными носителями зарядов являются только ионы.

На рисунке 187 представлена схема прохождения тока через раствор, содержащий ионы H^+ и SO_4^{--}:

$$H_2SO_4 \rightleftarrows 2H^+ + SO_4^{--}.$$

Проводимость растворов электролитов называется ***ионной проводимостью***.

Диссоциация (распад) молекул на положительные и отрицательные ионы существует одновременно с процессом соединения ионов в молекулы — ***рекомбинацией*** молекул.

При подключении источника тока к электродам, опущенным в такой раствор, наблюдается направленное движение заряженных ионов (рис. 187). При этом положительные ионы движутся к отрицательному электроду — ***катоду*** и поэтому называются ***катионами***, а отрицательные — к положительному электроду — ***аноду*** и поэтому называются ***анионами***.

Отличительные особенности тока в электролитах:

- процесс прохождения тока через электролит связан с переносом вещества;
- происходит химическое превращение вещества;
- ток течет в обоих направлениях.

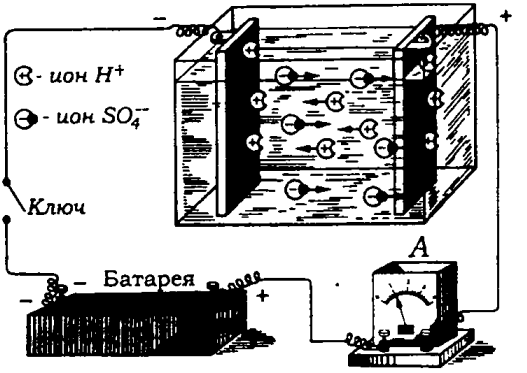


Рис. 187

6.3.1.1. Законы Фарадея для электролиза

Первый закон Фарадея для электролиза: масса вещества, выделяющаяся на электроде при прохождении тока через электролит:

$m = Kq = KIt$,

где K — электрохимический эквивалент;

I — сила постоянного тока, протекающего через раствор за время t.

Второй закон Фарадея для электролиза: электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам χ, равным отношению их молярных (атомных) масс A к валентности n:

$$K = C\chi = \frac{1}{F}\frac{A}{n},$$

где $C = \dfrac{1}{F}$,

$$F = |e|N_A = 9{,}648 \cdot 10^4 \ \frac{Кл}{моль}$$ — ***постоянная Фарадея***.

Объединенный закон электролиза Фарадея:

$$m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}q = m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}It,$$

где q — электрический заряд.

6.3.1.2. Применение электролиза

Электролиз имеет много разнообразных применений в технике:

- ***Электрострикция*** — извлечение металла из раствора с помощью электролиза.
- ***Гальваностегия*** — покрытие металлических предметов тонким слоем другого металла (никелирование, хромирование, оцинковка, серебрение).
- ***Гальванопластика*** — получение рельефных копий изображений (клише для печатания денежных знаков, матрицы для печатания газет).
- ***Гальванические элементы*** — источники получения электрической энергии за счет химической энергии.
- ***Электрополировка*** — исчезновение выступов на поверхности активного анода.

6.3.2. Электрический ток в газах

Электрический ток в газах представляет собой направленное движение электрических зарядов, носителями которых являются ***свободные электроны и ионы*** ⇒ проводимость газов — ***ионно-электронная*** в отличие от ***электронной проводимости металлов*** и ***ионной проводимости электролитов.***

Газ в обычном состоянии не является проводником, например, в конденсаторах воздушная прослойка считается диэлектриком.

Чтобы газ сделать проводником, его нужно ионизировать.

Пути ионизации газа:

- термическая ионизация — нагревание газа до высоких температур (рис. 188, а);
- воздействие ультрафиолетовых или рентгеновских лучей;

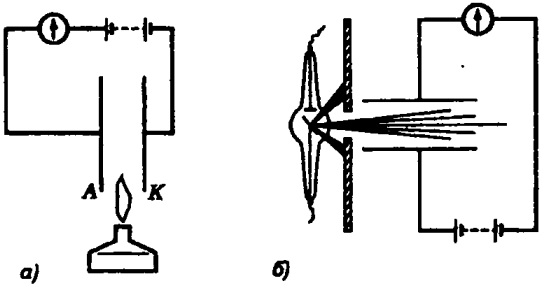


Рис. 188

- космическое излучение (рис. 188, б);
- сильное электрическое поле (рис. 188, б).

6.3.3. Самостоятельный и несамостоятельный разряд

Электропроводность газов, возникающая под действием электрического поля, существующего между электродами, называется ***самостоятельной проводимостью***, а прохождение тока в газах в этом случае — ***самостоятельным разрядом***.

Основной характеристикой газового разряда является ***вольтамперная характеристика*** — зависимость силы тока I в межэлектродном пространстве от напряжения U, приложенного к электродам.

На рисунке 189 представлена вольтамперная характеристика несамостоятельного разряда. При малых напряжениях она имеет вид прямой, что означает выполнение закона Ома (участок OA). Здесь интенсивно идет процесс рекомбинации. При некотором напряжении (точка B) все образовавшиеся

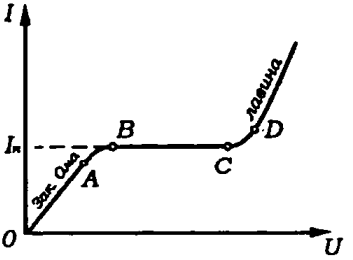


Рис. 189

под действием ионизатора ионы, не претерпев рекомбинации, достигают электродов — наступает ***насыщение*** (I_H).

При дальнейшем увеличении напряжения разгоняемые столь сильным полем ионы приобретают энергию, остаточную для ионизации молекул — возникает ***лавина*** и происходит пробой газа.

6.3.4. Ток в вакууме

Под вакуумом понимают такое разряжение газа в сосуде, когда длина свободного пробега превышает размеры сосуда. Проводимость в вакууме осуществляется термоэлектронами.

Термоэлектронной эмиссией называется явление испускания электронов с поверхности нагретого катода.

Электронная лампа представляет собой стеклянный или металлический баллон, в котором создан вакуум и укреплены электроды. Название электронных ламп соответствует числу их электродов.

6.3.4.1. Диод

Диод — это двухэлектродная лампа, имеющая ***анод*** — положительно заряженный электрод и подогреваемый ***катод*** — отрицательно заряженный электрод, благодаря которому и образуется термоэлектронная эмиссия.

На рисунке 190 представлены внешний вид диода и схематическое изображение диода (рабочая схема), а на рисунке 191 — вольтамперная характеристика диода.

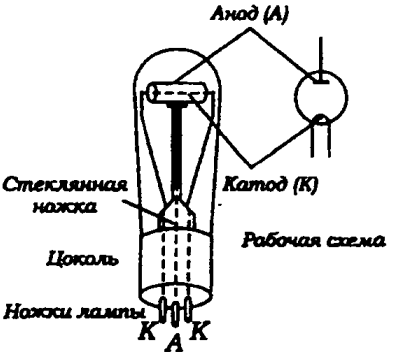


Рис. 190

При малом напряжении термоэлектроны держатся вблизи катода и создают «электронное облачко», которое препятствует движению вновь вылетевших электронов к аноду.

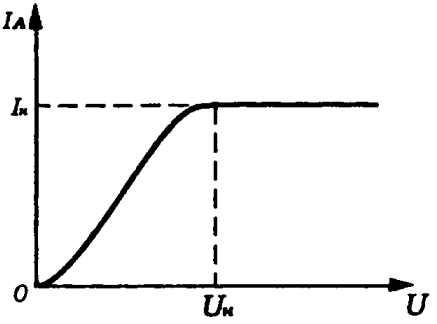


Рис. 191

С увеличением напряжения это облачко рассасывается.

При дальнейшем повышении напряжения между электродами вакуумной лампы наступает момент, когда все вылетающие из нити электроны увлекаются к аноду и наступает ***ток насыщения***.

Ток насыщения тем выше, чем выше температура катода.

Диоды используются для выпрямления переменного электрического тока, так как пропускают ток только в одном направлении: когда на аноде +.

6.3.4.2. Триод

Триод — это трехэлектродная лампа, имеющая анод, подогреваемый катод и сетку, выполненную в виде спирали, охватывающей катод. На рисунке 192 представлен:

а) внешний вид триода с катодом прямого накала;

б) схематическое изображение триода с подогреваемым катодом *К*, анодом *А* и сеткой *С*.

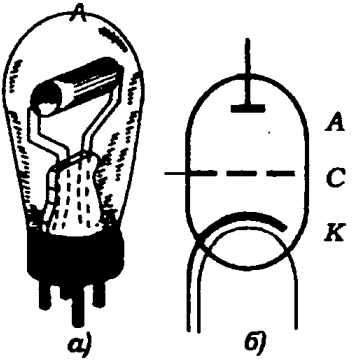


Рис. 192

Одним из положительных качеств электронных ламп является практическая ***безынер-***

ционность их работы, что объясняется тем, что электроны являются самыми легкими подвижными носителями тока и даже при очень быстрых изменениях напряжения на электродах ток в лампе столь же быстро успевает изменяться.

Сетка — это дополнительный электрод, позволяющий управлять анодным током.

Даже при небольшом напряжении, подаваемом между сеткой и катодом, в зазоре между ними создается сильное электрическое поле, оказывающее значительное влияние на величину анодного тока лампы.

Рисунок 193 характеризует работу триода:

а) при большом отрицательном напряжении между сеткой и катодом тока в цепи нет ($U_C > U_З$), где $U_З$ — задерживающий потенциал;

б) при уменьшении значения отрицательного напряжения между сеткой и катодом ($U_C < U_З$) в цепи лампы течет анодный ток;

в) зависимость анодного тока лампы I_A от напряжения на сетке U_C.

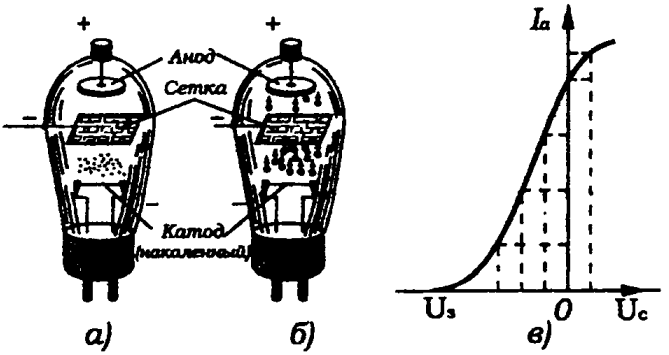


Рис. 193

Задерживающим потенциалом называется такое минимальное отрицательное напряжение на сетке, при кото-

ром ни один электрон ее не достигает, а вся кинетическая энергия электрона идет на работу торможения:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU_з,$$

где m, υ и e — масса, скорость и заряд электрона соответственно.

Триоды используются для усиления электрических сигналов. Для улучшения работы усилительных ламп в них вводят дополнительные электроды. Лампу с двумя сетками называют ***тетродом***, с тремя — ***пентодом***. Существуют даже лампы с восьмью электродами — ***октоды***.

6.3.3.4. Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевая трубка служит для получения управляемого узкого потока электронов и представляет собой герметически закрытую стеклянную колбу с широким дном, в которой создан глубокий вакуум. В узкой части трубки расположена электронная пушка (рис. 194), создающая электронный луч.

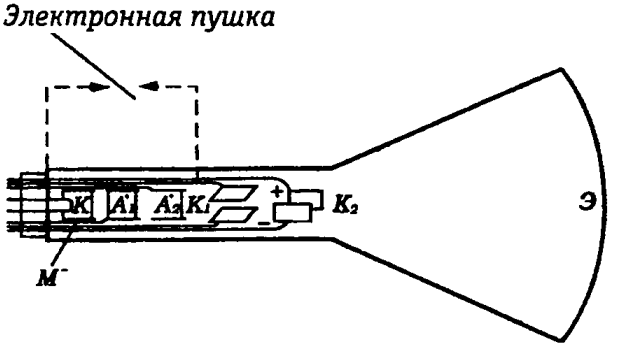


Рис. 194

Электронная пушка состоит из накаливаемого катода K и двух ускоряющих анодов: A_1 и A_2. Вышедший из пушки пучок электронов пропускается на флюоресцирующий эк-

ран Э через два конденсатора: с горизонтально отклоняющими пластинами (расположены вертикально: K_2) и вертикально отклоняющими пластинами (расположены горизонтально: K_1).

Электронно-лучевая трубка применяется для получения изображений на экране телевизоров, осциллографов, радиолокационных установках, мониторах компьютеров и других электронных приборах.

6.3.5. Электрический ток в полупроводниках

6.3.5.1. Сравнение свойств проводников, полупроводников и диэлектриков

Все твердые вещества по своим электрическим свойствам разделяются на следующие группы:

Металлы	*Полупроводники*	*Диэлектрики*
Хорошо проводят электрический ток	Проводят электрический ток при определенных условиях	Не проводят электрический ток ни при каких условиях
Ag, Cu, Ni, Pt, Hg, Fe и др. металлы	Be, Se, ZnO, Cu_2O, Si, Ge, IV группа таблицы Менделеева, соединения IV и V групп таблицы Менделеева	Кварц, слюда, парафин, фарфор, янтарь, сера, масла, каучук, стекло, эбонит, керамика и др.
$\rho = 10^{-5} \div 10^{-8}$ Ом·м	$\rho = 10^{4} \div 10^{-5}$ Ом·м	$\rho = 10^{10} \div 10^{16}$ Ом·м

Здесь ρ — удельное сопротивление.

Условия, при которых у полупроводников резко уменьшается сопротивление и они начинают проводить электрический ток:

- повышение температуры;
- приложение электрического поля (напряжения);
- освещение.

6.3.5.2. Электропроводность полупроводников

При 0 К полупроводники не содержат свободных электронов и поэтому представляют собой диэлектрики. Однако в отличие от диэлектриков у полупроводников при повышении температуры возникает проводимость.

Характерной особенностью полупроводников является двойственная природа носителей заряда в них: ***электронно-дырочная***. При подведении энергии к полупроводнику межатомные связи в решетке теряют электроны, а место, где в решетке не хватает электрона (вакансия), называется ***дыркой***. Если дырки захватывают электроны, то происходит ***рекомбинация***.

При неизменной температуре число электронно-дырочных пар постоянно, так как скорость рекомбинации и скорость образования электронов и дырок одинаковы.

При температурах, близких к абсолютному нулю, все полупроводники становятся диэлектриками, так как энергия теплового движения электронов мала.

При повышении температуры количество подвижных носителей зарядов, одновременно существующих в полупроводнике, увеличивается ⇒ его проводимость увеличивается, а сопротивление чистого полупроводника уменьшается.

Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры имеет вид, представленный на рисунке 195.

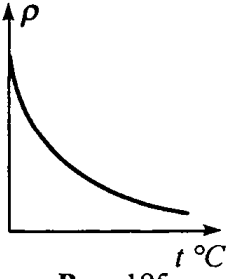


Рис. 195

6.3.5.3. Собственная и примесная проводимость полупроводников

Если в полупроводнике имеется одинаковое число свободных электронов и дырок, такую проводимость называют ***собственной***. Однако собственная проводимость может быть только у чистых полупроводников, а чистые полупроводники в природе практически не встречаются.

С повышением температуры количество электронов чистого полупроводника и участвующего в собственной проводимости растет. Соответственно увеличивается и число дырок. Следовательно, собственная проводимость полупроводников при возрастании температуры увеличивается, а сопротивление — уменьшается.

В большинстве случаев число свободных электронов и дырок в полупроводнике различно, на чем и основана работа полупроводниковых приборов.

Проводимость, созданная введением примеси, называется ***примесной*** проводимостью.

Примесная проводимость бывает двух видов:

- ***электронная*** или ***донорная*** у полупроводников ***n*–типа** (от слова *negative* — отрицательный);
- ***дырочная*** или ***акцепторная*** у полупроводников ***p*–типа** (от слова *pozitive* — положительный).

Донорной проводимостью обладают полупроводники, имеющие примесь, **валентность** вещества которой ***на единицу больше***, чем у атомов основного вещества, поэтому они могут отдавать электрон (доноры). Здесь основными носителями являются электроны, а дырки — неосновными. Проводимость в полупроводнике *n*–типа обусловлена почти исключительно электронами.

Акцепторной проводимостью обладают полупроводники, имеющие примесь, валентность вещества которой ***на единицу меньше,*** чем у атомов основного вещества, поэтому электроны к ним «прилипают» (акцепторы). Здесь

основными носителями являются дырки, а электроны — неосновными. Проводимость в полупроводнике *p*–типа обусловлена почти исключительно дырками.

6.3.5.3. *p–n*-переход

Введение в кристаллическую решетку полупроводников примесей приводит к появлению в них совершенно новых свойств: резкому повышению электропроводности.

Принцип действия многих полупроводниковых приборов основан на работе ***p–n-перехода***.

Если в одном и том же образце полупроводникового материала один участок обладает *p*-проводимостью, а другой — *n*-проводимостью, то в месте контакта образуется ***p–n-переход***.

При комнатной температуре и в *n*-, и в *p*- областях наряду с основными носителями содержится незначительное количество неосновных. При соприкосновении *p*- и *n*-областей начинается диффузия электронов из *n*-области, где их много, в *p*-область, где их мало. Дырки же, наоборот, диффундируют в противоположную сторону: из *p*-области в *n*-область. В результате на границе образуется контактный слой длины *l* (рис. 196, рис. 197, а и 197, б). Если к *p*-области подключить «+» источника тока, а к *n*-области — «–» источника тока, то мы получим прямой ток *p–n*-перехода (рис. 197, г), а если наоборот — обратный ток *p–n*-перехода (рис. 197, в).

В случае прямого тока *p–n*-перехода контактный слой рассасывается, так как направление внешнего электрического поля противоположно контактному, а в случае обратного тока *p–n*-перехода контактный слой расширяется и превра-

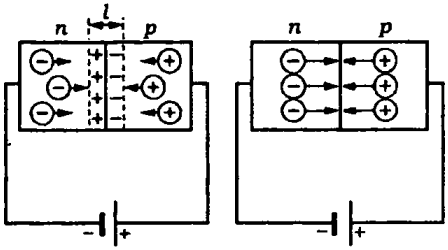
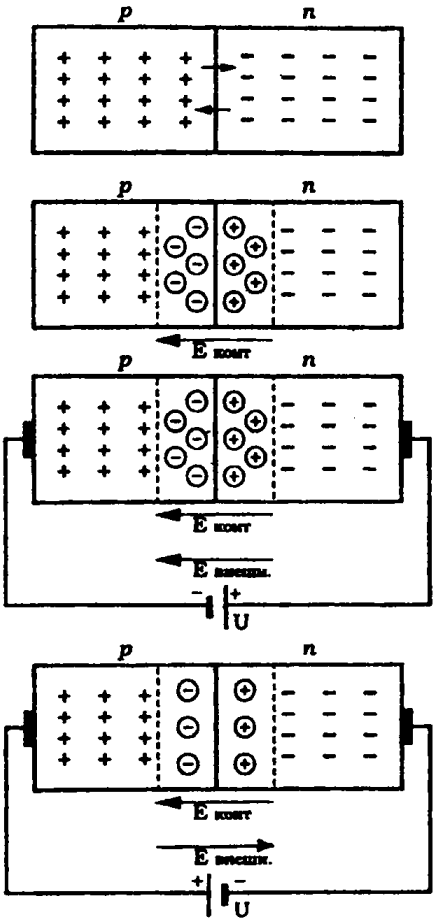


Рис. 196



а) Контакт *p*- и *n*-областей

б) *p*–*n*-переход в равновесии

в) *p*–*n*-переход включен в обратном направлении

г) *p*–*n*-переход включен в прямом направлении

Рис. 197

щается в запорный слой, так как внешнее электрическое поле усиливает контактное, потому что векторы напряженностей в этом случае направлены в одну сторону.

6.3.5.4. Полупроводниковый диод

Полупроводниковый прибор с *p*–*n*-переходом называется ***полупроводниковым диодом***. Он служит для выпрямления переменного тока (рис. 198).

p–n-переход обладает выпрямляющим свойством, пропуская ток только из *p*-области в *n*-область.

На этом основано действие полупроводниковых диодов, которые, пропуская ток в прямом направлении и закрывая диод, т.е. не пропуская ток в обратном, позволяют выпрямлять ток от миллиампер до тысяч ампер.

Необходимо отметить, что полупроводниковый диод нельзя включать в сеть без нагрузочного сопротивления, так как тогда все напряжение окажется приложенным к диоду и при включении диода в прямом направлении, внешнее напряжение превысит контактную разность потенциалов, *p–n*-переход практически исчезнет, через диод потечет очень большой ток и диод выйдет из строя.

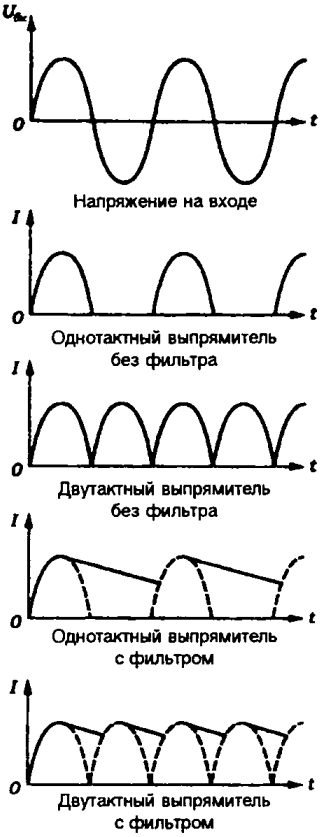


Рис. 198

Полупроводниковые диоды заменяют электронные лампы в радиотехнической аппаратуре, служат выпрямителями.

Основными их достоинствами являются:

- малые размеры;
- высокий ***КПД***;
- большой срок службы.

6.3.5.5. Транзистор

Рассмотренное выше свойства *p–n*-перехода используют в полупроводниковых усилителях электрических сигналов.

Полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления изменения напряжения и тока, называют ***полупроводниковыми триодами*** или ***транзисторами***.

Транзистор представляет собой *p–n–p* или *n–p–n* структуру, или соединения противоположно включенных полупроводниковых диодов. Транзисторы *p –n–p* и *n–p–n* типа равноценны по своим параметрам.

Схема включения транзистора *p–n–p* для усиления колебаний напряжения представлена на рисунке 199. Подаваемые на вход (слева) слабые колебания напряжения повторяются с большей амплитудой на сопротивлении *R*.

Средняя область транзистора называется ***базой***; левая часть, снабжающая базу подвижными носителями зарядов, — ***эмиттером;*** правая, собирающая заряды, — ***коллектором*** и обозначаются соответственно: *б, э, к*.

Переход, включенный в прямом направлении, называют ***эмиттерным***, в обратном — ***коллекторным***.

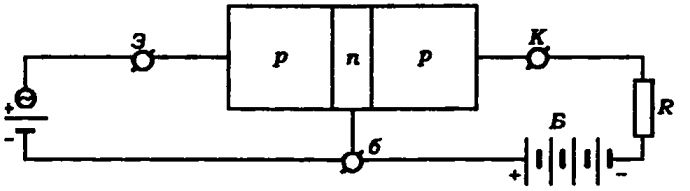


Рис. 199

Указания к решению задач

1. Для нахождения неизвестной величины сопротивления, если в задаче указано, из какого материала изготовлен проводник, или приведены сведения о его геометрических размерах или массе, нужно воспользоваться формулой:

$$R=\rho\frac{l}{S}.$$

2. При решении задач на определение силы тока, напряжения или сопротивления на каком-либо участке цепи надо:

- начертить схему и указать на ней все элементы цепи;
- установить, какие элементы цепи включены последовательно, какие — параллельно;
- для нахождения общего сопротивления цепи начать «свертывать» схему с параллельно соединенных сопротивлений, заменяя их эквивалентными.

3. При замене схем эквивалентными нужно использовать следующие свойства электрической цепи:

- точки с одинаковыми потенциалами можно соединять и разъединять, так как ток между такими точками не идет;
- работа по перемещению единичного заряда от одной точки цепи в другую определяется разностью потенциалов между этими точками.

4. Задачи на тепловое действие тока с использованием ***КПД*** нужно начинать решать с записи ***КПД***, причем, если в задаче дано время, нужно выбирать формулу ***КПД*** через мощность, и определить, какая мощность является затраченной, а какая полезной. Затем применяется закон Джоуля–Ленца, иногда необходимо составить уравнение теплового баланса для нахождения $Q_{пол}$.

5. Решая задачи на изменения размеров электронагревательных проводов, нужно помнить, что они включаются в электрическую цепь с одинаковым напряжением ⇒ выбирать формулы через напряжение, чтобы при сравнении эта величина могла сократиться.

Примеры решения задач

Задача 1.

Определить силу тока, которую показывает амперметр на рисунке 200, если напряжение на зажимах батареи 2,1 В,

а сопротивления соответственно равны: $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_3 = 3$ Ом. Сопротивлением амперметра пренебречь.

Дано:
$U = 2{,}1$ В
$R_1 = 5$ Ом
$R_2 = 6$ Ом
$R_3 = 3$ Ом
$R_A = 0$
$I_A - ?$

Решение:

Сопротивления R_2 и R_3 соединены параллельно $\Rightarrow$

$$\frac{1}{R_{2,3}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2} \Rightarrow R_{2,3} = 2 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление цепи R:
$R = R_1 + R_{2,3} = 7$ Ом.
Из закона Ома:

$$I = \frac{U}{R} = 0{,}3 \text{ А}.$$

Амперметр включен последовательно с $R_3 \Rightarrow$
найдем U_3 :
$U_3 = IR_{2,3} = 0{,}6$ (В) $\Rightarrow$

$$I_A = \frac{U_3}{R_3} = 0{,}2 \text{ (А)}.$$

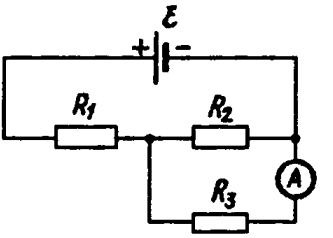


Рис. 200

Ответ: $I_A = 0{,}2$ А.

Задача 2.

Сопротивление R и амперметр соединены последовательно и подключены к источнику тока. К зажимам катушки присоединили вольтметр с внутренним сопротивлением 1000 Ом. Показания амперметра 0,5 А, вольтметра 100 В. Определить сопротивление катушки.

Дано:
$U = 100$ В
$R_V = 1000$ В
$I = 0{,}5$ А
$R - ?$

Решение:

Сила тока в цепи равна сумме сил токов, текущих через вольтметр и через сопротивление R (рис. 201).

$$I = I_1 + I_V,$$

где I_V — сила тока, текущего через вольтметр:

$$I_V = \frac{U}{R_V},$$

I_1 — сила тока, текущего через сопротивление:

$$I_1 = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I_V} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} =$$

$$= \frac{100}{0,5 - 0,1} = 250 \text{ (Ом)}.$$

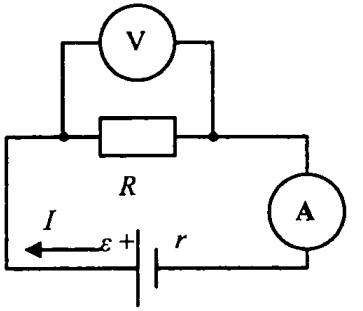


Рис. 201

Ответ: $R = 250$ Ом.

Задача 3.

Что является размерностью в системе СИ выражения $j^2\rho lS$, где j — плотность тока, ρ — удельное сопротивление, l и S — длина и поперечное сечение проводника?

Решение:

$$[j^2\rho lS] = \frac{A^2 \cdot Ом \cdot м \cdot м \cdot м^2}{м^4} = \frac{A^2 \cdot B}{A} = A \cdot B = Вт.$$

Ответ: $[j^2\rho lS]$ = Вт.

Задача 4.

В электрический чайник, сопротивление обмотки которого 16 Ом, налили 0,6 кг воды при 9 °С. Через сколько времени после включения вода в чайнике закипит? Напряжение в сети 220 В, ***КПД*** чайника 60 %.

Дано:	**Решение:**
$m = 0,6$ кг	Запишем выражение для ***КПД***:
$R = 16$ Ом	$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} 100\%$,
$\eta = 60$ %	
$t_1 = 9$ °С	где $P_{пол}$ — полезная мощность,
$t_2 = 100$ °С	а $P_{затр}$ — затраченная.
$U = 220$ В	

$c = 4{,}2 \cdot 10^3 \dfrac{Дж}{кг \cdot К}$

$t - ?$

$$P_{пол} = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t},$$

где Q — количество теплоты, необходимое для нагревания воды в чайнике:

$$Q = cm\Delta T \Rightarrow P_{пол} = \frac{cm\Delta T}{t};\ P_{затр} = \frac{U^2}{R} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} 100\% = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T \cdot R}{t \cdot U^2} 100\% \Rightarrow$$

$$t = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T \cdot R}{U^2 \cdot \eta} 100\%.$$

$$[t] = \frac{Дж \cdot кг \cdot К \cdot Ом \cdot \%}{кг \cdot К \cdot В^2 \cdot \%} = \frac{Дж \cdot В}{В^2 \cdot А} = \frac{А \cdot В \cdot с}{В \cdot А} = с.$$

$\Delta T = \Delta t$ °C = 90 К.

$$t = \frac{4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 0{,}6 \cdot 90 \cdot 16 \cdot 100}{220 \cdot 220 \cdot 60} = 125\ (с).$$

Ответ: $t = 125$ с.

Задача 5.

На каком из изображенных на рисунке 202 сопротивлений будет наименьшее падение напряжения, если $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 2$ Ом?

Решение.

Падение напряжения на участке цепи определяется:

$U = IR \Rightarrow$

U будет иметь минимальное значение, если минимальные значения будут у силы тока I и у сопротивления R.

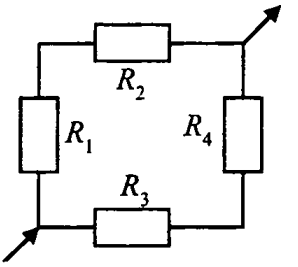


Рис. 202

Определим, на каком участке будет минимальный ток. Для этого заменим сопротивления R_1 и R_2 эквивалентным сопротивлением $R_{1,2}$, а сопротивления R_3 и R_4 — эквивалентным $R_{3,4}$.

Так как они соединены последовательно, то

$R_{1,2} = R_1 + R_2 = 6$ Ом.

$R_{3,4} = R_3 + R_4 = 12$ Ом.

Найдем теперь, по какой ветви пойдет меньший ток:

$$I_1 = \frac{U}{R_{1,2}} = \frac{U}{6}, I_2 = \frac{U}{R_{3,4}} = \frac{U}{12} \Rightarrow$$

$I_2 < I_1 \Rightarrow$ наименьшим сопротивлением на этом участке цепи обладает сопротивление R_3:

$R_3 < R_4 \Rightarrow$ наименьшее падение напряжения будет на сопротивлении R_3.

Ответ: на R_3.

Задача 6.

Определить ток короткого замыкания $I_{к.з.}$ для аккумуляторной батареи, если при токе нагрузки I_1 = 5 А она отдает во внешнюю цепь мощность P_1 = 9,5 Вт, а при нагрузке в 8 А — P_2 = 14,4 Вт.

Дано:	**Решение:**
I_1 = 5А P_1 = 9,5 Вт P_2 = 14,4 Вт	Мощность, выделяемая во внешней цепи, равна разности мощностей, выделяемых во всей цепи и во внутренней ее части:
$I_{к.з}$ – ?	$P = \varepsilon I - I^2 r \Rightarrow$

для двух случаев запишем два уравнения:

$$P_1 = \varepsilon I_1 - I_1^2 r$$

и $P_2 = \varepsilon I_2 - I_2^2 r$.

Так как ток короткого замыкания

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r},$$

разделим почленно правую и левую часть каждого уравнения на r:

$$\frac{p_1}{r} = \frac{\varepsilon}{r} I_1 - I_1^2 \text{ и}$$

$$\frac{p_2}{r} = \frac{\varepsilon}{r} I_2 - I_2^2 .$$

Решая эти два уравнения относительно $\frac{\varepsilon}{r}$, получим:

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{I_2^2 P_1 - I_1^2 P_2}{I_2 P_1 - I_1 P_2} .$$

$$[I_{к.з}] = \frac{A^2 \cdot Вт}{A \cdot Вт} = \text{А}.$$

$$I_{к.з} = \frac{9{,}5 \cdot 64 - 14{,}4 \cdot 25}{9{,}5 \cdot 8 - 14{,}4 \cdot 5} = 62 \text{ (А)}.$$

Ответ: $I_{к.з} = 62$ А

Задача 7.

Электробритва потребляет мощность 15 Вт и рассчитана на напряжение 110 В. При напряжении в сети 120 В последовательно с электробритвой включается лампа накаливания на 110 В. Какова должна быть мощность лампы накаливания, чтобы электробритва работала нормально?

Дано:	**Решение:**
$N = 15$ Вт $U = 110$ В $U_1 = 220$ В	Если напряжение в сети $U_1 = 220$ В, то для того чтобы электробритва работала нормально, необходимо, чтобы на лампе было падение напряжения:
P_1 – ?	$U_2 = U - U_1$. Так как $N = IU \Rightarrow$

$$I = \frac{N}{U} \Rightarrow N_1 = IU_2 = (U - U_1)\frac{N}{U} =$$

$$= (220 - 110)\frac{15}{110} = 15 \text{ (Вт)}.$$

$$[N_1] = B\frac{Вт}{B} = Вт.$$

Ответ: $N_1 = 15$ Вт.

Задача 8.

Если в цепи, состоящей из источника тока с *ЭДС* ε и внутренним сопротивлением r и внешнего сопротивления R, внутреннее и внешнее сопротивление увеличить в 2 раза, то падение напряжения на внешнем сопротивлении

1) увеличится в 4 раза;
2) увеличится в 2 раза;
3) не изменится;
4) уменьшится в 2 раза;
5) уменьшится в 4 раза.

Дано:	**Решение:**
ε $R_2 = 2R$ $r_2 = 2r$	Падение напряжения на внешнем сопротивлении в первом случае: $U_1 = I_1R$, Во втором случае: $U_2 = I_2R_2$.
$\frac{U_2}{U_1}$ – ?	Силу тока найдем из закона Ома для замкнутого контура:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R+r} \Rightarrow U_1 = R\frac{\varepsilon}{R+r},$$

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{2R+2r} = \frac{\varepsilon}{2(R+r)} \Rightarrow$$

$$U_2 = 2R\frac{\varepsilon}{2(R+r)} = R\frac{\varepsilon}{R+r} = U_1 \Rightarrow U_2 = U_1.$$

Проанализировав варианты ответа, приходим к выводу, что правильным будет ответ № 3.

Ответ: № 3.

Задача 9.

Три резистора, имеющие сопротивления R_1 = 3 Ом, R_2 = 6 Ом, R_3 = 9 Ом, включены последовательно в цепь постоянного тока. Чему равно отношение количества теплоты, выделившейся на этих резисторах за одинаковое время?

1) 1 : 1 : 1; 2) 1 : 2 : 3; 3) 3 : 2 : 1;
4) 1 : 4 : 9; 5) 9 : 4 : 1.

Дано:	**Решение:**
$R_1 = 3$ Ом $R_2 = 6$ Ом $R_3 = 9$ Ом	При последовательном соединении сила тока во всех резисторах одинакова ⇒ закон Джоуля–Ленца нужно применять в виде:
$Q_1 : Q_2 : Q_3 - ?$	

$$Q = I^2Rt \Rightarrow$$

$$Q_1 = 3I^2t,\ Q_2 = 6I^2t,\ Q_3 = 9I^2t \Rightarrow Q_1 : Q_2 : Q_3 = 1 : 2 : 3.$$

Проанализировав варианты ответа, выбираем ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 10.

Электрохимический эквивалент меди $3{,}3 \cdot 10^{-7}\ \frac{кг}{Кл}$. Сколько меди в граммах выделится на электроде при непрерывной работе электролитической ванны в течение 1 ч 40 мин с постоянным током 100 А?

Дано:	**СИ**	**Решение:**
t = 1 ч 40 мин	= 6000 с	Согласно первому закону Фарадея для электролиза:
$K = 3{,}3 \cdot 10^{-7}\ \frac{кг}{Кл}$		$m = KIt = 3{,}3 \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 6000 =$
I = 100 А		$= 0{,}198$ (кг) = 198 (г).
m – ?		**Ответ:** 198 г.

Задача 11.

К источнику тока с *ЭДС* $\varepsilon = 8$ В и внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом подсоединили лампочку сопротивлением $R = 8$ Ом. В источнике выделяется количество теплоты, равное $Q = 2{,}4$ Дж, за время:

1) 0,5 мин; 2) 1 мин; 3) 2 мин; 4) 4 мин; 5) 5 мин.

Дано:
$\varepsilon = 8$ В
$r = 2$ Ом
$R = 8$ Ом
$Q_{ист} = 2{,}4$ Дж
$t - ?$

Решение:

По закону Ома для замкнутого контура определим силу тока в цепи (рис. 203):

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{8}{78+2} = 0{,}1 \text{ (А)}.$$

По закону Джоуля – Ленца

$$Q_{ист} = I^2 rt \Rightarrow$$

$$t = \frac{Q_{ист}}{I^2 r}.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[\,t\,] = \frac{Дж}{A^2 \cdot Ом} = \frac{A \cdot B \cdot c \cdot A}{A^2 \cdot B} = \text{с}.$$

$$t = \frac{2{,}4}{0{,}01 \cdot 2 \cdot 60} = 2 \text{ (мин)}.$$

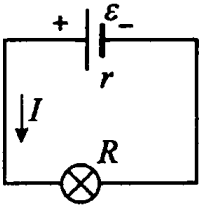


Рис. 203

Проанализировав варианты ответов, выбираем правильный ответ № 3.

Ответ: № 3.

Задача 12.

Три резистора R_1, R_2, R_3 с одинаковыми сопротивлениями подключены, как показано на рисунке 204, к источнику с *ЭДС* $\varepsilon = 27$ В и нулевым сопротивлением. Если сила тока, протекающего через резистор R_1, равна 1,5 А, то сопротивление резистора R_1 равно:

1) 4 Ом; 2) 5 Ом; 3) 9 Ом; 4) 10 Ом; 5) 12 Ом.

Дано:
$R_1 = R_2 = R_3$
$\varepsilon = 27$ В
$r = 0$ Ом
$I = 1{,}5$ А
R_1 – ?

Решение:

Начинаем сворачивать схему с параллельных сопротивлений. Поскольку $R_2 = R_3 \Rightarrow$

$$R_{2,3} = \frac{R_1}{2} \Rightarrow R_{общ} = R_1 + \frac{R_1}{2} = \frac{3R_1}{2}.$$

По закону Ома для замкнутого контура (рис. 203):

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{общ}} = \frac{2\varepsilon}{3R_1} \Rightarrow$$

$$R_1 = \frac{2\varepsilon}{3I_1} = \frac{2\cdot 27}{3\cdot 1{,}5} = 12 \text{ (Ом)}.$$

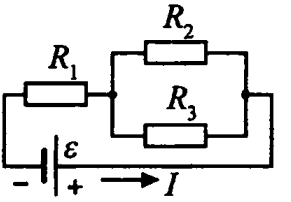


Рис. 204

Проанализировав варианты ответов, выбираем правильный ответ № 5.

Ответ: № 5.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 9.

Задача 1.

Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника площадью 4 мм^2 за 2 минуты, если плотность тока в проводнике равна 100 $\frac{A}{см^2}$?

Ответ: $5\cdot 10^{21}$.

Задача 2.

Амперметр, накоротко присоединенный к гальваническому элементу с *ЭДС* 1,6 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом, показывает ток 4 А. Каково будет показание амперметра, если его зашунтировать сопротивлением 0,1 Ом?

Ответ: 2 А.

Задача 3.

Электрический чайник имеет две обмотки. При подключении одной из них к источнику тока (сети) вода в чайнике закипает через 120 с, при включении другой — через 240 с. Через сколько секунд закипит вода в чайнике, если обмотки соединить параллельно?

Ответ: 80 с.

Задача 4.

При подключении к полюсам источника *ЭДС* внешнего резистора с сопротивлением R_1 = 200 Ом в цепи идет ток силой I = 0,3 А, а при подключении внешнего резистора с сопротивлением R_2 = 95 Ом ток увеличивается в 2 раза. Чему равна *ЭДС* источника?

Ответ: 63 В.

Задача 5.

Две электрические лампочки включены в сеть параллельно. Сопротивление первой лампочки равно 360 Ом, сопротивление второй — 240 Ом. Какая из лампочек поглощает большую мощность?

Ответ: вторая, в 1,5 раза.

Задача 6.

В электрический чайник налили 0,16 л воды при температуре 30 ^{0}С и включили нагреватель. Через какое время после включения выкипит вся вода, если мощность нагревателя 1 кВт, *КПД* нагревателя 0,8? Удельная теплоемкость воды 4200 $\frac{Дж}{кг \cdot К}$. Удельная теплота парообразования воды 2256 $\frac{кДж}{кг}$.

Ответ: 510 с.

Задача 7.

Определить силу тока в обмотке трамвайного двигателя, развивающего силу тяги 5000 Н, если напряжение в сети 550 В и трамвай движется со скоростью 30 $\frac{км}{ч}$. Коэффициент полезного действия двигателя 80%.

Ответ: 93 А.

Задача 8.

Как изменится мощность электронагревательного прибора при уменьшении длины нагревательной спирали вдвое и уменьшении напряжения в цепи вдвое?

Ответ: уменьшится в два раза.

Задача 9.

Определить силу тока в обмотке двигателя электропоезда, развивающего силу тяги 6 кН, если напряжение, подводимое к двигателю, равно 600 В и поезд движется со скоростью 72 $\frac{км}{ч}$. Коэффициент полезного действия двигателя 80%.

Ответ: 250 А.

Задача 10.

При одном положении ручки реостата ток в цепи равен 2 А, а напряжение на концах цепи 8 В, а при другом положении — соответственно 4 А и 6 В. Вычислить внутреннее сопротивление и *ЭДС* источника тока.

Ответ: 1 Ом, 10 В.

Задача 11.

Вольтметр с пределом измерения напряжения $U_{пред}$ = = 20 В имеет внутреннее сопротивление R_V. При подключении последовательно с вольтметром резистора с сопротивлением R = 237 МОм предел измерения напряжения

этим вольтметром увеличился в 80 раз. Чему равно внутреннее сопротивление вольтметра R_V?

Ответ: 3 МОм.

Задача 12.

Два резистора с сопротивлением $R_1 = 6$ Ом и $R_2 = 18$ Ом соединены параллельно друг с другом, подключены к источнику *ЭДС с* $\varepsilon = 9$ В и внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом. Какая выделяется мощность на внутреннем сопротивлении источника *ЭДС*?

Ответ: 3,8 Вт.

Тест № 9

Задача 1.

На концах цилиндрического серебряного проводника поддерживается постоянная разность потенциалов 7 В (удельное сопротивление серебра $\rho_c = 1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). По проводнику течет ток силой 1,25 А. Если радиус проводника равен 0,11 мм, то его длина равна:

1) 7,6 м; 2) 13,3 м; 3) 16,2 м; 4) 22 м; 5) 36 м.

Задача 2.

Если увеличить вдвое поперечное сечение проводника, не меняя его длину и приложенную к нему разность потенциалов, то плотность тока в проводнике

1) увеличится в 4 раза; 2) увеличится в 2 раза;
3) не изменится; 4) уменьшится в 2 раза;
5) уменьшится в 4 раза.

Задача 3.

Какую из схем рисунка 205 — I или II — следует использовать при исследовании зависимости обратного

тока диода от напряжения? Амперметр и вольтметр не идеальны.

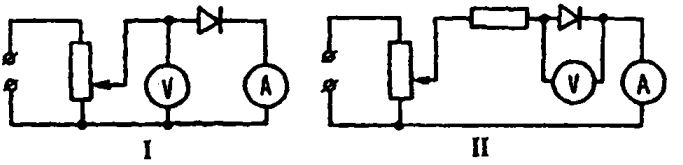


Рис. 205

1) I;
2) II;
3) можно использовать обе схемы;
4) ни одну из схем использовать нельзя.

Задача 4.

Электрическая цепь составлена из четырёх кусков провода одной и той же длины, сделанных из одинакового материала, соединённых последовательно. Сечение всех четырёх кусков различно (1 мм^2, 2 мм^2, 3 мм^2, 4 мм^2). Разность потенциалов на концах цепи равна 100 В. Определить напряжение на каждом куске.

1) U_1 = 48 В; U_2 = 24 В; U_3= 16 В; U_4 = 12 В;
2) U_1 = 12 В; U_2 = 16 В; U_3= 24 В; U_4 = 48 В;
3) $U_1 = U_2 = U_3 = U_4$ = 25 В;
4) необходимо знать удельное сопротивление;
5) нет правильного ответа.

Задача 5.

Если в изображённой на рисунке 206 цепи одна из лампочек перегорела, то показание амперметра:

1) не изменится;
2) уменьшится;
3) увеличится;
4) зависит от внутреннего сопротивления источника тока;
5) зависит от мощности лампочек.

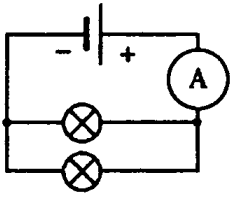


Рис. 206

Задача 6.

Подъёмный кран равномерно поднимает груз массой m на высоту h за время t. Определить силу тока, потребляемого краном, если подаваемое напряжение U и *КПД* крана η.

1) $\frac{mgh\eta}{tU}$; 2) $\frac{mght}{\eta U}$; 3) $\frac{t\eta U}{mgh}$; 4) $\frac{mgh}{tU\eta}$; 5) $\frac{tU}{mgh\eta}$.

Задача 7.

Если участок цепи состоит из двух параллельно соединенных проводников одинакового сечения, но разной длины (l_1 и l_2 соответственно) и разного материала (ρ_1 и ρ_2) и на проводнике выделяется при пропускании тока одинаковая мощность, то справедливо соотношение:

1) $\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{l_2}{l_1}$; 2) $\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{l_1}{l_2}$; 3) $\frac{\rho_1}{\rho_2}=\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2$;

4) $\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2=\frac{l_2}{l_1}$; 5) $\frac{\rho_1}{\rho_2}=\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2$.

Задача 8.

Если в цепи, состоящей из трех одинаковых проводников, соединенных параллельно и включенных в сеть, за 1 минуту выделилось некоторое количество теплоты, то такое же количество теплоты выделилось в цепи, состоящей из последовательно соединенных этих проводников за:

1) 9 мин; 2) 3 мин; 3) 20 с; 4) 4,5 мин; 5) 30 с.

Задача 9.

Физической величиной, размерность которой определяется как $\frac{Дж}{A^2 \cdot c}$, является:

1) напряжение; 2) ЭДС источника тока;
3) сопротивление; 4) проводимость;
5) удельное сопротивление.

Задача 10.

К полюсам батареи из двух источников, каждый с ЭДС 75 В и внутренним сопротивлением 4 Ом, подведены две параллельные медные шины сопротивлением 10 Ом каждая. К концам шин и к их серединам подключены две лампочки сопротивлением 20 Ом каждая (рис. 207). Если пренебречь сопротивлением подводящих проводов, то ток во второй лампочке равен:

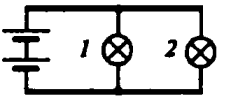


Рис. 207

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

Задача 11.

Три резистора, имеющие сопротивлением R_1 = 3 Ом, R_2 = 8 Ом, R_3 = 5 Ом, подключены к источнику *ЭДС с* ε = 16 В, как показано на рисунке 208. Если внутреннее сопротивление источника *ЭДС* равно нулю, то чему равно показание амперметра?

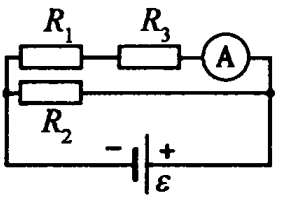


Рис. 208

1) 1 А; 2) 1,5 А; 3) 2 А; 4) 3 А; 5) 4 А.

Задача 12.

В электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 209, $R_1 = R_2$ = 1 Ом, $R_3 = R_4 = R_5$ = 2 Ом, R_6 = 2,8 Ом, U = 36 В. Чему равно показание амперметра?

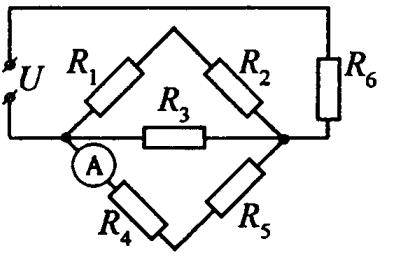


Рис. 209

1) 0,5 А; 2) 1,0 А;

3) 1,5 А; 4) 2,0 А;

5) 2,5 А.

ГЛАВА 7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Программа по физике содержит следующие вопросы по данному разделу:

Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера. Магнитные силовые линии. Правило «буравчика» для прямолинейного и кругового тока. Правило «левой руки».

Магнитное взаимодействие токов. Формула Ампера. Определение Ампера. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Взаимодействие магнитов.

Магнитные свойства вещества. Магнитная проницаемость. Ферромагнетизм.

Электромагнитная индукция. Магнитный поток. Магнитный момент. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Закон Ленца. Правило «правой руки». Электродвигатель.

Явление электромагнитной индукции. Индуктивность. Вихревое электрическое поле. Самоиндукция. Энергия магнитного поля. Плотность энергии.

Измерение силы тока, напряжения, сопротивления проводника.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

7.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Покоящиеся заряды взаимодействуют посредством электрического поля. Это взаимодействие сохраняется и при движении зарядов и осуществляется магнитным полем.

Магнитное поле — особая форма материи, создаваемая вокруг:

- проводников с током;
- движущихся заряженных частиц;
- постоянных магнитов.

Магнитное поле материально, так как:

- существует независимо от нашего сознания;
- обладает энергией, т.е. может действовать на другие проводники с током, движущиеся заряженные частицы и постоянные магниты (чем создается, на то и действует).

7.1.1. Закон Ампера

Сила Ампера, с которой магнитное поле действует на проводники с током I, длиной l, помещенный в магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, определяется из ***закона Ампера***:

$$F_A = BIl\sin\alpha,$$

где $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции,

α — угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и элементом длины проводника $\Delta\vec{l}$ в направлении тока.

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ — силовая характеристика магнитного поля, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на проводник с током 1 А, длиной 1 м, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям:

$$B = \frac{F_A}{Il\sin\alpha},\ [B] = \frac{Н}{Ам} = Тл = Тесла.$$

Направление силы Ампера определяется по ***правилу «левой руки»*** (рис. 210):

- магнитные силовые линии входят в ладонь;

- 4 пальца указывают направление силы тока в проводнике;
- отогнутый большой палец укажет направление силы Ампера.

7.1.2. Сила Лоренца

На электрический заряд, движущийся в магнитном поле, действует ***сила Лоренца***, модуль которой равен:

$$F_Л = qB\upsilon \sin\alpha,$$

где q — абсолютное значение движущегося заряда,

υ — скорость движения заряда,

B — модуль вектора магнитной индукции.

Направление силы Лоренца определяется по правилу «левой руки» ***для положительных зарядов*** (рис. 211); ***для отрицательных зарядов — зеркальное отображение.***

Сила Лоренца ***всегда*** перпендикулярна плоскости, в которой находятся векторы $\vec{\upsilon}$ и $\vec{B}$ ⇒

сила Лоренца работы не совершает, т.е. не может изменить кинетической энергии свободных зарядов ⇒

сила Лоренца является центростремительной силой ⇒

$$\upsilon = \frac{qBR}{m},$$

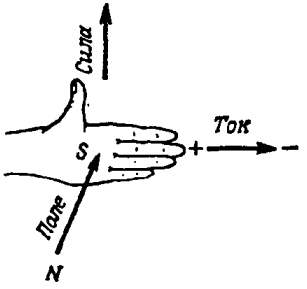


Рис. 210

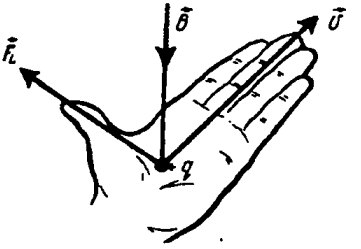


Рис. 211

период $T = \dfrac{2\pi m}{qB}$ ***— не зависит от скорости.***

Если направление скорости $\vec{v}$ составляет с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ угол α, отличный от 90°, то заряд будет двигаться по ***винтовой линии***.

7.1.3. Напряженность магнитного поля

Кроме основной характеристики магнитного поля $\vec{B}$ существует еще одна характеристика: ***напряженность магнитного поля***:

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}. \quad [H] = \frac{H}{A},$$

где μ — ***относительная магнитная проницаемость среды***, показывающая, как изменяется магнитное поле в среде по сравнению с вакуумом:

$$\vec{B} = \mu\vec{B}_0,$$

где $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции в однородной изотропной среде;

$\vec{B}_0$ — вектор магнитной индукции в вакууме;

μ_0 — ***магнитная постоянная***:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{H}{A^2} = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{Гн}{м}. \Rightarrow$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}.$$

Относительная магнитная проницаемость μ большинства веществ (парамагнетиков и диамагнетиков) может быть больше или меньше 1, но очень мало отличается от 1. И только у ферромагнетиков (железо, сталь, никель и др.), благодаря их особой внутренней структуре, она может достигать больших значений.

Напряженность магнитного поля вокруг прямолинейного проводника с током:

$$H = \frac{I}{2\pi r},$$

где r — расстояние от проводника до точки, в которой это поле определяется.

7.1.4. Магнитные силовые линии

Магнитное поле, как и электрическое, можно изображать с помощью ***магнитных силовых линий***, или ***линий магнитной индукции***, которые строятся так же, как и линии напряженности электрического поля: касательная к линии поля в каждой точке совпадает с направлением вектора $\vec{B}$, а густота линий пропорциональна вектору $\vec{B}$ в данном месте поля.

Но в отличие от линий напряженности электрического поля, магнитные силовые линии не имеют начала и конца: они ***всегда замкнуты*** (рис. 212) и направление их совпадает с направлением северного конца маленькой магнитной стрелки.

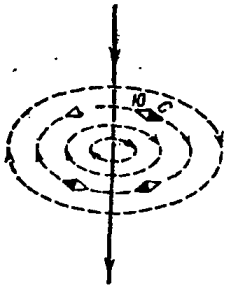


Рис. 212

Направление магнитных силовых линий **определяется** ***по правилу «буравчика»***:

1) для прямолинейного тока (рис. 213):

- направление движения буравчика — по току;
- направление вращения рукоятки буравчика указывает направление магнитных силовых линий;

2) для кругового тока (рис. 214):

- вращение рукоятки буравчика по направлению тока;
- направление движения буравчика указывает направление магнитных силовых линий.

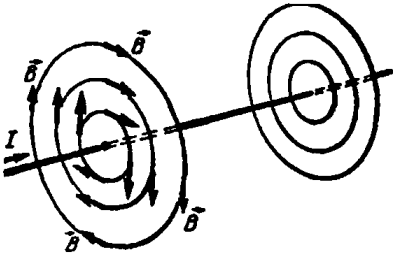


Рис. 213

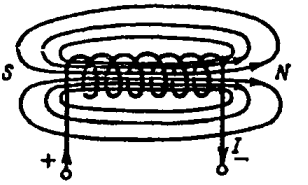


Рис. 214

Однородное магнитное поле — это поле, численное значение и направление вектора магнитной индукции которого одинаковы в любой точке поля (пример — поле внутри соленоида).

В случае ***постоянного магнита*** магнитные силовые линии выходят из северного полюса и входят в южный, а внутри магнита — наоборот: из южного в северный (рис. 215). Поэтому магнитное поле катушки с током (соленоида) подобно полю постоянного магнита, что иллюстрирует рисунок 215.

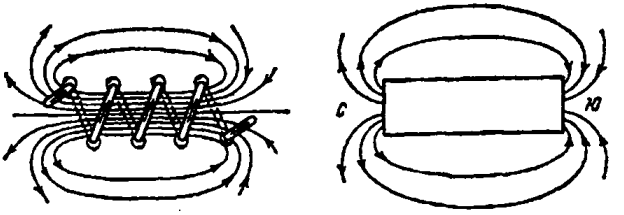


Рис. 215

7.1.5. Магнитный и вращающий моменты

Магнитный момент замкнутого плоского контура, по которому протекает ток силой I (рис. 216):

$$\vec{P}_M = IS\vec{n}_0,$$

где S — площадь поверхности, охватываемой контуром;

n_0 — единичный вектор нормали (вектор с модулем, равным 1 и направленным перпендикулярно плоскости контура).

На рисунке 216 указано направление вектора скорости $\vec{v}$ и направление тока I, текущего по орбите.

Момент сил, или ***вращающий момент***, действует на плоский замкнутый контур с током, помещенный в однородное поле, и его модуль определяется по формуле:

$$M_{вр} = P_M B\sin\alpha = BIS\sin\alpha,$$

где α — угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и вектором $\vec{P}_M$.

Модуль вектора магнитной индукции в данной точке однородного магнитного поля равен наибольшему значению момента сил $M_{мах}$, действующего на малую рамку с током, имеющую единичный по модулю магнитный момент P_m, помещенную в окрестности данной точки:

$$B = \frac{M_{мах}}{P_м}.$$

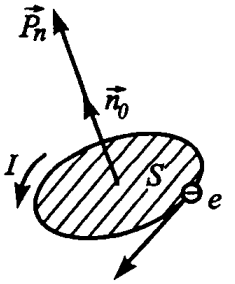


Рис. 216

7.1.6. Взаимодействие токов

Сила взаимодействия параллельных токов определяется по ***формуле Ампера*** (рис. 217):

$$F_A = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a},$$

где l — длина участка проводника,

I_1 и I_2 — силы тока в параллельных бесконечно длинных проводниках, расположенных на расстоянии a друг от друга;

μ — относительная магнитная проницаемость среды;

μ_0 — магнитная постоянная:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{Н}{А^2} = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{Гн}{м}.$$

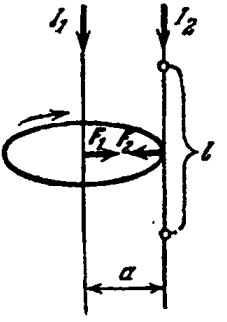


Рис. 217

Если токи текут в одном направлении, то проводники притянутся друг к другу (рис. 218, *а*).

Если же токи направлены в противоположные стороны (рис. 218, *б*), то проводники оттолкнутся один от другого.

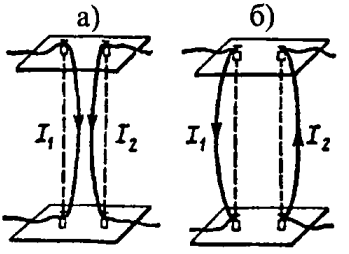


Рис. 218

На рисунках 219 и 220 представлены поперечные сечения

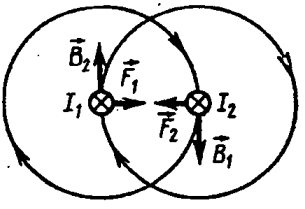


Рис. 219

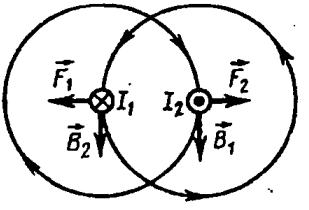


Рис. 220

параллельных токов I_1 и I_2, направленных перпендикулярно плоскости чертежа, и их магнитных полей с применением правила левой руки и указанием сил, действующих на проводники.

Из ***формулы Ампера*** вытекает определение единицы силы тока — ***ампера***, являющейся одной из основных единиц в системе СИ:

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длины 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

7.1.7. Магнитный поток

Поток магнитной индукции сквозь замкнутый контур:

$\Phi = BS\cos\alpha$,

где S — площадь поперечного сечения контура,

α — угол между вектором магнитной индукции и вектором нормали к площади (рис. 221).

$$[\Phi] = Тл \cdot м^2 = \frac{Н \cdot м^2}{А \cdot м} = \frac{Дж}{А} =$$

$$= \frac{А \cdot В \cdot с}{А} = В \cdot с = Вб.$$

Физический смысл магнитного потока — он численно равен числу магнитных силовых линий, пронизывающих замкнутый контур.

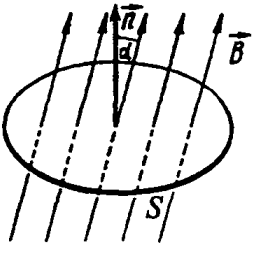


Рис. 221

7.1.8. Магнитное поле соленоида

Индукция магнитного поля в точках оси достаточно длинного соленоида с числом витков N и длиной l:

$$B = \mu\mu_0 nI,$$

где $n = \dfrac{N}{l}$ — число витков на единицу длины соленоида.

7.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Вокруг любого проводника с током существует магнитное поле. С другой стороны, если перемещать проводник в магнитном поле, то в проводнике возникает ***индукционный ток***. Таким образом, электрическое и магнитное поля взаимосвязаны.

7.2.1. Электромагнитные явления

Закон электромагнитной индукции Фарадея: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в последнем возникает *ЭДС* индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока сквозь поверхность, охватываемую контуром за время Δt.

Знак минус говорит о действии закона Ленца.

Закона Ленца: индукционный ток всегда имеет такое направление, что его магнитное поле препятствует изменению основного магнитного поля, его создавшего.

ЭДС индукции может возникнуть и в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле со скоростью υ:

$$\varepsilon_i = Bl\upsilon\sin\alpha,$$

где α — угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и скоростью движения проводника $\vec{v}$ (рис. 222).

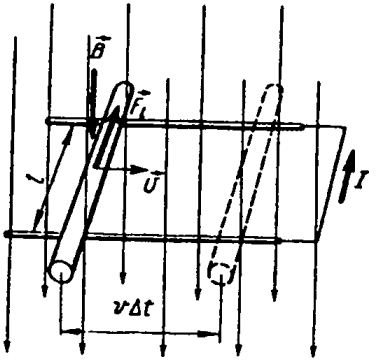


Рис. 222

Максимальная ЭДС индукции, возникающая при вращении рамки в магнитном поле:

$$\varepsilon_{i\max} = BS\omega,$$

где ω — циклическая частота.

Направление индукционного тока определяется по ***правилу «правой руки»*** (рис. 223):

- магнитные силовые линии входят в ладонь;
- отогнутый большой палец располагается по направлению движения проводника;
- вытянутые 4 пальца укажут направление индукционного тока или *ЭДС* индукции в незамкнутом проводнике.

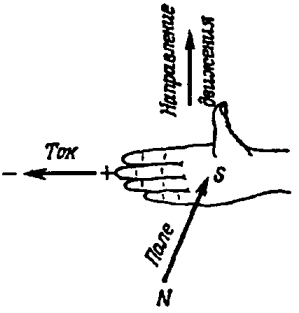


Рис. 223

7.2.2. Явление самоиндукции. Индуктивность

ЭДС самоиндукции возникает в проводнике, по которому проходит изменяющийся ток, вызывающий вокруг себя изменяющееся магнитное поле, что и приводит к возникновению *ЭДС* индукции в самом проводнике.

ЭДС самоиндукции — *ЭДС*, возникающая при изменении силы тока ΔI за время Δt в самом контуре:

$$\varepsilon_C = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый ***индуктивностью катушки (контура)***.

$$[L] = Гн = \frac{В \cdot с}{А}.$$

Индуктивность является аналогом электроемкости в электричестве. Индуктивность зависит от:

- формы проводника (у катушки она больше, чем у прямого проводника);
- размеров проводника (она тем больше, чем больше число витков в катушке);
- магнитной проницаемости среды μ (индуктивность катушки значительно возрастает, если внутри ее имеется сердечник из ферромагнетика).

Индуктивность соленоида:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 V,$$

где $n = \frac{N}{l}$ число витков на единицу длины;

$V = Sl$ — объем соленоида;

S — площадь сечения витка.

7.2.3. Работа и энергия магнитного поля

Работа перемещения проводника с током в магнитном поле:

$$A = I\Delta\Phi,$$

где $\Delta\Phi$ — поток магнитной индукции, пересеченной проводником при его движении.

Энергия магнитного поля контура с током, который пронизывает магнитный поток $\Delta\Phi$:

$$W_M = \frac{I\Delta\Phi}{2} = \frac{LI^2}{2}.$$

В длинном соленоиде энергия сосредоточена главным образом в объеме V соленоида и равна:

$$W = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n^2 I^2 V.$$

Объемной плотностью энергии ϖ магнитного поля называется энергия, заключенная в единице объема:

$$\varpi = \frac{\Delta W}{\Delta V}. \quad [\varpi] = \frac{Дж}{м^3}.$$

Указания к решению задач

1. Задачи по электромагнетизму на расчет значений магнитной индукции B при заданном распределении токов, создающих магнитное поле, решают с помощью ***принципа суперпозиции полей*** (рис. 224): если магнитное поле создано несколькими проводниками с токами, то вектор $\vec{B}$ в какой-либо точке этого поля равен векторной сумме магнитных индукций, созданных в этой точке каждым током в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i,$$

где n — число проводников с током.

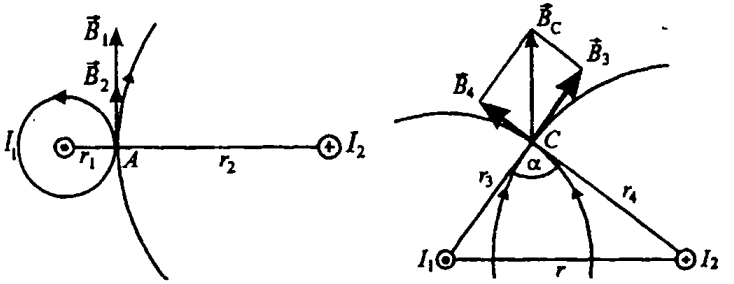


Рис. 224

2. Чтобы не путать, правило какой руки используется, нужно помнить, что «правило левой руки» применяется в магнетизме, когда ***магнитное поле действует*** на проводник с током или движущиеся заряженные частицы, а «правило правой руки» — в электромагнетизме, когда ***магнитное поле создает ток*** в движущемся или вращающемся проводнике (или сам ток меняется).

3. Для определения *ЭДС* индукции пользуются законом Фарадея для электромагнитной индукции. В явлениях электромагнитной индукции магнитный поток сквозь контур может меняться как ***при движении контура или отдельных его участков***, так и ***при изменении*** во времени ***магнитного поля***.

4. Нужно помнить, что при расчетах *ЭДС* индукции берется ее модуль, а знак минус указывает на действие закона Ленца.

5. Если в задаче требуется найти разность потенциалов на концах проводника, движущегося в магнитном поле, то искомая разность потенциалов численно равна *ЭДС*, индуцируемой в проводнике.

6. В магнетизме особое внимание обратить на знаки получаемых величин.

7. Задачи на движение классических заряженных частиц ($v << c$) в электрическом и магнитном полях по существу решаются методами, рассмотренными в механике. Различие лишь в природе сил, действующих на частицу. Для решения задачи, как правило, необходимо написать основное уравнение.

8. Обязательно проводить проверку по размерности, т.к. вопросам преобразования размерностей в тестовых заданиях уделяется большое внимание.

9. Научиться читать обозначения на чертежах:

- $\otimes$ $\oplus$ — ток (вектор магнитной индукции, вектор нормали) направлен за плоскость листа (оперение стрелы);

- ⊙ — ток (вектор магнитной индукции, вектор нормали) направлен к нам (острие стрелы);
- + + + — магнитное поле направлено за плоскость листа (оперение стрелы);
  + + +
- · · · · · — магнитное поле направлено к нам (острие стрелы);
  · · · · ·
- магнитные силовые линии выходят из северного полюса и входят в южный.

10. Если смотреть по направлению тока, то магнитные силовые линии будут направлены по часовой стрелке, что иллюстрирует рисунок 225, а, а если смотреть навстречу току, то — против часовой стрелки (рис. 225, б).

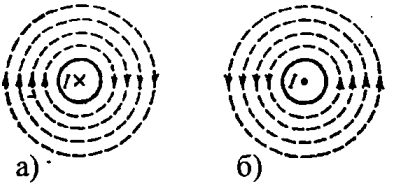


Рис. 225

Примеры решения задач

Задача 1.

В вертикальном магнитном поле с индукцией B вращается в горизонтальной плоскости стержень длиной l с постоянной угловой скоростью ω. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить возникающую в стержне *ЭДС* индукции.

Дано:	**Решение:**
B	Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея:
ω	
l	
$\varepsilon - ?$	$\varepsilon_i = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$,

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока сквозь поверхность, охватываемую контуром за время Δt (рис. 226).

Индукция магнитного поля B в данном случае не меняется $\Rightarrow$

$\Delta\Phi = B\Delta S\cos\alpha$,

где ΔS — площадь, описанная стержнем за время Δt;

α — угол между нормалью к площади и вектором $\vec{B}$, $\alpha = 0^\circ \Rightarrow \cos\alpha = 1$.

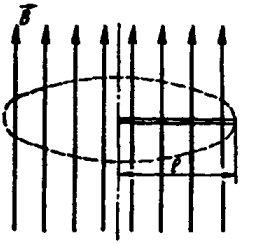


Рис. 226

Стержень сделает полный оборот за время, равное периоду T:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \Delta t = T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

При этом описанная стержнем площадь будет равна площади круга диаметром l:

$\Delta S = S_{кр} = \pi l^2. \Rightarrow$

$$\varepsilon_i = -\frac{B\pi l^2\omega}{2\pi} = -\frac{Bl^2\omega}{2}.$$

Ответ: $-\dfrac{B\omega l^2}{2}$.

Задача 2.

Альфа-частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов U, влетает в однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, перпендикулярной к ее скорости. Найти радиус окружности, по которой будет двигаться частица и период обращения частицы.

Дано:	**Решение:**
U q B $\alpha = 90^\circ$ m $T - ?$ $r - ?$	При прохождении ускоряющей разности потенциалов U работа сил электрического поля идет на сообщение α-частице кинетической энергии: $\dfrac{m\upsilon^2}{2} = qU$.

При движении заряженной частицы в магнитном поле на нее действует сила Лоренца:

$F_Л = qB\upsilon\sin\alpha.$

Так как $\vec{\upsilon} \perp \vec{B}$, то частица будет двигаться по окружности (рис. 227) и сила Лоренца будет сообщать ей центростремительное ускорение:

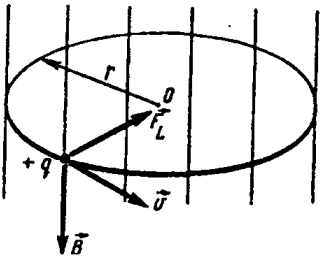


Рис. 227

$$F_Л = ma_ц = \frac{m\upsilon^2}{r}.$$

С другой стороны:

$$F_Л = qB\upsilon\sin\alpha \Rightarrow qB\upsilon = \frac{m\upsilon^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m\upsilon}{qB}.$$

Найдем скорость из первого равенства:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2qU}{m}} \Rightarrow r = \frac{m}{qB}\cdot\sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{1}{B}\cdot\sqrt{\frac{2mU}{q}}.$$

Период найдем из: $\upsilon = \frac{2\pi r}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi r}{\upsilon} = \frac{2\pi m\upsilon}{\upsilon qB} = \frac{2\pi m}{qB}.$

Ответ: $r = \frac{1}{B}\cdot\sqrt{\frac{2mU}{q}}$; $T = \frac{2\pi m}{qB}$.

Задача 3.

Какова индукция магнитного поля, в котором на проводник с длиной активной части 5 см действует сила 50 мН? Сила тока в проводнике 25 А. Проводник расположен перпендикулярно индукции магнитного поля (рис. 228).

Дано:	**СИ**	**Решение:**
$l = 5$ см	$= 5\cdot10^{-2}$ кг	Значение индукции магнитного поля можно найти из закона Ампера:
$I = 25$ А	$= 5\cdot10^{-2}$ м^2	$F_A = BIl\sin\alpha \Rightarrow$
$F_A = 50$ мН		
$\alpha = 90°$		
$B - ?$		

$$B = \frac{F_A}{Il} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{25 \cdot 5 \cdot 10^{-2}} =$$
$$= 4 \cdot 10^{-2} \text{ (Тл)} = 40 \text{ (мТл)}.$$

Ответ: $B = 40$ мТл.

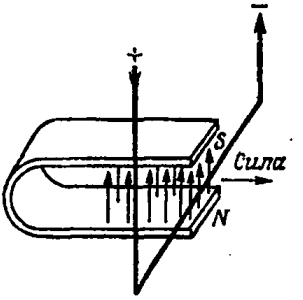


Рис. 228

Задача 4.

Найти разность потенциалов, возникающую на концах крыльев самолета при горизонтальном полете со скоростью 1200 $\frac{км}{ч}$, если размах крыльев самолета 40 м. Вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли 50 мкТл (рис. 229).

Дано:	**СИ**
$l = 40$ м	
$\upsilon = 1200\ \frac{км}{ч}$	$= 333{,}3\ \frac{м}{с}$
$B = 50$ мкТл	$= 5 \cdot 10^{-5}$ Тл
$\alpha = 90°$	
$(\varphi_1 - \varphi_2) - ?$	

Решение:

Если проводник движется перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля, то разность потенциалов на концах проводника численно равна *ЭДС*, индуцируемой в проводнике: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$,

где $\Delta\Phi = B\Delta S\cos\alpha$,

ΔS — площадь поперечного сечения контура;

α — угол между вектором магнитной индукции и вектором нормали к площади $\Rightarrow \alpha = 0 \Rightarrow$

$\cos\alpha = 1 \Rightarrow$

$$\varepsilon_i = -\frac{B\Delta S}{\Delta t} = Bl\upsilon \Rightarrow$$

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -Bl\upsilon.$$

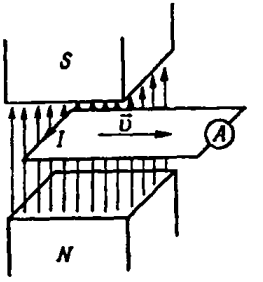


Рис. 229

$$[\varphi_1 - \varphi_2] = \frac{Тл \cdot м \cdot м}{с} = \frac{Н \cdot м \cdot м}{А \cdot м \cdot с} = = \frac{Дж}{А \cdot с} = В.$$

$\varphi_1 - \varphi_2 = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 333{,}3 \cdot 40 = 0{,}67$ (В).

Ответ: $\varphi_1 - \varphi_2 = 0{,}67$ В.

Задача 5.

Катушка сопротивлением R и индуктивностью L находится в переменном магнитном поле. Когда создаваемый этим полем поток увеличился на $\Delta\Phi$, ток в катушке возрос на ΔI. Какой заряд прошел при этом по катушке?

Дано:
R
L
$\Delta\Phi$
ΔI

$\Delta q - ?$

Решение:

Ток в катушке порождается появлением *ЭДС* индукции, возникающей при изменении магнитного потока:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

изменение тока в цепи приводит к появлению *ЭДС* самоиндукции:

$$\varepsilon_C = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},$$

которая направлена против *ЭДС* индукции $\Rightarrow$

$$\varepsilon_i - \varepsilon_c = IR \Rightarrow I = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_c}{R}.$$

С другой стороны:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta q = I\Delta t = \Delta t\,\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_c}{R} =$$

$$= \Delta t\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} - L\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)\cdot\frac{1}{R} = \frac{\Delta\Phi - L\Delta I}{R}.$$

Ответ: $\Delta q = \dfrac{\Delta\Phi - L\Delta I}{R}$.

Задача 6.

Какова скорость электрона, движущегося, не отклоняясь от прямолинейной траектории, во взаимно перпендикулярных однородном электрическом поле с напряженностью $2 \cdot 10^5 \frac{В}{м}$ и магнитном поле с индукцией 0,2 Тл?

Дано:

$E = 2 \cdot 10^5 \frac{В}{м}$

$B = 0{,}2$ Тл

$\alpha = 90°$

$\upsilon - ?$

Решение:

На электрон, движущийся одновременно в магнитном и электрическом полях, действуют две силы: со стороны магнитного поля — сила Лоренца (рис. 230):

$F_Л = qB\upsilon \sin\alpha = eB\upsilon$,

и со стороны электрического: $F_Э = eE$.

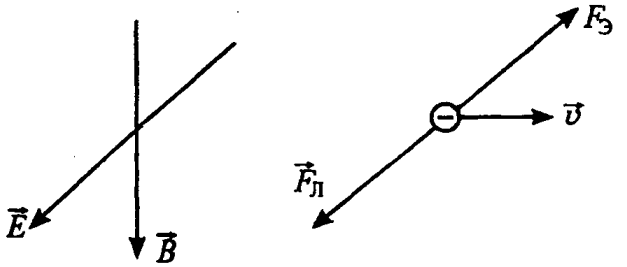


Рис. 230

Чтобы электрон не отклонялся от первоначальной траектории, модули этих сил должны быть равны:

$$F_Э = F_Л \Rightarrow eB\upsilon = eE \Rightarrow \upsilon = \frac{E}{B} = \frac{2 \cdot 10^5}{0{,}2} = 10^6 \left(\frac{м}{с}\right).$$

Ответ: $\upsilon = 10^6 \frac{м}{с}$.

Задача 7.

За время 5 с ток в цепи изменился от 20 до 5 А, при этом *ЭДС* самоиндукции, возникшая во включенной в цепь катушке, оказалась равной 24 В. Какова индуктивность катушки?

Дано:
$\Delta t = 5$ с
$\varepsilon_c = 24$ В
$I_1 = 20$ А
$I_2 = 5$ А
$L - ?$

Решение:

ЭДС самоиндукции равна:

$$\varepsilon_C = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \Rightarrow L = -\frac{\varepsilon \Delta t}{\Delta I} = -\frac{24 \cdot 5}{(5-20)} = 8 \text{ (Гн)}.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[L] = \frac{B \cdot c}{A} = \text{Гн}.$$

Ответ: $L = 8$ Гн.

Задача 8.

Протон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 4 мТл со скоростью $5 \cdot 10^5 \frac{м}{с}$ перпендикулярно вектору $\vec{B}$. Какую работу совершает поле над протоном за один полный оборот по окружности?

1) 200 Дж; 2) 20 Дж; 3) $2\pi \cdot 20$ Дж;
4) 0 Дж; 5) $2\pi \cdot 200$ Дж.

Дано:
$B = 4$ мТл
$\upsilon = 5 \cdot 10^5 \frac{м}{с}$
$T = 1$
$A - ?$

Решение:

Так как протон влетает в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции $\vec{B}$, то он будет двигаться по окружности $\Rightarrow$ работа магнитного поля по замкнутому контуру равна нулю.

Проанализировав варианты ответов, выбираем № 4.

Ответ: № 4.

Задача 9.

Телевизионная трубка в пространстве сориентирована так, что электроны в ней движутся с юга на север, образуя в центре экрана светящееся пятно. Затем в районе трубки создается магнитное поле, вектор индукции которого

направлен вертикально вниз к Земле (рис. 231). При этом светящееся пятно на экране смещается:

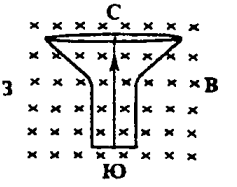


Рис. 231

1) на запад;
2) на восток;
3) вертикально вверх от Земли;
4) вертикально вниз к Земле;
5) остается на месте.

Решение:

Применим «правило левой руки»:

- расположим левую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь ⇒ рука параллельна плоскости листа, ладонь кверху;
- 4 пальца направим по направлению движения электронов (с юга на север);
- отогнутый большой палец укажет направление действия силы Лоренца ⇒ влево (на запад);
- так это направление силы, действующей на движущиеся положительно заряженные частицы, а электроны заряжены отрицательно, сделаем зеркальное отображение: перевернем зеркально руку ⇒ пятно сместится вправо, т.е. на восток ⇒ правильный ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 10.

Электрон с массой m и зарядом q движется в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции B. Время t, за которое электрон меняет направление скорости на противоположное, равно:

1) $\frac{m}{2qB}$; 2) $\frac{\pi m}{2qB}$; 3) $\frac{\pi m}{qB}$; 4) $\frac{2\pi m}{qB}$; 5) $\frac{4\pi m}{qB}$.

Дано:
q
B
$\alpha = 90°$
m
$t - ?$

Решение:

При движении электрона в магнитном поле на него действует сила Лоренца:

$F_Л = qB\upsilon\sin\alpha.$

Так как $\vec{\upsilon} \perp \vec{B}$, то электрон будет двигаться по окружности и сила Лоренца будет сообщать ей центростремительное ускорение:

$$F_Л = ma_ц = \frac{m\upsilon^2}{r} \Rightarrow qB\upsilon = \frac{m\upsilon^2}{r} \Rightarrow \upsilon = \frac{Bqr}{m}.$$

С другой стороны

$$\upsilon = \frac{2\pi r}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi r}{\upsilon} = \frac{2\pi rm}{qBr} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Электрон поменяет направление своей скорости на противоположное за время t, равное:

$$t = \frac{T}{2} = \frac{\pi m}{qB}.$$

Проанализировав представленные ответы, выбираем ответ № 3.

Ответ: № 3.

Задача 11.

Два рельса замкнуты на конце третьим (рис. 232). Четвертый проводник, параллельный ему и имеющий с рельсами надежный контакт в точках 1 и 2, катится по ним с некоторой скоростью $\vec{\upsilon}$ в магнитном поле, индукция которого $\vec{B}$. Как направлен индукционный ток на участке 1–2 и в какой из точек 1 и 2 потенциал больше?

1) от 2 к 1, $\varphi_2 > \varphi_1$;
2) от 1 к 2, $\varphi_2 > \varphi_1$;
3) от 2 к 1, $\varphi_1 > \varphi_2$;
4) от 1 к 2, $\varphi_1 > \varphi_2$.

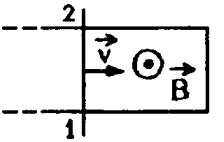


Рис. 232

Решение:

Применим «правило правой руки», т.к. здесь движется проводник:

- расположим правую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь ⇒ рука параллельна плоскости листа, ладонь — вниз;
- отогнутый большой палец расположим по направлению движения четвертого проводника (слева направо);
- 4 пальца будут направлены сверху вниз, т.е. от 2 к 1 ⇒ индукционный ток будет направлен от 2 к 1;
- $\varphi_2 > \varphi_1$, так как ток течет из той точки, где потенциал больше в ту, где потенциал меньше;
- ⇒ правильный ответ № 1.

Ответ: № 1.

Задача 12.

Проволочное кольцо радиусом 2 см покоится в изменяющемся магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции поля. Скорость изменения индукции поля 0,05 $\frac{Тл}{с}$. Если по контуру течет ток силой 2,5 мА, то сопротивление кольца равно:

1) 0,025 Ом 2) 0,063 Ом 3) 0,126 Ом
4) 0,181 Ом 5) 0,225 Ом

Дано:	СИ	Решение:
$r = 2$ см	$= 2\cdot10^{-2}$ м	По закону электромагнитной индукции Фарадея: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.
$I = 2{,}5$ mA	$= 2{,}5\cdot10^{-3}$ А	
$\frac{\Delta B}{\Delta t} = 0{,}05\ \frac{Тл}{с}$		
$R - ?$		

Знак минус говорит о действии закона Ленца ⇒ $\varepsilon_i = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|$.

$\Delta\Phi = \Delta(BS)\cos\alpha$.

$\angle\alpha = 0^\circ$, т.к. $\angle\alpha = \angle\left(\vec{B}\cdot\vec{n}\right) \Rightarrow$ нормаль к плоскости рамки совпадает с направлением вектора $\vec{B} \Rightarrow \cos\alpha = 1$.

$S = \pi r^2 \Rightarrow \Delta\Phi = \Delta B\pi r^2 \Rightarrow$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta B\pi r^2}{\Delta t} = 0{,}05\cdot 3{,}14\cdot 4\cdot 10^{-4} = 0{,}628\cdot 10^{-4}\ (\text{В}).$$

По закону Ома для замкнутого контура:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \Rightarrow R = \frac{\varepsilon}{I} = \frac{0{,}628\cdot 10^{-4}}{2{,}5\cdot 10^{-3}} = 0{,}025\ (\text{Ом}).$$

Проанализировав варианты ответов, приходим к выводу, что правильный ответ — № 1.

Ответ: № 1.

Задача 13.

В катушке с индуктивностью $L = 5$ Гн при протекании тока силой I_0 запасена энергия 40 Дж. Если при линейном увеличении силы тока в катушке в 7 раз за промежуток времени t с величина *ЭДС* самоиндукции, возникающей в катушке, будет равна 20 В, то время t:

1) 1 с; 2) 2 с; 3) 4 с; 4) 6 с; 5) 10 с.

Дано:
L = 5 Гн
$\varepsilon_c = 20$ В
$W_м = 40$ Дж
$I = 7I_0$
Δt – ?

Решение:

Энергия магнитного поля

$$W_м = \frac{LI_0^2}{2} \Rightarrow I_0 = \sqrt{\frac{2W_м}{L}} = \sqrt{\frac{2\cdot 40}{5}} = 4\ (\text{А}).$$

Так как $I = 7I_0 \Rightarrow \Delta I = 7I_0 - I = 6I_0$

По закону электромагнитной индукции Фарадея *ЭДС* ***самоиндукции*** — *ЭДС*, возникающая при изменении силы тока ΔI за время Δt в самом контуре:

$$\varepsilon_c = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Знак минус здесь говорит о действии закона Ленца. ⇒

$$\Delta t = \frac{L\Delta I}{\varepsilon} = \frac{5 \cdot 6 \cdot 4}{20} = 6 \text{ (с)}.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[\Delta t] = \frac{Гн \cdot A}{B} = \frac{B \cdot c \cdot A}{A \cdot B} = \text{с}.$$

Проанализировав варианты ответов, приходим к выводу, что правильный ответ — № 4.

Ответ: № 4.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 10

Задача 1.

Как изменится сила Ампера, действующая на проводник с током, помещенный в это поле, если угол 60° между вектором магнитной индукции однородного магнитного поля и прямолинейным проводником с током уменьшится в 2 раза?

Ответ: уменьшится в $\sqrt{3}$ раз.

Задача 2.

Если магнитный поток, пронизывающий виток с сопротивлением 10 Ом, изменяется с течением времени, как показано на рисунке 233, чему равна сила тока в витке в интервале времени 2 с – 4 с?

Ответ: 0,2 А.

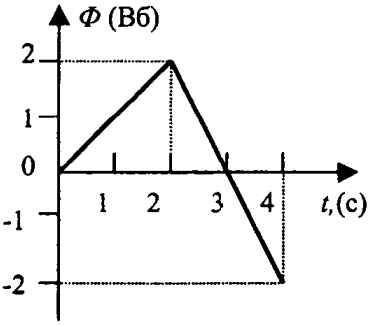


Рис. 233

Задача 3.

Электрон, обладая энергией $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ Дж, движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1{,}5$ Тл. Чему равен радиус окружности?

Ответ: 7 мм.

Задача 4.

Чему равно напряжение на концах катушки с сопротивлением 5 Ом и индуктивностью 0,1 Гн, если при ее отключении от цепи в ней выделяется 0,2 Дж энергии?

Ответ: 10 В.

Задача 5.

Рамка площадью $S = 400$ см^2, имеет $n = 100$ витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 10^{-2}$ Тл, причем период вращения $T = 0{,}1$ с. Определить максимальное значение *ЭДС* индукции в рамке, если ее ось вращения перпендикулярна силовым линиям.

Ответ: 2,5 В.

Задача 6.

Прямолинейный горизонтально расположенный проводник находится в горизонтальном однородном магнитном поле с индукцией B. По проводнику течет ток I, причем сила тяжести полностью уравновешивается силой, действующей на проводник со стороны поля. Чему равна площадь поперечного сечения проводника, если плотность материала проводника ρ?

Ответ: $\dfrac{IB}{\rho g}$.

Задача 7.

Провод длиной 20 см, по которому течет ток 10 А, перемещается в однородном магнитном поле с индукцией

0,7 Тл. Вектор индукции поля, направление перемещения проводника и тока взаимно перпендикулярны. Если проводник перемещается на 50 см, то какую работу по модулю совершает сила Ампера?

Ответ: 0,7 Дж.

Задача 8.

Замкнутую накоротко катушку диаметром 10 см, имеющую 200 витков, поместили в магнитное поле, индукция которого увеличивается от 2 до 6 Тл в течение 0,1 с. Определить среднее значение *ЭДС* индукции в катушке, если плоскость витков перпендикулярна к силовым линиям.

Ответ: 62,8 В.

Задача 9.

В однородном магнитном поле с индукцией 0,01 Тл расположена прямоугольная рамка *abcd,* подвижная сторона которой *ad* длиной 0,1 м перемещается со скоростью $\upsilon = 25\ \frac{м}{с}$ перпендикулярно линиям индукции поля. Определить *ЭДС* индукции.

Ответ: – 25 мВ.

Задача 10.

Насколько отличаются наибольшее и наименьшее значения модуля силы, действующей на прямой провод длиной 20 см с током 10 А, при различных положениях провода в магнитном поле, индукция которого равна 1 Тл?

Ответ: 2 Н.

Задача 11.

Плоская рамка площадью S = 0,02 м^2 расположена в однородном магнитном поле с индукцией B = 200 Тл так, что нормаль к рамке совпадает с направлением поля. Рамку поворачивают на 180° вокруг оси, перпендикулярной

направлению поля. Чему равен модуль изменения магнитного потока, пронизывающего рамку?

Ответ: 8 Вб.

Задача 12.

Источник с *ЭДС* 60 В и нулевым внутренним сопротивлением подключен к катушке индуктивности L = 4 Гн и сопротивлением R_1 = 50 Ом. При подключении последовательно к катушке резистора с сопротивлением R_2 энергия магнитного поля изменится на 0,8 Дж. Насколько изменится сила тока в цепи?

Ответ: 0,4 А.

Тест № 10

Задача 1.

Индуктивность L колебательного контура изменяется со временем t согласно зависимости, показанной на рисунке. Ёмкость C остаётся постоянной. Чему равна частота колебаний в момент времени t = 2 с, если при t = 0 она равнялась 1 МГц (рис. 234)?

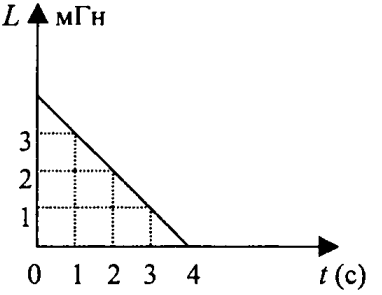


Рис. 234

1) 0,5 МГц; 2) $\sqrt{2}$ МГц;

3) $\frac{1}{\sqrt{2}}$ МГц; 4) 2 МГц; 5) 1 МГц .

Задача 2.

Если электрон массой m_1 и протон массой m_2, имея кинетические энергии K_1 и K_2 соответственно, движутся по

окружности в однородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля, то отношение их частот вращения $\frac{n_1}{n_2}$ равно:

1) $\frac{m_1}{m_2}$; 2) $\frac{m_2}{m_1}$; 3) $\frac{m_1}{m_2}\cdot\sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$;

4) $\frac{m_2}{m_1}\cdot\sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$; 5) $\frac{K_1}{K_2}$.

Задача 3.

Прямолинейный проводник, по которому течет постоянный ток, находится в однородном магнитном поле и расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции. Если этот проводник повернуть так, чтобы он располагался под углом 30° к линиям магнитной индукции, то сила Ампера, действующая на него,

1) уменьшится в 4 раза; 2) уменьшится в 2 раза;
3) останется неизменной; 4) увеличится в 2 раза;
5) увеличится в 4 раза.

Задача 4.

Если через прямолинейный проводник длиной 1 м, подвешенный горизонтально на двух нитях перпендикулярно горизонтальному однородному магнитному полю с индукцией 20 мТл пропустить ток 10 А, то натяжение каждой из нитей изменилось на

1) 2 Н; 2) 1 Н; 3) 0,5 Н; 4) 0,2 Н; 5) 0,1 Н.

Задача 5.

Проводник, согнутый в виде кольца, помещен в однородное магнитное поле, как показано на рисунке 235.

Индукция поля возрастает со временем. При этом индукционный ток в проводнике имеет направление:

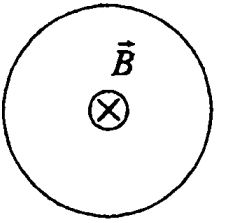


Рис. 235

1) по часовой стрелке;
2) против часовой стрелки;
3) ток в кольце не возникает;
4) направление тока зависит от сопротивления проводника;
5) вопрос не имеет смысла.

Задача 6.

Замкнутый проводник в виде квадрата общей длиной L, сопротивлением R расположен в горизонтальной плоскости. Проводник находится в вертикальном магнитном поле с индукцией B. Какое количество электричества протечет по проводнику, если, потянув за противоположные углы квадрата, сложить проводник вдвое?

1) $q = \frac{B}{R}\left(\frac{L}{4}\right)^2$; 2) $q = \frac{BL^2}{4R}$; 3) $q = \frac{R}{B}\left(\frac{L}{4}\right)^2$;

4) $q = \frac{RL^2}{4B}$; 5) $q = \frac{BL^2}{R}$.

Задача 7.

Вектор магнитной индукции поля, созданного двумя прямолинейными параллельными токами, перпендикулярными плоскости чертежа, причем $I_1 = I_2$ и текут токи в противоположном направлении, в точке А имеет направление (рис. 236):

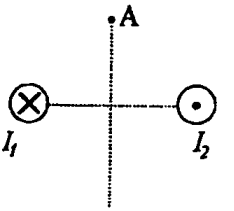


Рис. 236

1) вверх; 2) направо; 3) налево;
4) вниз; 5) от нас перпендикулярно чертежу.

Задача 8.

Металлический стержень лежит перпендикулярно горизонтальным рельсам, расстояние между которыми равно 50 см. Какой должна быть индукция вертикального магнитного поля, чтобы стержень начал двигаться, если по нему пропустить ток 40 А? Коэффициент трения стержня о рельсы 0,5. Масса стержня 1 кг.

1) 0,25 Тл; 2) 0,4 Тл; 3) 0,04 Тл;
4) 0,16 Тл; 5) 0,5 Тл.

Задача 9.

Периоды обращения по окружности α-частицы (T_α) и протона (T_p), влетевших в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции с одной и той же скоростью, соотносятся между собой ($m_\alpha = 4\ m_p$; $q_\alpha = 2q_p$).

1) $T_\alpha = 4T_p$; 2) $T_\alpha = 2T_p$; 3) $T_\alpha = \frac{1}{2}T_p$;

4) $T_\alpha = \frac{1}{4}T_p$; 5) $T_б = 8T_p$.

Задача 10.

На графике изображена зависимость магнитного потока, пронизывающего катушку, от времени. Какой из графиков зависимости *ЭДС* индукции от времени правильный (рис. 238)?

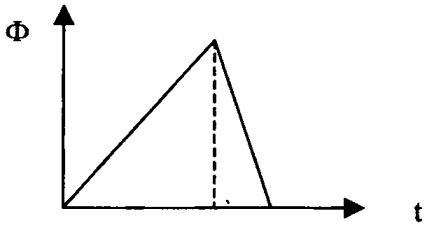
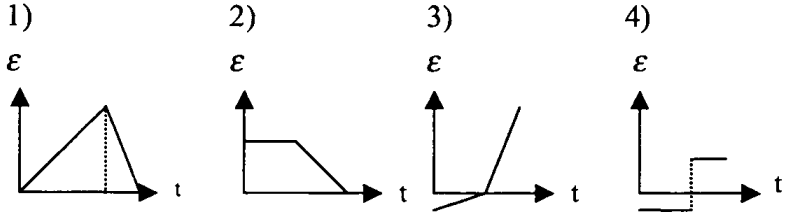


Рис. 237



5) нет правильного ответа.

Рис. 238

Задача 11.

Источник с *ЭДС* 80 В и нулевым внутренним сопротивлением подключен к катушке индуктивности L = 4 Гн и сопротивлением R_1 = 50 Ом. При подключении последовательно к катушке резистора с сопротивлением R_2 сила тока изменяется на ΔI = 1,2 А, энергия магнитного поля изменится на:

1) 0,6 Дж; 2) 1,2 Дж; 3) 2,4 Дж; 4) 4,8 Дж; 5) 9,6 Дж.

Задача 12.

Плоская рамка площадью S = 0,04 м^2 расположена в однородном магнитном поле с индукцией B так, что нормаль к рамке совпадает с направлением поля. Рамку поворачивают на 90° вокруг оси, перпендикулярной к направлению поля. Если модуль изменения магнитного потока, пронизывающего рамку, равен 8 Вб, то идукция поля B равна:

1) 100 Тл; 2) 200 Тл; 3) 400 Тл; 4) 800 Тл; 5) 1600 Тл.

ГЛАВА 8.
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Программа по физике содержит следующие вопросы по данному разделу:

Гармонические колебания. Амплитуда, период, частота, циклическая частота колебаний, скорость и ускорение движения точки относительно положения равновесия — параметры колебаний. Свободные колебания.

Математический маятник. Период колебаний математического маятника. Колебания груза на пружине. Период колебаний пружинного маятника.

Превращения энергии при гармонических колебаниях. Собственные и вынужденные колебания. Вынужденные колебания. Резонанс. Понятие об автоколебаниях.

Механические волны. Распространение колебаний в упругих средах. Поперечные и продольные волны. Длина волны. Связь длины волны со скоростью ее распространения. Уравнение гармонической волны.

Звуковые волны. Скорость звука. Громкость звука и высота тона. Ультразвук.

Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Превращение энергии в колебательном контуре. Собственная частота колебаний в контуре.

Вынужденные электрические колебания. Электрический резонанс. Формула Томсона. Переменный электрический ток. Генератор переменного тока. Действующее значение силы и напряжения переменного тока. Активное, емкостное и индуктивное сопротивления. Резонанс в электрической цепи.

Производство, передача энергии на расстояние и потребление электрической энергии. Трансформатор. Пути повышения КПД трансформатора.

Открытый колебательный контур. Идеи теории Максвелла. Электромагнитные волны. Скорость распространения электромагнитных волн. Свойства электромагнитных волн. Излучение и прием электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн и их применение. Принципы радиосвязи. Изобретение связи А.С. Поповым.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

8.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

8.1.1. Гармонические колебания

Гармонические колебания можно представить в виде проекции равномерного движения по окружности (рис. 237).

Гармоническим колебанием называются периодическое колебательное движение, при котором координата тела x меняется во времени по закону ***синуса*** (рис. 239):

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0) = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

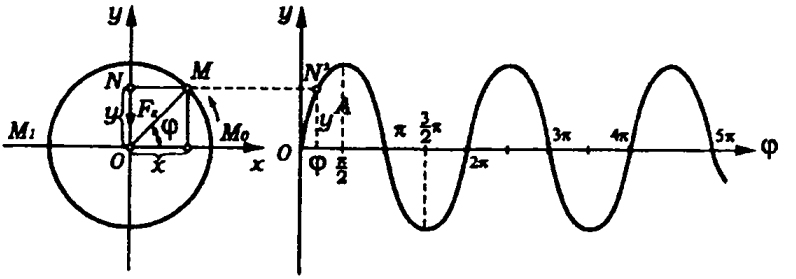


Рис. 239

или по закону ***косинуса*** (рис. 240):

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0) = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

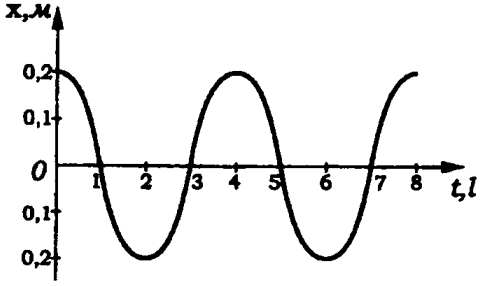


Рис. 240

8.1.1.1. Параметры гармонических колебаний

1. ***Смещение*** колеблющейся точки относительно положения равновесия x. $[x]$ = м.

2. ***Амплитуда*** A колебаний, т.е. максимальное смещение точки относительно положения равновесия:

$A = x_{мах}$, $[A]$ = м.

3. ***Фаза колебаний*** φ — угол, определяющий положение точки в данный момент времени:

$\varphi = \omega t + \varphi_0$. $[\varphi] = рад$.

4. ***Начальная фаза колебаний*** φ_0 — угол, определяющий положение точки в начальный момент времени. $[\varphi_0] = рад$.

5. ***Частота периодических колебаний*** ν — число колебаний n в единицу времени t:

$$\nu = \frac{n}{t},\ [\nu] = с^{-1} = Гц.$$

6. ***Период колебаний*** T — время одного полного колебания. $[T]$ = с.

$$T\nu = 1 \Rightarrow \nu = \frac{1}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{\nu}.$$

7. ***Циклическая частота периодических колебаний:***

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \; [\omega] = \frac{рад}{с} = с^{-1} = Гц.$$

8. ***Скорость гармонического колебания:***

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = A\omega\cos(\omega t + \varphi_0) = \frac{2\pi A}{T}\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

$$[\upsilon] = \frac{м}{с}.$$

$$\upsilon_{max} = A\omega = \frac{2\pi A}{T}.$$

9. ***Ускорение колеблющейся точки:***

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0) =$$

$$= -\frac{4\pi^2A^2}{T^2}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

$$[a] = \frac{м}{с^2}.$$

$$a_{max} = A\omega^2 = \frac{4\pi^2A^2}{T^2}.$$

10. ***Сила***, под действием которой точка массы m совершает гармоническое колебание:

$$F = ma = -\frac{4\pi^2A^2}{T^2}m\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

$$= -\frac{4\pi^2m}{T^2}x = -kx,$$

где $k = \dfrac{4\pi^2m}{T^2} \Rightarrow$

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$ — период колебания точки, совершающей колебания под действием силы $F = -kx$ (см. п. 8.1.1.3).

8.1.1.2. Гармонические колебания математического маятника

Математический маятник — это материальная точка, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити.

При малых амплитудах колебание математического маятника — ***гармоническое***.

Возвращающая сила (рис. 241):

$$F_{возв} = -mg\frac{x}{l},$$

где x — абсолютное значение смещения маятника из положения равновесия;

l — длина нити маятника.

Собственная циклическая частота:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Период малых колебаний математического маятника:

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

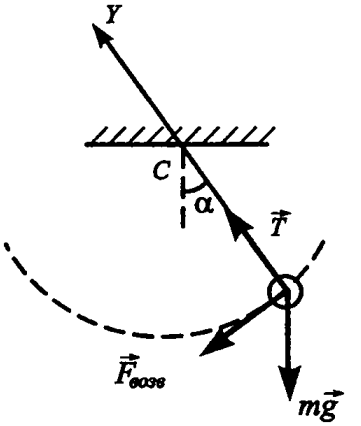


Рис. 241

При малых амплитудах ***период*** и ***частота*** колебаний математического маятника ***не зависит от амплитуды.***

Период и частота гармонических колебаний математического маятника ***не зависят от его массы***.

8.1.1.3. Гармонические колебания пружинного маятника

Пружинным маятником называется тело, подвешенное на пружине и совершающее колебания под действием силы упругости пружины:

$$F_{упр} = -k\Delta x,$$

где k — жесткость пружины,

Δx — абсолютное значение смещения маятника (рис. 242).

При отсутствии сил трения и сопротивления колебания пружинного маятника также являются гармоническими.

Собственная ***циклическая частота колебаний*** пружинного маятника:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

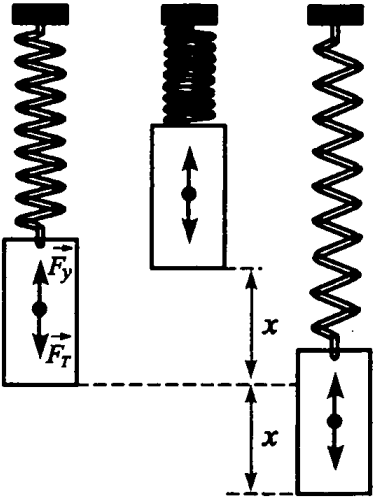


Рис. 242

период колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где m — масса пружинного маятника.

8.1.1.4. Энергия гармонического колебательного движения

Потенциальная энергия упруго деформированного тела:

$$\Pi = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2}\sin^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{2\pi^2 A^2}{T^2} m \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

Кинетическая энергия колеблющейся точки:

$$K = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}\cos^2(\omega t + \varphi_0) =$$

$$= \frac{2\pi^2 A^2}{T^2} m \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right),$$

где υ — скорость маятника.

Полная энергия гармонических колебаний пружинного маятника:

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}[\cos^2(\omega t + \varphi_0) + \sin^2(\omega t + \varphi_0)] =$$

$$= \frac{2\pi^2 A^2}{T^2} m\left[\sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) + \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)\right] =$$

$$= \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{m2\pi^2 A^2}{T^2}.$$

8.1.1.5. Собственные и вынужденные механические колебания

Если колебательная система выведена из положения равновесия и затем предоставлена сама себе, то она совершает колебания, называемые ***свободными колебаниями***.

Если свободные механические колебания происходят без потерь энергии, то они называются ***собственными колебаниями***.

Вынужденными называются колебания, происходящие под действием периодической вынуждающей силы.

Механическим резонансом называется явление резкого возрастания амплитуды колебаний при совпадении ***частоты*** колебаний с частотой периодически действующей вынуждающей силы.

Положительная роль резонанса:

- для измерения частоты колебаний создаются приборы — частотомеры;
- настройка музыкальных инструментов.

Предупреждение вредного действия резонанса:

- по мосту нельзя ходить «в ногу»;
- для исключения разрушения зданий станки ставятся в подвалах и на нижних этажах;
- запись звука производится в специальных шумопоглощающих помещениях.

8.1.2. Волны

Волной называется процесс распространения колебаний. Волны бывают:

- ***продольными*** — когда частицы колеблются вдоль направления распространения волны и
- ***поперечными*** — колебания частиц происходят перпендикулярно направлению распространения волны.

Длиной волны λ называется расстояние, пройденное волной за время, равное одному периоду.

Длину волны λ можно также определить как расстояние между двумя ***ближайшими*** точками, колеблющимися в одинаковой фазе (рис. 243). $[\lambda]$ = м.

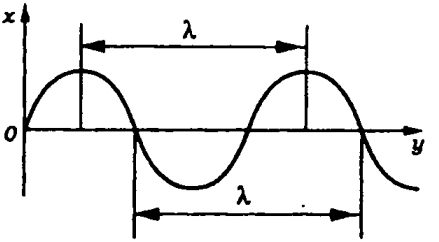


Рис. 243

Связь ***длины волны с частотой колебаний источника волн:***

$$\lambda = \upsilon T = \frac{\upsilon}{\nu} = \frac{2\pi\upsilon}{\omega},$$

где υ — скорость распространения волн;

ν — частота колебаний в источнике;

ω — циклическая частота.

8.1.2.1. Уравнение гармонической волны

При распространении незатухающих колебаний со скоростью x вдоль некоторого направления, называемого лучом, смещение любой точки, лежащей на луче и отстоящей от источника колебаний на расстоянии l, дается уравнением, называемым ***уравнением гармонической волны***:

$$x = A\sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi l}{\lambda}\right).$$

Две точки, лежащие на луче на расстояниях l_1 и l_2 от источника колебаний, имеют разность фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\frac{l_2 - l_1}{\lambda}.$$

При интерференции волн ***максимум амплитуды*** получается при условии:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = 2k\frac{\lambda}{2},\ (k = 0, 1, 2, \ldots),$$

где $\Delta l = l_2 - l_1$ — разность хода лучей.

Минимум амплитуды получается при условии:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2},\ (k = 0, 1, 2, \ldots).$$

Рассмотрим рисунок 244, где изображены 3 одинаковые синусоиды, одна из которых является зависимостью смещения:

- от времени (рис. 244, а),
- другая — от длины (рис. 244, б),
- а третья — от фазы колебаний (рис. 244, в).

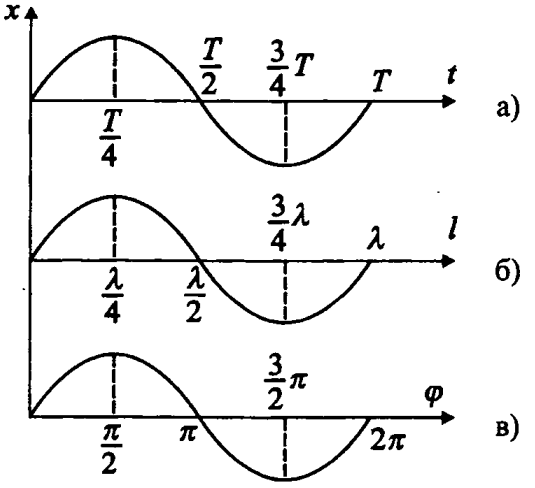


Рис. 244

Из рисунка видно, что за время, равное периоду колебаний T, материальная точка смещается на расстояние, равное длине волны λ, а фаза колебаний изменяется на 2π радиан.

Соответственно при

- $\Delta l = \dfrac{\lambda}{2} \Rightarrow \Delta\varphi = \pi$;
- $\Delta l = \dfrac{\lambda}{4} \Rightarrow \Delta\varphi = \dfrac{\pi}{2}$;
- $\Delta l = \dfrac{3\lambda}{4} \Rightarrow \Delta\varphi = \dfrac{3\pi}{2}$.

Это может быть использовано при решении задач.

8.1.2.2. Звуковые волны

Звуковой волной называется процесс распространения колебаний упругой среды в диапазоне частот от 16 Гц до 20 000 Гц.

Колебания упругой среды с частотой, большей слышимых частот, называются ***ультразвуковыми колебаниями,*** или ***ультразвуком***.

Колебания упругой среды с частотой, меньшей слышимых частот, называются ***инфраразвуковыми колебаниями,*** или ***инфразвуком***.

Колебания звучащего тела передаются упругой среде, в которой находится это тело, в виде сжатий и разряжений упругой среды, образующих ***продольные*** волны.

Скорость распространения звуковой волны в различных средах различна:

- в воздухе при 15 °С: $\upsilon_{зв} = 340\ \dfrac{м}{с}$;
- в воде: $\upsilon_{зв} = 1450\ \dfrac{м}{с}$;
- в металлах, например, в железе: $\upsilon_{зв} = 4900\ \dfrac{м}{с}$.

Характеристиками звуковых волн являются громкость и высота.

Громкость звука определяется звуковой энергией (энергией колебаний), проходящей через единицу поверхности упругой среды в единицу времени. Она обратно пропорциональна квадрату расстояния от уха до источника звука.

Высота звука определяется частотой звуковых колебаний. Чем больше частота колебаний, т.е. чем короче звуковая волна, тем выше звук (сравните писк комара и жужжание пчелы).

8.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

8.2.1. Колебательный контур

Колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности L и конденсатора C (рис. 245).

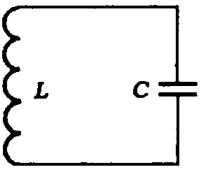


Рис. 245

Для свободных незатухающих колебаний в колебательном контуре ***циклическая частота:***

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Период свободных незатухающих колебаний рассчитывается по ***формуле Томсона***:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где L — индуктивность контура;

C — его электроемкость.

8.2.2. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания

Колебания, происходящие в колебательном контуре, когда система предоставлена сама себе, называются ***свободными электромагнитными колебаниями***. Как правило, они затухающие.

Если свободные колебания происходят без потерь, то они называются ***собственными***.

Вынужденными электромагнитными колебаниями называются незатухающие колебания, происходящие под действием периодически действующей *ЭДС*.

Это происходит, если к колебательному контуру подключен генератор переменного тока.

При этом в контуре возникают колебания:

- заряда q на обкладках конденсатора (рис. 246):

$$q = q_0\cos(\omega t + \varphi_0),$$

где q_0 — амплитудное значение заряда на обкладках конденсатора;

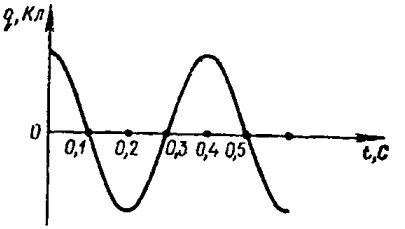


Рис. 246

- напряжения U на обкладках конденсатора:

$$U = U_0\cos(\omega t + \varphi_0),$$

где U_0 — амплитудное значение напряжения:

$$U_0 = \frac{q_0}{C};$$

- сила тока I в колебательном контуре:

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0\sin(\omega t + \varphi_0),$$

где I_0 — амплитудное значение силы тока:

$$I_0 = q_0\omega;$$

- энергии электрического и магнитного поля и других физических величин (энергия электрического поля превращается в энергию магнитного и наоборот).

Главное, что все эти величины колеблются с одной и той же циклической частотой ω:

$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t$,

где ε_0 — амплитудное значение *ЭДС*,

ω — циклическая частота переменной *ЭДС*:

$\varepsilon_{max} = BS\omega$.

Электрическим резонансом называется явление резкого возрастания амплитуды силы тока при совпадении частоты собственных колебаний контура с частотой периодически действующей вынуждающей *ЭДС*.

Явление электрического резонанса широко применяется в радиотехнике: настройка частоты приемника на частоту передающей станции.

8.2.3. Превращение энергии в колебательном контуре

В колебательном контуре так же, как и в случае колебаний пружинного и математического маятника, происходит превращение энергии (рис. 247). При этом:

1. $t = 0 \Rightarrow W_{эл} = \dfrac{Q^2}{2C}$, $W_м = 0$.

2. $t = \dfrac{T}{4} \Rightarrow W_э = 0$, $W_м = \dfrac{LI^2}{2}$.

3. $t = \dfrac{T}{2} \Rightarrow W_{эл} = \dfrac{Q^2}{2C}$, $W_м = 0$.

4. $t = \dfrac{3T}{4} \Rightarrow W_э = 0$, $W_м = \dfrac{LI^2}{2}$.

5. $t = T \Rightarrow W_{эл} = \dfrac{Q^2}{2C}$, $W_м = 0$.

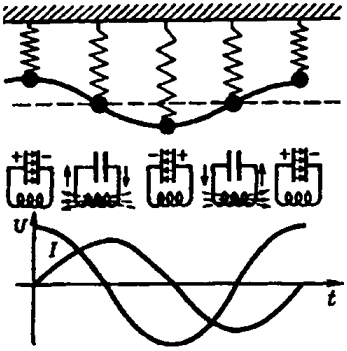


Рис. 247

Здесь T — период колебаний, Q — максимальное значение заряда на обкладках конденсатора.

8.2.4. Переменный ток

Переменный ток представляет собой вынужденные колебания тока в электрической цепи, происходящие с частотой ω:

$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$,

где I_0 — амплитудное значение силы тока;

$\varphi = (\omega t + \varphi_0)$ — сдвиг фазы между колебаниями тока и ЭДС.

Эффективные (действующие) значения силы тока и ***напряжения***:

$$I_{эфф} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,707 I_0;$$

$$U_{эфф} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} = 0,707 U_0,$$

где I_0 и U_0 — амплитудные значения силы тока и напряжения.

8.2.5. Сопротивления переменного тока

В цепи переменного тока помимо ***активного*** сопротивления R имеются также и ***реактивные***:

- ***индуктивное*** сопротивление, обусловленное явлением самоиндукции:
  $X_L = \omega L$;
- ***емкостное*** сопротивление, обусловленное наличием емкости в цепи переменного тока:
  $$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Напряжение на этих сопротивлениях можно рассчитать:

- на активном электрическом сопротивлении R:
  $U_R = IR$;
- на емкостном сопротивлении X_C:
  $$U_C = \frac{q}{C};$$

- на индуктивном сопротивлении X_L:

$$U_L = L\frac{\Delta I}{\Delta t};$$

где L — индуктивность цепи;

C — емкость конденсатора.

Полное сопротивление цепи переменного тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}.$$

8.2.6. Передача энергии на расстояние

Передача энергии сопровождается потерями в проводнике, прежде всего на нагревание проводов (Ленц–Джоулево тепло):

$W_{потерь} = I^2Rt.$

Для уменьшения тепловых потерь в проводниках существует два пути:

- уменьшение сопротивления проводов, что невыгодно, так как связано с увеличением сечения проводов ⇒ их утяжеление;
- использование менее сильных токов при той же мощности ⇒ повышение напряжения.

8.2.7. Трансформатор

Трансформатор — устройство, служащее для преобразования напряжения переменного тока.

Повышающий трансформатор преобразует ток с повышением напряжения (при уменьшении силы тока), понижающий — с понижением напряжения.

Трансформатор состоит из двух катушек изолированной проволоки и общего пластинчатого железного сердечника.

Работа трансформатора (рис. 248):

- в первичной обмотке:
  $U_1 = I_1R_1 + \varepsilon_1$.
- во вторичной обмотке:
  $\varepsilon_2 = I_2R_2 + U_2$.

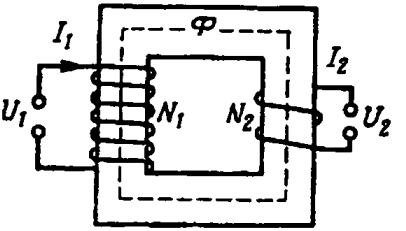


Рис. 248

Коэффициент трансформации трансформатора:

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_{2x}},$$

где N_1 и N_2 — число витков первичной и вторичной обмоток;

ε_1 и ε_2 — *ЭДС* индукции, возникающая в первичной и вторичной обмотках трансформатора;

U_{2x} — напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе.

Холостым ходом трансформатора называется режим, когда ко вторичной обмотке ничего не подключено.

В повышающем трансформаторе коэффициент трансформации $K < 1$ ($N_2 > N_1$), понижающем — $K > 1$ ($N_2 < N_1$).

Потери в трансформаторе	***Ликвидация потерь***
1.Нагревание обмоток	1. Обмотка низкого напряжения делается большего сечения, так как по ней протекает ток большей силы
2. Рассеивание магнитного потока	2. Сердечник делается замкнутым: весь магнитный поток проходит внутри сердечника
3. Вихревые токи в сердечнике (токи Фуко)	3. Сердечник делается пластинчатым
4. Перемагничивание сердечника	4. Сердечник делается пластинчатым

Благодаря этим мерам *КПД* современных трансформаторов достигает 95–99%.

8.2.8. Электромагнитные волны

Переменные электрические и магнитные поля не могут существовать друг без друга: в пространстве, где существует переменное магнитное поле, возбуждается переменное электрическое и наоборот (рис. 249).

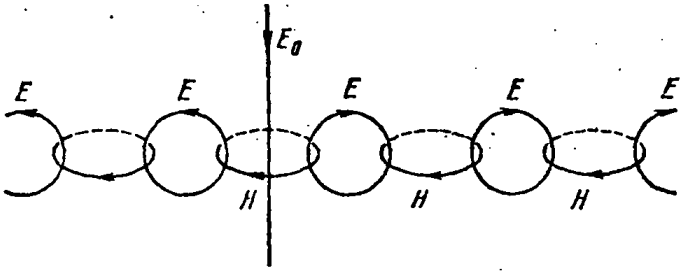


Рис. 249

Переменные электрическое и магнитное поля обуславливают одно другое и образуют единое ***электромагнитное поле***, которое распространяется в пространстве, образуя электромагнитную волну (рис. 250).

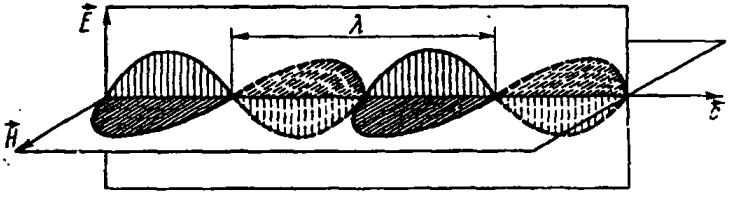


Рис. 250

Скорость электромагнитных волн в вакууме (скорость света c) равна:

$$c = \lambda\nu = \frac{\lambda}{T}.$$

$$c = 3\cdot10^8\ \frac{м}{с}.$$

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от рода среды и всегда ***меньше***, чем скорость света в вакууме:

$$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

где ε — диэлектрическая;

μ — магнитная проницаемости среды.

$\sqrt{\varepsilon\mu} = n$, где n — показатель преломления среды $\Rightarrow$

$$\upsilon = \frac{c}{n}.$$

8.2.9. Амплитудная модуляция

Для радиосвязи необходимы колебания высокой частоты, а колебания звукового диапазона являются колебаниями низкой частоты. $\Rightarrow$

Колебания звуковой частоты (рис. 251, *а*) необходимо накладывать на колебания высокой частоты (рис. 251, *б*), которые и перенесут их на большие расстояния (рис. 251, *в*). $\Rightarrow$

Колебания высокой частоты называются ***несущими колебаниями***.

Модуляцией называется процесс управления колебаниями высокой частоты в соответствие с колебаниями низкой частоты.

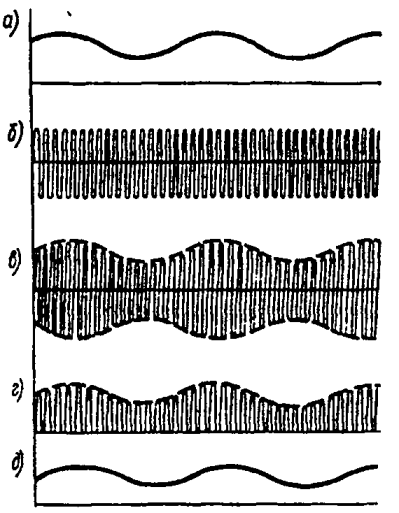


Рис. 251

Модулятор — составная часть передатчика в каналах связи, с помощью которой осуществляется управление параметрами гармонических электромагнитных колебаний.

Демодуляция — процесс, обратный модуляции, т.е. преобразование модулированных колебаний высокой (несущей) частоты (рис. 251, *г*) в колебания с частотой немодулированного сигнала (рис. 251, *д*).

При ***амплитудной модуляции*** изменяют со звуковой частотой амплитуду высокочастотных колебаний.

Модем (название получилось из двух технических терминов: МОдуляция и ДЕМодуляция) — утройство, при помощи которого компьютер может передавать данные по телефонной линии и принимать их. Модем преобразует сигналы компьютера в сигналы, пригодные для передачи по телефонному каналу, а при приеме выполняет обратное преобразование.

Детектор — проводник с односторонней проводимостью, позволяющая выделить низкочастотные составляющие колебаний из колебаний несущей частоты.

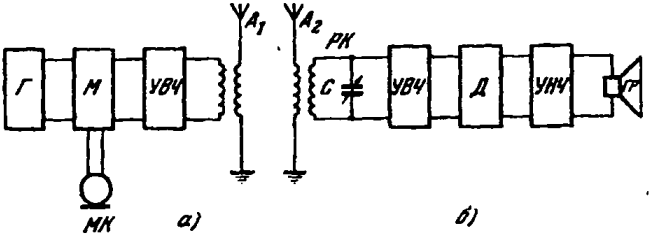


Рис. 252

На рисунке 252 приведена блок-схема передающей радиостанции (рис. 252, *а*) и приемника (рис. 252, *б*). Здесь:

Г — генератор незатухающих колебаний;

М — модулятор, в котором происходит модуляция сигнала с помощью микрофона *МК*;

УВЧ — усилитель колебаний высокой частоты;

УНЧ — усилитель колебаний низкой частоты;
Д — детектор;
ГР — громкоговоритель;
С — конденсатор переменной емкости, позволяющий настроить приемный контур на частоту передающей станции;
A_1 и A_2 — передающая и приемная антенны.

Указания к решению задач

1. При решении задач на колебания математического маятника необходимо помнить, сто при малых амплитудах период и частота колебаний математического маятника не зависят от амплитуды и массы маятника и не путать его с пружинным маятником.

2. Внимательно читать условие задачи и обращать внимание на то, какие колебания в данной задаче представлены: синусоидальные или косинусоидальные, т.к. ответы зависят от выбора уравнений.

3. Помнить, что путь, пройденный колеблющейся точкой за время, равное одному периоду, равен $4A$, где A — амплитуда колебаний.

4. При решении задач на колебательный контур нужно помнить, что в процессе незатухающих электромагнитных колебаний полная энергия контура, равная сумме энергий электрического поля конденсатора $W_Э = \frac{CU^2}{2}$ и магнитного поля катушки $W_M = \frac{LI^2}{2}$, остается постоянной. При этом в моменты

- когда конденсатор максимально заряжен ($U = U_0$), сила тока равна нулю ⇒ полная энергия контура:

$$W = \frac{CU_0^2}{2};$$

- когда конденсатор разряжен, ($U = 0$), сила тока достигает максимального значения $I_0 \Rightarrow$ полная энергия контура $W = \frac{LI_0^2}{2}$.

5. Часто в условиях задачи даны, например, уравнения ***заряда*** на обкладках конденсатора, а нужно найти период или частоту колебаний ***тока*** в контуре $\Rightarrow$ нужно найти циклическую частоту ω, которая у них будет одинакова $\Rightarrow$ найти период или частоту.

6. Оценивать ответ на физическую реальность, например скорость звука в воде равна 1440 $\frac{м}{с}$ $\Rightarrow$ из всех приведенных ответов выбрать тот, который ближе подходит к точному значению.

Примеры решения задач

Задача 1.

Материальная точка массой 10 г колеблется по закону $x = 0{,}05\sin(0{,}6t+0{,}8)$ (м). Найти максимальную силу, действующую на точку, и полную энергию колеблющейся точки.

Дано:	**СИ**	**Решение:**
$m = 10$ г	$= 10^{-2}$ кг	Сравним уравнение, данное в задаче, с уравнением гармонических колебаний в общем виде:
$x = 0{,}05\sin(0{,}6t + 0{,}8)$(м)		
F_{max} – ?		
W_{max} – ?		

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

$A = 5\cdot10^{-2}$ м; $\omega = 0{,}6\ \frac{рад}{с}$; $\varphi_0 = 0{,}8\ рад \Rightarrow$

$a_{max} = -A\omega^2 \Rightarrow$

максимальная сила, действующая на точку:

$F_{max} = ma_{max} = mA\omega^2 = 10^{-2}\cdot5\cdot10^{-2}\cdot0{,}36 = 1{,}8\cdot10^{-4}$ (Н).

$$[F_{max}] = \frac{кг \cdot м}{с^2} = Н.$$

Полная энергия колеблющейся точки:

$$W = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

$$W = \frac{10^{-2} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,36}{2} = 4,5 \cdot 10^{-6} (Дж).$$

$$[W] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = Дж.$$

Ответ: $F_{max} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Н; $W = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Задача 2.

За какое время маятник отклонится от положения равновесия на половину амплитуды колебаний, если период колебаний равен 3,6 с?

Дано:	**Решение:**
$x = \frac{A}{2}$ $T = 3,6$ с	Смещение точки от положения равновесия определяется уравнением: $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.
t – ?	Так как про начальную фазу ничего не сказано, она равна нулю $\Rightarrow$

$x = A\sin\omega t$.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \frac{A}{2} = A\sin\frac{2\pi}{T}t \Rightarrow \sin\frac{2\pi}{T}t = \frac{1}{2} \Rightarrow$$

$$\frac{2\pi}{T}t = \frac{\pi}{6} \Rightarrow t = \frac{T}{12} = \frac{3,6}{12} = 0,3 \text{ (с)}.$$

Ответ: $t = 0,3$ с.

Задача 3.

Определить период полного колебания математического маятника длиной l (рис. 253), если точка перегиба нити

находится на одной вертикали с точкой подвеса, на расстоянии $\frac{l}{2}$ от нее.

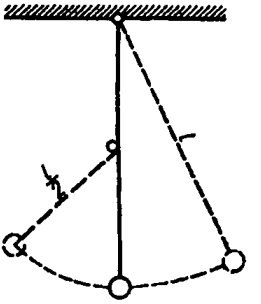


Рис. 253

Решение:

Движение маятника справа от вертикали происходит за половину периода:

$$\frac{T_1}{2}=\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

а слева — за половину периода:

$$\frac{T_2}{2}=\pi\sqrt{\frac{l}{2g}}.$$

Полный период:

$$T=\frac{T_1+T_2}{2}=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}+\pi\sqrt{\frac{l}{2g}}=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1+\sqrt{\frac{1}{2}}\right)=1{,}7\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Ответ: $T=1{,}7\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Задача 4.

От груза, висящего на пружине, жесткость которой равна 50 $\frac{Н}{м}$, отрывается масса в 50 г. С какой амплитудой будет совершать колебания после этого оставшаяся часть груза?

Дано:	СИ
$\Delta m = 50$ г	$= 5\cdot10^{-2}$ м
$k = 50\ \frac{Н}{м}$	
A – ?	

Решение:

В положении равновесия модуль силы тяжести mg равен модулю силы упругости пружины:

$$F_{упр0}=kx_0 \Rightarrow$$

$mg = kx_0$.

После отрыва от груза массы Δm (рис. 254), оставшаяся часть груза $(m - \Delta m)g$ уравновешивается силой упругости пружины

$F_{упр} = kx \Rightarrow$

$(m - \Delta m)g = kx$.

При этом груз совершает гармонические колебания с амплитудой

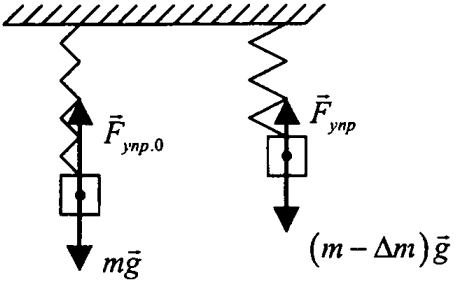


Рис. 254

$A = x_0 - x$.

Для нахождения амплитуды вычтем из уравнения:

$mg = kx_0$

уравнение:

$(m - \Delta m)g = kx \Rightarrow$

$k(x_0 - x) = mg + \Delta mg - mg \Rightarrow$

$$A = \frac{\Delta mg}{k} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 10}{50} = 10^{-2} \text{ (м)}.$$

$$[A] = \frac{кг \cdot м \cdot м}{с^2 \cdot Н} = \frac{Н \cdot м}{Н} = м.$$

Ответ: $A = 10^{-2}$ м.

Задача 5.

Волна распространяется со скоростью 6 $\frac{м}{с}$ и частотой 4 Гц. Чему равна разность фаз точек среды, отстоящих друг от друга на расстоянии 75 см?

Дано:	**СИ**
$\Delta l = 50$ см	$= 0{,}5$ м
$\nu = 4$ Гц	
$\upsilon = 6\ \frac{м}{с}$	
$\Delta\varphi - ?$	

Решение:

Данную задачу можно решить двумя путями:

- с помощью формул;
- с помощью графиков.

Решим задачу первым способом.

Две точки волны, отстоящих друг от друга на расстоянии Δl отличаются по фазе на:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda},$$

где λ — длина волны.

Из формулы скорости:

$$\upsilon = \lambda\nu \Rightarrow \lambda = \frac{\upsilon}{\nu} \Rightarrow$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta l\nu}{\upsilon} = \frac{2\cdot\pi\cdot 0{,}75\cdot 4}{6} = \pi = 180^\circ.$$

Решим задачу вторым способом, с помощью графиков (рис. 255):

Из формулы скорости:

$\upsilon = \lambda\nu \Rightarrow$

$$\lambda = \frac{\upsilon}{\nu} = \frac{6}{4} = 1{,}5 \text{ (м)}.$$

$$\Delta l = 0{,}75 \text{ м} \Rightarrow \Delta l = \frac{\lambda}{2}.$$

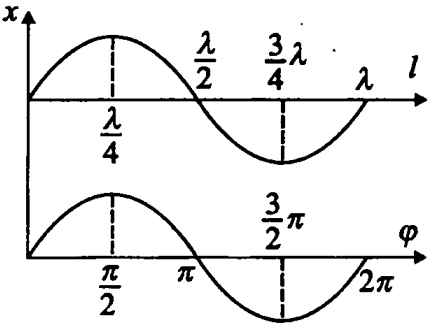


Рис. 255

Из графика видно, что смещению $\frac{\lambda}{2}$ соответствует разность фаз $\Delta\varphi = \pi = 180^\circ$.

Ответ: $\Delta\varphi = 180^\circ$.

Задача 6.

Шарик массой 200 г подвешен на нерастяжимой нити длиной 1м. Определите период колебаний маятника, энергию маятника и скорость шарика при прохождении положения равновесия, если наибольший угол отклонения маятника от вертикального направления составляет 45°.

Дано:	СИ
$m = 200$ г	$= 0{,}2$ кг
$\alpha = 45°$	
$l = 1$ м	
$T - ?$ $E - ?$	
$\upsilon - ?$	

Решение:

Период колебаний маятника:

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

$$T = 2 \cdot 3{,}14\sqrt{\frac{1}{10}} = 2 \text{ с}.$$

При отклонении маятника от вертикального положения на угол α он поднимается на высоту h (рис. 256) $\Rightarrow$ приобретает потенциальную энергию:

$E_п = mgh.$

$l - h = l\cos\alpha \Rightarrow$

$h = l(1 - \cos\alpha) \Rightarrow$

$E_п = mgl(1 - \cos\alpha) =$

$= 0{,}2 \cdot 10 \cdot 1 \cdot (1 - \frac{\sqrt{2}}{2}) = 0{,}6$ Дж.

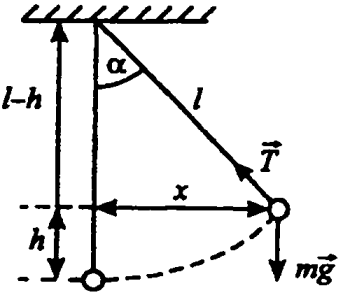


Рис. 256

Эта энергия и является полной энергией маятника $\Rightarrow$ $E = 0{,}6$ Дж.

При прохождении маятника через положение равновесия его потенциальная энергия полностью превращается в кинетическую, так как сопротивление воздуха не учитывается:

$$mgh = \frac{m\upsilon^2}{2} \Rightarrow \upsilon = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0{,}3} = 2{,}4\ (\frac{м}{с}).$$

$$[\upsilon] = \sqrt{\frac{м \cdot м}{с^2}} = \frac{м}{с}.$$

Ответ: $T = 2$с; $E = 0{,}6$ Дж; $\upsilon = 2{,}4\ \frac{м}{с}$.

Задача 7.

Колебательный контур состоит из катушки индуктивности L=0,2 мГн и переменного конденсатора, электроемкость которого может меняться в пределах от 50 до 450 пФ. На какие длины волн может настраиваться контур?

Дано:	СИ	Решение:
$L = 0{,}2$ мГн	$= 2\cdot10^{-4}$ Гн	Для настройки колебательного контура на определенную длину волны частота собственных колебаний контура должна быть равна частоте колебаний в принимаемой волне.
$C_1 = 0$ пФ	$= 5\cdot10^{-11}$ Ф	
$C_2 = 450$ пФ	$= 45\cdot10^{-11}$ Ф	
$c = 3\cdot10^8 \frac{м}{с}$		
$\lambda_{min} - ?$		
$\lambda_{max} - ?$		

$$\lambda = cT,$$

где c — скорость света.

Период контура найдем по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \Rightarrow$$

$$\lambda_{min} = c2\pi\sqrt{LC_{\min}} =$$

$$= 3\cdot10^8\cdot2\cdot3{,}14\cdot\sqrt{2\cdot10^{-4}\cdot5\cdot10^{-11}} = 188 \text{ (м)}.$$

$$[\lambda_{min}] = \frac{м}{с}\sqrt{Гн\cdot Ф} = \frac{м}{с}\sqrt{\frac{В\cdot с\cdot А\cdot с}{А\cdot В}} = \text{м}.$$

$$\lambda_{max} = c2\pi\sqrt{LC_{max}} =$$

$$= 3\cdot10^8\cdot2\cdot3{,}14\cdot\sqrt{2\cdot10^{-4}\cdot45\cdot10^{-11}} = 565 \text{ (м)}.$$

Ответ: $\lambda_{min} = 188$ м; $\lambda_{max} = 565$ м.

Задача 8.

Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, настроен на длину волны $\lambda = 2$ м. Зная, что максимальное значение заряда на конденсаторе $Q = 6\cdot10^{-11}$ Кл, определить значение тока в

цепи в момент, когда заряд на конденсаторе станет равным $q = 2\cdot10^{-11}$ Кл.

1) 12 мА; 2) 15 мА; 3) 24 мА; 4) 37 мА; 5) 53 мА.

Дано:
$\lambda = 2$ м
$Q = 6\cdot10^{-11}$ Кл
$q = 2\cdot10^{-11}$ Кл
$c = 3\cdot10^{8}\frac{м}{с}$
$I - ?$

Решение:

Когда конденсатор колебательного контура зарядили, энергия электрического поля была максимальна:

$$W_{эл} = \frac{Q^2}{2C}.$$

По мере разрядки конденсатора она будет переходить в энергию магнитного поля катушки и в момент, когда значение заряда равно q, закон сохранения энергии может быть записан в виде:

$$\frac{Q^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}.$$

Умножим обе части равенства на $C \Rightarrow$

$$Q^2 = q^2 + LCI^2 \Rightarrow I = \sqrt{\frac{Q^2 - q^2}{LC}} = \frac{\sqrt{Q^2 - q^2}}{\sqrt{LC}}.$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \Rightarrow \lambda = cT = 2\pi c\sqrt{LC} \Rightarrow$$

$$\sqrt{LC} = \frac{\lambda}{2\pi c} \Rightarrow I = 2\pi c\cdot\frac{\sqrt{Q^2 - q^2}}{\lambda}.$$

$$[I] = \frac{м}{с}\cdot\frac{\sqrt{Кл^2}}{м} = \frac{А\cdot с}{с} = \text{А}.$$

$$I = 2\cdot3{,}14\cdot3\cdot10^{8}\cdot\frac{\sqrt{36\cdot10^{-22} - 4\cdot10^{-22}}}{2} = 53{,}28\cdot10^{-3}\,(\text{А}) =$$

$= 53$ мА. $\Rightarrow$ Правильный ответ № 5.

Ответ: № 5.

Задача 9.

Две пружины с коэффициентом жесткости k_1 и k_2 соединены один раз последовательно, второй раз — параллельно. Отношение периодов гармонических колебаний $\frac{T_1}{T_2}$ груза на таких пружинах равно:

1) $\frac{k_1+k_2}{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}$ 2) $\frac{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}{k+k_2}$ 3) $\frac{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}{(k+k_2)^2}$

4) $\frac{k_1 \cdot k_2}{k+k_2}$ 5) $\frac{k_1+k_2}{k \cdot k_2}$

Дано:
k_1
k_2

$\frac{T_1}{T_2}$ – ?

Решение:

Для того чтобы найти отношение периодов, сначала нужно определить жесткость системы пружин в случае их последовательного соединения (рис. 257, а) и в случае параллельного (рис. 257, б).

Рассмотрим случай а), когда пружины соединены последовательно.

Под действием силы F каждая из пружин растянется на длину:

$$x_1 = \frac{F}{k_1};\ x_2 = \frac{F}{k_2} \Rightarrow$$

для системы пружин можно записать:

$$F = kx = k(x_1 + x_2) =$$

$$= k\left(\frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2}\right) \Rightarrow k = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}.$$

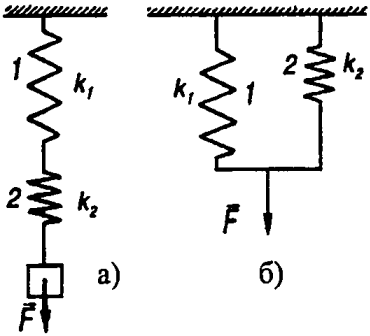


Рис. 257

Период колебаний груза массой m T_1:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{m(k_1+k_2)}{k_1 \cdot k_2}}.$$

Рассмотрим случай б), когда пружины соединены параллельно.

Для каждой из пружин можно записать:

$F_1 = k_1x$; $F_2 = k_2x$.

Для системы пружин:

$F = kx \Rightarrow (F_1 + F_2) = kx$

$\Rightarrow k_1x, + k_2x = kx \Rightarrow k = k_1 + k_2.$

Период колебаний груза массой m T_2:

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}.$$

В результате находим отношение периодов:

$$\frac{T_1}{T_2} = 2\pi\sqrt{\frac{(k_1+k_2)m(k_1+k_2)}{k_1 \cdot k_2 \cdot m}} = \frac{k_1+k_2}{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}$$

Проанализировав представленные варианты ответов, выбираем правильный ответ № 1.

Ответ: № 1.

Задача 10.

Уравнение гармонической волны имеет вид: $y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$. Какой вид примет уравнение гармонической волны после подстановки в него значений амплитуды колебаний частиц 0,2 м, периода их колебаний 0,4 с и длины волны 1 м?

1) $y = 0,2\sin(t - 0,4x)$; 2) $y = 0,2\sin(5\pi t - 2\pi x)$;

3) $y = 0,2\sin(2\pi t - 5\pi x)$; 4) $y = 0,2\sin(0,4t - x)$;

5) $y = 0,2\sin(5\pi t - 5\pi x)$.

Решение:

Запишем уравнение гармонической волны в общем виде:

$x = A\sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi l}{\lambda}\right)$ или применительно к данной задаче:

$$y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right).$$

Так как амплитуда колебаний равна 0,2 м, $\Rightarrow y_0 = 0{,}2$ м, период колебаний 0,4 с $\Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0{,}4} = 5\pi$, длина волны равна 1 м $\Rightarrow y = 0{,}2\sin(5\pi t - 2\pi x)$ $\Rightarrow$ Правильный ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 11.

На рисунке 258 показаны направления скоростей двух точек упругой среды в волновом процессе. Волна —

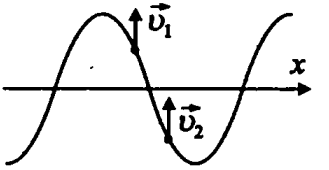


Рис. 258

1) поперечная, распространяется вдоль оси OX вправо;
2) поперечная, распространяется вдоль оси OX влево;
3) поперечная, стоячая;
4) продольная, распространяется вдоль оси OX вправо;
5) продольная, распространяется вдоль оси OX влево.

Решение:

Сместим имеющуюся синусоиду так, чтобы линия попала на новое изображение точек (рис. 259). Тогда можем сделать вывод, что эта волна — поперечная (точки смещаются перпендикулярно распространению

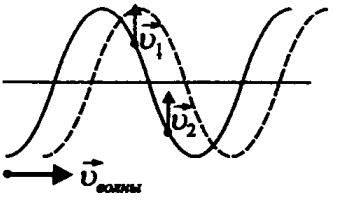


Рис. 259

волны) и движение волны происходит вправо ⇒ Правильный ответ № 1.

Ответ: № 1.

Задача 12.

Действующее значение напряжения на катушке индуктивностью L = 0,2 мГн в цепи переменного тока с частотой ν равна U = 4 В. Если амплитудное значение силы тока в цепи равно 2,25 А, то частота ν равна … кГц (*ответ округлить до целого*).

Дано:	**СИ**	**Решение:**
L = 0,2 мГн	= $2\cdot10^{-4}$ Гн	Действующее (эффективное) значения силы напряжения:
$U_д$ = 4 В		
I_0 = 2,25 А		
ν (кГц) –?		

$$U_д = U_{эфф} = \frac{U_0}{\sqrt{2}},$$

где I_0 — амплитудное значения силы тока. ⇒

$$U_o = U_д\sqrt{2}.$$

Из закона Ома для участка цепи:

$$I_o = \frac{U_0}{X_L},$$

где X_L — индуктивное сопротивление катушки:

$X_L = \omega L = 2\pi\nu L.$ ⇒

$$I_0 = \frac{U_д\sqrt{2}}{2\pi\nu L} \Rightarrow \nu = \frac{U_д\sqrt{2}}{2\pi I_o L}.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[\nu] = \frac{В}{А\cdot Гн} = \frac{В\cdot А}{А\cdot В\cdot с} = \frac{1}{с} = Гц.$$

Подставим числовые значения в полученную формулу:

$$\nu = \frac{4\sqrt{2}}{2{,}25\cdot 6{,}28\cdot 0{,}2\cdot 10^{-3}} = 2\cdot10^3\ (Гц) = 2\ кГц.$$

Ответ: 2 кГц.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант № 11

Задача 1.

Материальная точка совершает синусоидальные колебания с амплитудой 4 см и начальной фазой $\frac{\pi}{6}$. Если период этих колебаний равен 1,2 с, то чему будет равно смещение точки от положения равновесия через 0,2 с после начала колебаний?

Ответ: 4 см.

Задача 2.

Период колебания тела массой 200 г, подвешенного на нити длиной 1 м (математический маятник), и этого же тела, подвешенного на пружине (пружинный маятник), равны. Чему должна равняться жесткость пружины в этом случае?

Ответ: $2\ \frac{Н}{м}$.

Задача 3.

Период колебаний математического маятника в неподвижном лифте равен $T = 1$ с. Какова величина ускорения лифта, если период колебаний стал равным $T_1 = 1{,}1$ с?

Ответ: $1{,}74\ \frac{м}{с^2}$.

Задача 4.

Два математических маятника имеют периоды колебаний T_1 и T_2, причем известно, что $T_1 = 2T_2$. Разность длин этих маятников составляет 30 см. Чему равны длины первого и второго маятников?

Ответ: $l_1 = 40$ см; $l_2 = 10$ см.

Задача 5.

Колебательный контур состоит из катушки и двух одинаковых конденсаторов, включенных параллельно. Во сколько раз изменится частота собственных колебаний, если эти конденсаторы включить последовательно?

Ответ: увеличится в 2 раза.

Задача 6.

За какой промежуток времени распространится звуковая волна в воде на расстояние 7,7 км, если длина волны равна 7 м, а частота колебаний 220 Гц?

Ответ: 5 с.

Задача 7.

Изменение тока в антенне радиопередатчика происходит по закону $I = 0{,}3\sin 15{,}7\cdot 10^5 t$ (А). Найти длину излучаемой электромагнитной волны.

Ответ: $1{,}2\cdot 10^3$ м.

Задача 8.

Груз массой 8 кг, подвешенный на пружине, совершает гармонические колебания с периодом T. Какой груз нужно снять, чтобы период колебаний сократился до $\frac{T}{2}$?

Ответ: 6 кг.

Задача 9.

Середина колеблющейся струны имеет максимальное ускорение $2{,}02\cdot 10^3\ \frac{м}{с^2}$. Определить частоту колебаний, если амплитуда колебаний 2 мм.

Ответ: 160 $с^{-1}$.

Задача 10.

Секундный маятник перенесли на поверхность Луны. Чему стал равен период колебаний этого маятника? Уско-

рение свободного падения на Луне в 6 раз меньше ускорения свободного падения на Земле.

Ответ: 2,45 с.

Задача 11.

Конденсатор емкостью 10 мкФ подключен к генератору переменного тока с частотой 410 Гц и действующим значением напряжения 220 В. Чему равно амплитудное значение силы тока, протекающего через конденсатор? (*ответ округлить до целых*).

Ответ: 8 А.

Задача 12.

Тело массы $m = 0{,}9$ кг, подвешенное на пружине жесткостью $k = 0{,}1\ \frac{Н}{м}$, совершает малые гармонические колебания. Если амплитуда колебаний равна 15 см, то максимальная скорость движения тела равна ... $\frac{см}{с}$ (*Ответ округлите до целого*).

Ответ: 5 $\frac{см}{с}$.

Тест № 11

Задача 1.

Какой должна быть индуктивность L, катушки в контуре (рис. 260), чтобы при переводе ключа К из положения 1 в положение 2 период собственных электромагнитных колебаний в контуре уменьшился в 3 раза?

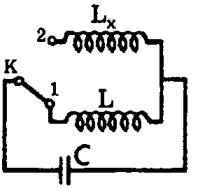


Рис. 260

1) $\frac{1}{9}L$; 2) $\frac{1}{3}L$; 3) $3L$; 4) $9L$.

Задача 2.

Изменение электрического тока в контуре происходит по закону $I = 0{,}01\cos 20t$ (А). Чему равна частота колебаний заряда на конденсаторе контура?

1) 0,01 Гц; 2) 20 Гц; 3) 20π Гц;

4) $\frac{10}{\pi}$ Гц; 5) 10π Гц.

Задача 3.

Резонансная частота электрического колебательного контура равна 50 кГц. Как нужно изменить расстояние между пластинами плоского конденсатора, чтобы резонансная частота стала равной 70 кГц? Сопротивлением контура пренебречь.

1) увеличить в 1,40 раз; 2) уменьшить в 1,40 раз;
3) увеличить в 1,96 раз; 4) уменьшить в 1,96 раз;
5) увеличить в 1,20 раз.

Задача 4.

Тело массы 5 кг совершает гармонические колебания с амплитудой 10 см. Если максимальная кинетическая энергия колеблющегося тела равна 2,5 Дж, то период колебаний равен:

1) 2,12 с; 2) 0,86 с; 3) 0,72 с; 4) 0,63 с; 5) 0,38 с.

Задача 5.

Стальную деталь проверяют ультразвуковым дефектоскопом, работающим на частоте 1 МГц. Отраженный от дефекта сигнал возвратился на поверхность детали через 8 с после посылки. Если длина ультразвуковой волны в стали равна 5 мм, то дефект находился на глубине:

1) 40 мм; 2) 20 мм; 3) 12 мм; 4) 8 мм; 5) 4 мм.

Задача 6.

Какое время t в течение одного периода T груз маятника находится на расстоянии не далее 1 см от положения равновесия, если амплитуда его гармонических колебаний равна 2 см ?

1) $\frac{T}{2}$ 2) $\frac{T}{3}$ 3) $\frac{T}{6}$ 4) $\frac{T}{12}$ 5) T.

Задача 7.

Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = 4 \sin 2\pi t$ (м). Определить скорость в момент времени, равный 0,5 с от начала движения.

1) $8\pi \frac{м}{с}$; 2) $4\pi \frac{м}{с}$; 3) $0 \frac{м}{с}$;
4) $4\pi \frac{м}{с}$; 5) $8\pi \frac{м}{с}$.

Задача 8.

Шарик массой 10 г совершает гармонические колебания с амплитудой 3 см и частотой 10 $с^{-1}$. Максимальное значение возвращающей силы, действующей на шарик, равно:

1) 0,5 Н; 2) 1,0 Н; 3) 1,2 Н; 4) 5,0 Н; 5) 10,0 Н.

Задача 9.

Если звуковая волна с частотой колебаний 500 Гц распространяется в стальном стержне со скоростью 2 $\frac{км}{с}$, то расстояние между ближайшими точками волны, отличающимися по фазе на $\frac{\pi}{2}$, будет равно:

1) 1 м; 2) 2 м; 3) 4 м; 4) 6 м; 5) 8 м.

Задача 10.

Как изменится период колебаний в электрическом контуре, если емкость уменьшится в 2 раза, а индуктивность возрастет в 8 раз?

1) увеличится в $\sqrt{2}$ раз;
2) уменьшится в два раза;
3) увеличится в 2 раза;
4) увеличится в 4 раза;
5) уменьшится в 4 раза.

Задача 11.

На рисунке 261 показаны направления скоростей двух точек упругой среды в волновом процессе. Волна –

1) поперечная, распространяется вдоль оси OX вправо;
2) поперечная, распространяется вдоль оси OX влево;
3) поперечная, стоячая;
4) продольная, распространяется вдоль оси OX вправо;
5) продольная, распространяется вдоль оси OX влево.

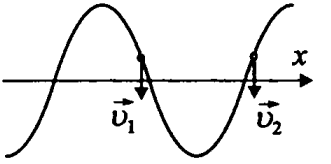


Рис. 261

Задача 12.

При малых колебаниях математического маятника длиной L = 0,5 м косинус максимального отклонения маятника от вертикали равен 0,9. В тот момент, когда косинус угла отклонения маятника от вертикали равен 0,949, скорость движения маятника равна:

1) 0,5 $\frac{м}{с}$; 2) 0,7 $\frac{м}{с}$; 3) 0,9 $\frac{м}{с}$; 4) 0,3 $\frac{м}{с}$; 5) 1 $\frac{м}{с}$.

ГЛАВА 9.
ОПТИКА

Программа по физике содержит следующие вопросы по данному разделу:

Закон прямолинейного распространения света. Законы отражения и преломления света. Луч. Показатель преломления. Полное внутренне отражение. Предельный угол полного внутреннего отражения. Ход лучей в призме. Построение изображений в плоском зеркале.

Собирающая и рассеивающая линзы. Формула тонкой линзы. Фокусное расстояние и увеличение линзы. Построение изображений в линзах. Фотоаппарат. Глаз. Очки.

Свет — электромагнитная волна. Скорость света и ее опытное определение. Дисперсия. Шкала электромагнитных волн. Интерференция света и ее применение в технике. Дифракция света. Дифракционная решетка. Поперечность световых волн. Поляризация света.

Измерение фокусного расстояния собирающей линзы, показателя преломления вещества, длины волны света.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Оптика — раздел физики, изучающий оптическое излучение (свет), процесс его распространения и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества.

Можно выделить геометрическую и волновую оптику. В волновой оптике свет рассматривается как электромагнитная волна.

В геометрической оптике считается, что свет распространяется вдоль линий, называемых ***лучами***. Это позволяет сформулировать законы оптики на языке геометрии.

9.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

9.1.1. Законы геометрической оптики

Закон прямолинейного распространения света: свет в однородной среде распространяется прямолинейно. Это доказывается образованием тени за непрозрачными предметами.

Законы отражения света:

- Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения луча на границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости (рис. 262).
- Угол падения равен углу отражения: $\angle\alpha = \angle\beta$.

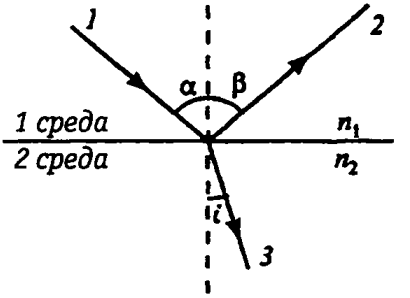


Рис. 262

Законы преломления света:

- Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения луча на границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости.
- Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin i} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}.$$

Относительным показателем преломления $n_{2,1}$ второй среды относительно первой называется отношение скоростей света υ_1 и υ_2 соответственно в первой и во второй средах:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2},$$

где n_2 и n_1 — абсолютные показатели преломления сред.

Если $\frac{n_2}{n_1} > 1$, то вторая среда называется ***оптически более плотной***, чем первая среда.

Абсолютный показатель преломления среды равен отношению скорости света в вакууме c к скорости света υ в данной среде:

$$n = \frac{c}{\upsilon} = \sqrt{\varepsilon\mu},$$

где ε и μ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

9.1.2. Полное внутреннее отражение

Если луч света проходит из более плотной среды в менее плотную ($n_2 > n_1$), то при некотором угле падения луча, который называют ***предельным*** ($\alpha_{пр}$), преломленный луч (рис. 263) скользит по границе раздела сред, т.е. луч не проходит во вторую среду. В этом случае угол преломления $\gamma = 90°$.

Предельный угол полного внутреннего отражения $\alpha_{пр}$ определяется из соотношения:

$$\sin\alpha_{пр} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n}, (n_2 = 1),$$

где n_2 и n_1 — абсолютные показатели преломления сред.

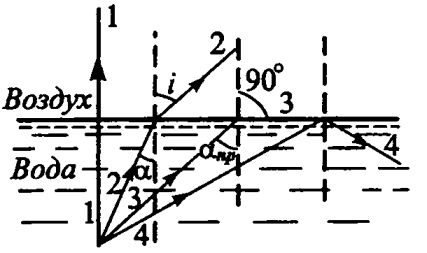


Рис. 263

При дальнейшем увеличении угла падения световой луч не выходит из оптически более плотной среды, а отражается от границы раздела внутрь ее.

Это используется:

- в световодах;
- при огранке алмазов;
- в призмах.

Предельные уголы полного внутреннего отражения различных веществ представлены в таблице:

Вещество	$\alpha_{пр}$	Вещество	$\alpha_{пр}$
Алмаз	24°	Стекло «легкий крон», кварц	42°
Вода	49°	Стекло «тяжелый флинт»	35°
Соль	42°	Сахар	42°

9.1.3. Призмы

В треугольной призме луч света отклоняется в сторону основания призмы, если она выполнена из вещества оптически более плотного, чем окружающая среда (рис. 264).

Изображение предмета S^1 на рисунке 264 при рассмотрении его через такую призму — мнимое и отклонено к вершине преломляющего угла.

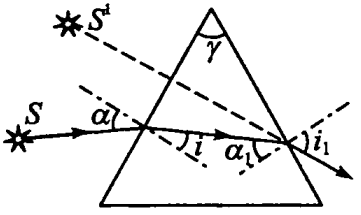


Рис. 264

Если тот же световой луч проходит через призму, выполненую из вещества менее оптически плотного, чем окружающая среда, то луч отклоняется в сторону, противоположную основанию призмы (рис. 265).

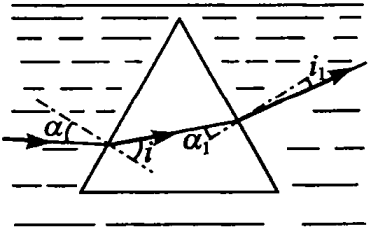


Рис. 265

Призмы бывают:

а) поворотными (рис. 266, а) — поворачивают луч на 90°;

б) обращающими (рис. 266, б) — меняют лучи местами.

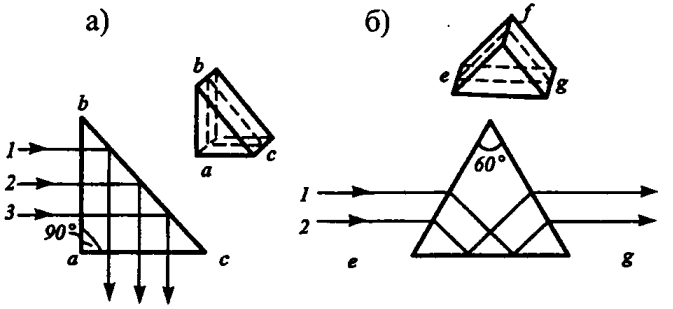


Рис. 266

9.1.4. Плоское зеркало

Плоское зеркало дает изображение, находящееся на перпендикуляре за зеркалом, на таком же расстоянии d, как и предмет от зеркала Z (рис. 267). Для зеркала выполняются законы отражения. Рисунок 267 иллюстрирует построение изображений в плоском зеркале.

Изображение предмета всегда будет симметрично предмету относительно плоскости зеркала.

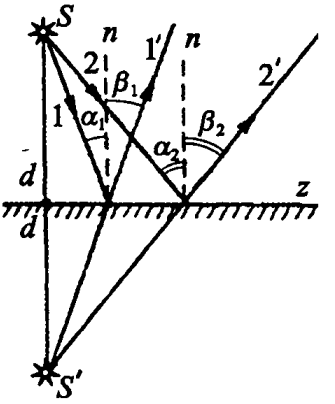


Рис. 267

9.1.5. Линзы

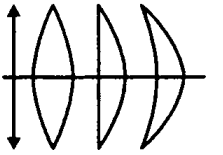
Линзой называется прозрачное для света тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями. Линзы бывают:

• ***собирающие*** (рис. 268):

а) двояковыпуклая;

б) плосковыпуклая;

в) выпукловогнутая.



а) б) в)

Рис. 268

Отличительной особенностью этих линз является то, что середина у них толще краев;

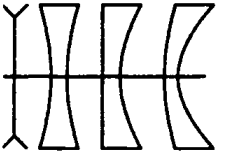
и

• ***рассеивающие*** (рис. 269):

г) двояковогнутая;

д) плосковогнутая;

е) вогнутовыпуклая.



г) д) е)

Рис. 269

Отличительная особенность этих линз — края толще середины.

9.1.5.1. Основные точки линзы

На рисунке 270 представлены основные точки собирающей линзы. У рассеивающей они будут аналогичными.

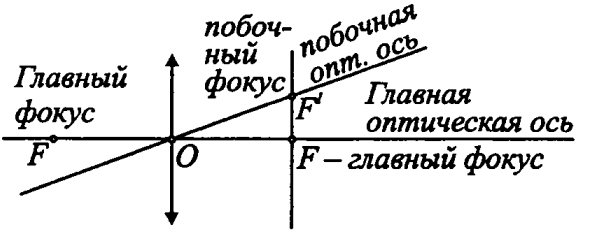


Рис. 270

Точка О называется ***оптическим центром линзы***. Проходя через нее, лучи не преломляются.

Все остальные лучи света, пройдя через линзу, испытывают ***преломление***.

Если световые лучи падают на ***собирающую*** линзу параллельно главной оптической оси линзы (рис. 271), то после линзы они собираются в одной точке, называемой главным фокусом линзы.

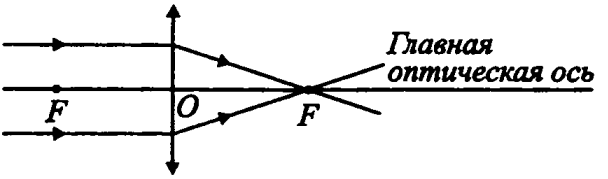


Рис. 271

Если лучи падают на ***рассеивающую*** линзу параллельно ее главной оптической оси, то после линзы они рассеиваются (рис. 272): собираются в ***мнимом*** фокусе, в отличие от собирающей линзы, где фокус — ***действительный***.

У линзы два главных фокуса.

Линия, проходящая через точки О и F называется ***главной оптической осью***.

Любая прямая, проведенная через оптический центр линзы О, называется ***побочной оптической осью***.

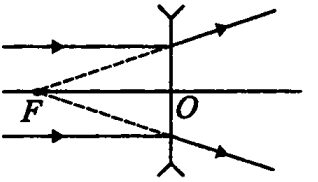


Рис. 272

Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проведенная через фокус, называется ***фокальной плоскостью***.

Пересечение фокальной плоскости с любой побочной осью дает ***побочный фокус*** F^1.

Фокальная плоскость является геометрическим местом побочных фокусов.

Лучи, параллельные побочной оптической оси, соберутся в ***побочном фокусе*** F^1 (рис. 273).

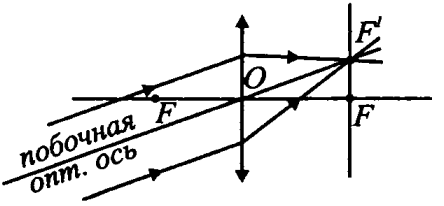


Рис. 273

9.1.5.2. Формулы линзы

Для получения изображений в линзе можно воспользоваться тремя лучами, изображенными на рисунке 274:

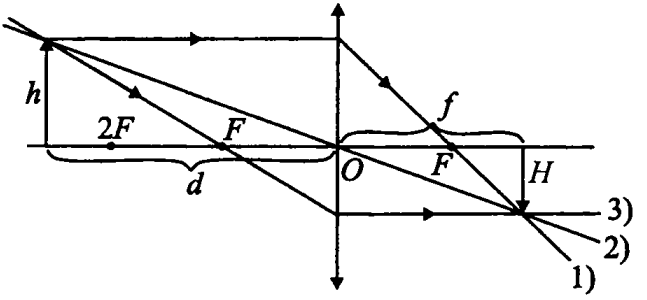


Рис. 274

1) луч, параллельный главной оптической оси, после линзы проходит через фокус;

2) луч, проходящий через оптический центр линзы, после линзы не преломляется;

3) луч, проходящий через фокус, а затем, после линзы, — параллельно главной оптической оси.

Здесь h — высота предмета;

H — высота изображения предмета;

d — расстояние от предмета до линзы;

f — расстояние от изображения до линзы, которые отсчитываются от оптического центра линзы вдоль ее главной оптической оси;

F — фокусное расстояние линзы.

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}.$$

Эта формула только связывает между собой три величины: F фокусное расстояние линзы, расстояние от предмета до линзы d и расстояние от изображения до линзы f.

Фокус линзы не зависит ни от d, ни от f. Он зависит только от n, R_1 и R_2:

формула толстой линзы:

$$D=\frac{1}{F}=(n-1)(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}),$$

где n — показатель преломления вещества, из которого сделана линза;

R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы;

D — ***оптическая сила линзы.***

$$D=\frac{1}{F}.\ [D]=\frac{1}{м}=диоптрия=дптр.$$

Увеличение линзы k:

$$k=\frac{f}{d}=\frac{H}{h}.$$

9.5.1.3. Построение изображений в собирающей линзе

Рассмотрим различные случаи построения изображений в собирающей линзе.

1) $d>2F$

Изображение действительное (по разные стороны от линзы расположены предмет и его изображение), обратное (перевернутое) и уменьшенное. Этот случай соответствует фотоаппарату (рис. 275), когда мы фотографируем предмет на расстоянии, много большим двойного фокусного расстояния объектива.

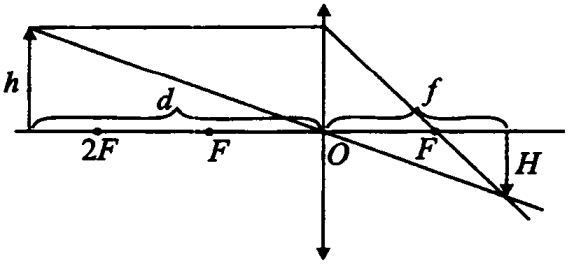


Рис. 275

2) $F < d < 2F$

Изображение действительное, обратное (перевернутое), увеличенное (рис. 276). Это — случай проекционного фонаря.

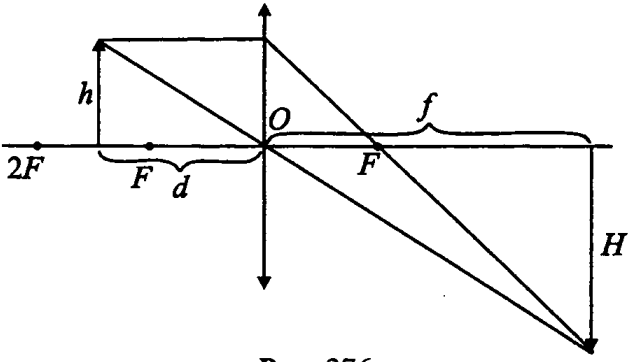


Рис. 276

3) $d < F$

В этом случае изображение получается ***мнимым*** (по одну сторону линзы с предметом: рис. 277) $\Rightarrow f < 0$ в формуле линзы, ***увеличенным*** (лупа). Формула тонкой линзы для этого случая:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}.$$

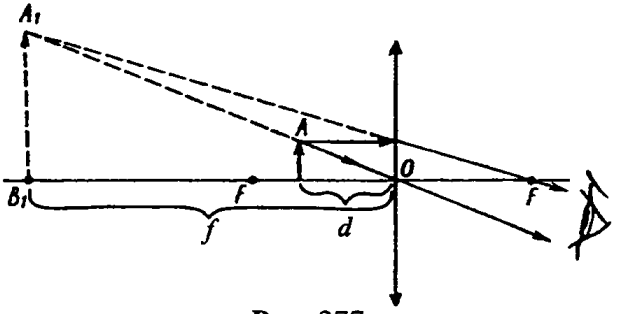


Рис. 277

4) $d = 2F$

Если предмет находится от линзы на расстоянии, равном двойному фокусному, то изображение получится в натуральную величину (рис. 276):

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{2F}+\frac{1}{2F}\Rightarrow d=f\Rightarrow k=\frac{f}{d}=1.$$

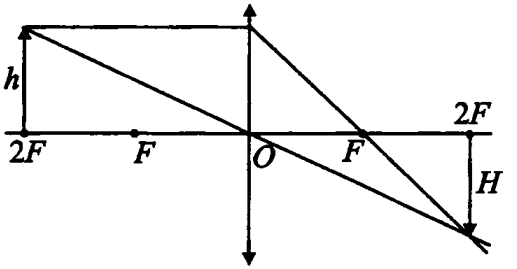


Рис. 278

5) $d=\infty$

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{\infty}+\frac{1}{f}\Rightarrow$$

$f=F\Rightarrow$ Изображение получается в фокусе (рис. 279). Так от солнечных лучей с помощью большой лупы зажигают олимпийский огонь.

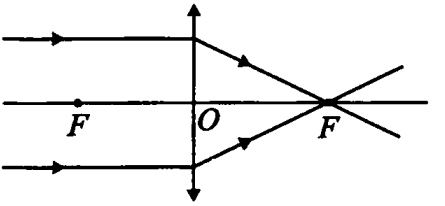


Рис. 279

6) $d=F$

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{F}+\frac{1}{f}\Rightarrow f=\infty,$$

т.е. линии никогда не пересекутся и изображение получится в бесконечности (рис. 280).

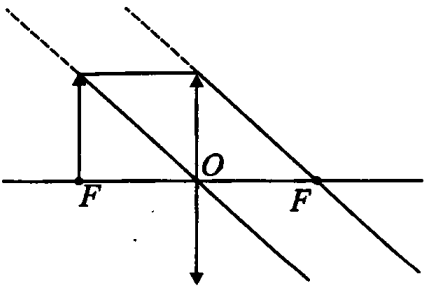


Рис. 280

Таким образом, изображение предметов в собирающей линзе могут быть:

- действительными и мнимыми;
- прямыми и обратными;
- увеличенными и уменьшенными.

9.1.5.5. Построение изображений в рассеивающей линзе

В рассеивающей линзе лучи после прохождения линзы соберутся в мнимом фокусе, т.е. $F < 0$. $\Rightarrow$

В рассеивающей линзе ***во всех случаях*** изображение ***всегда уменьшенное*** и ***мнимое*** (рис. 281).

$f < 0$. $\Rightarrow$

Для рассеивающей линзы:

$F < 0, f < 0, R < 0 \Rightarrow$

Формула тонкой рассеивающей линзы:

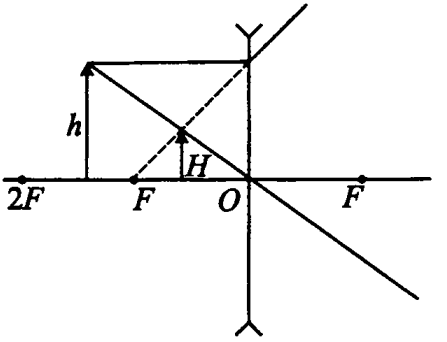


Рис. 281

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}, \text{ а } k < 1 \text{ всегда.}$$

Таким образом ***формула тонкой линзы для всех видов линз и всех случаев:***

$$\pm\frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}.$$

При записи формулы тонкой линзы особое внимание нужно обратить на знаки, помня, что все ***мнимые расстояния берутся со знаком минус.***

9.2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Во многих явлениях свет проявляет себя как электромагнитная волна.

Длины волн видимого света в вакууме лежат в пределах от 390 до 770 нм.

Частота излучения определенного вида при переходе из одной среды в другую не меняется, т.е. ***всегда по-***

стоянна, в то время, когда соответствующая ей длина волны зависит от фазовой скорости света в данной среде.

К явлениям, подтверждающим волновую природу света, относятся: дисперсия, интерференция, дифракция и поляризация света.

9.2.1. Дисперсия света

Дисперсия — явление разложения белого света в спектр. Для получения спектров свет пропускают через ***стеклянную призму*** или ***дифракционную решетку***. Ньютон выделил 7 цветов спектра (радуга): красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый («каждый охотник желает знать, где сидит фазан»). Объясняется дисперсия ***зависимостью показателя преломления среды от длины волны***.

Угол δ между направлениями луча, падающего на призму и вышедшего из нее, называют ***углом отклонения***. Угол отклонения зависит от преломляющего угла A и от угла падения α луча на преломляющую грань призмы (рис. 282).

Показатель преломления вещества для световых волн различной длины различен, поэтому лучи разной длины волны отклоняются трехгранной призмой на разные углы. Чем ***короче длина света***, тем сильнее лучи этой длины волны отклоняются.

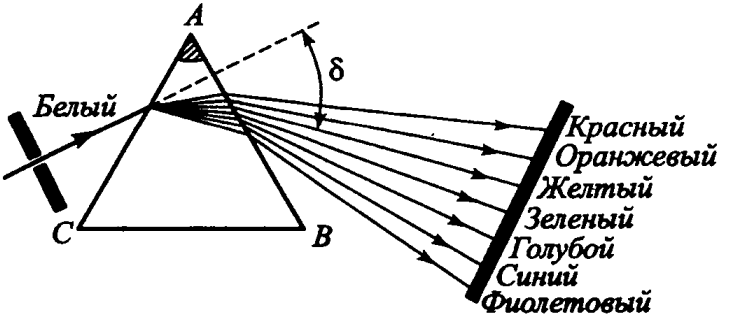


Рис. 282

9.2.2. Интерференция света

Интерференция — явление наложения волн, идущих от когерентных источников (рис. 283).

Два независимых источника света, например две электролампы, не когерентны. Когерентные волны получаются посредством разделения пучка света от одного источника на два или несколько отдельных пучков, а затем их направляет в одну и ту же сторону.

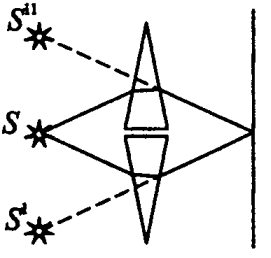


Рис. 283

Когерентными называются источники, имеющие одну частоту, постоянную разность фаз и одинаковую плоскость колебания вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$.

При интерференции происходит перераспределение светового потока в пространстве и получается устойчивая во времени картина распределения интенсивности в виде чередующихся максимумов и минимумов.

Условие максимума: если разность хода Δl интерферирующих лучей равна четному числу длин полуволн, то интенсивность света усиливается:

$$\Delta l = 2\kappa\frac{\lambda}{2} = \kappa\lambda,$$

где k — целое число (0, 1, 2 ...).

Условие минимума: если разность хода равна нечетному числу длин полуволн, то происходит взаимная компенсация волн и интенсивность уменьшается:

$$\Delta l = (2\kappa + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

На рисунке 284 показаны два когерентных источника (S_1 и S_2), находящиеся на расстоянии d друг от друга и отстоящие от экрана на расстоянии L, где получается изобра-

жение интерференционного максимума на расстоянии x от центрального максимума ⇒

$$\frac{d \cdot x}{L} = k\lambda \text{ — } \textbf{\textit{условие максимума}},$$

где k — порядок интерференционного максимума;

λ — длина волны падающего света.

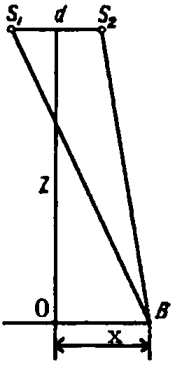


Рис. 284

Явлением интерференции объясняются радужные цвета:

- тонких пленок на поверхности воды, покрытой нефтью, маслом;
- крыльев насекомых;
- мыльного пузыря;
- пленок окислов на поверхности металлов.

Явление интерференции применяется в «просветленной» оптике, когда на поверхность объективов фото и видеокамер, оптических прицелов, биноклей, перископов подводных лодок наносится интерференционная пленка, из-за которой свет от поверхности не отражается.

9.2.3. Дифракция света

Дифракция — это явление огибания волнами препятствий. Для световых волн это означает, что свет заходит в область геометрической тени

Основное условие: ***длина волны должна быть сравнима с размерами препятствия***.

Дифракция бывает на щели и на решетке. Сфокусированный при помощи линзы параллельный пучок света образует в результате дифракции на экране чередование максимумов и минимумов освещенности (рис. 285).

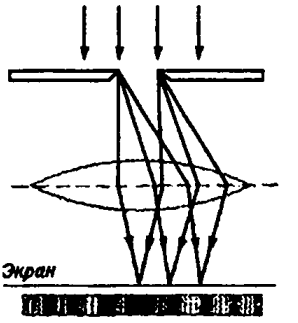


Рис. 285

Дифракционной решеткой называется совокупность многих щелей, разделенных непрозрачными промежутками. На стекло размером примерно 1 см^2 алмазным резцом по специальной технологии наносятся царапины, которые являются штрихами. На 1 мм может быть нанесено 500 и больше штрихов.

Периодом дифракционной решетки d называется общая ширина щели и непрозрачного промежутка (штриха):

$$d = \frac{1}{N},$$

где N — число штрихов на единицу длины.

$$[N] = \frac{1}{м}.$$

Условие максимума для дифракционной решетки:

на разности хода лучей $d\sin\varphi$ укладывается ***четное число*** ($2k$) ***длин полуволн*** ($\frac{\lambda}{2}$):

$$d\sin\varphi = k\lambda,$$

$к$ — порядок дифракционного максимума.

При малых углах $\sin\varphi = \mathrm{tg}\varphi = \frac{x}{L}$,

где L — расстояние от решетки до экрана;

x — расстояние между центральным и k–м максимумами.

$\Rightarrow$ ***условие максимума для дифракционной решетки***:

$$\frac{dx}{L} = k\lambda.$$

Наибольший порядок дифракционного максимума должен быть только ***целым*** и не может быть округлен в сторону максимума. Общее число максимумов складывается из удвоенного порядка и нулевого (центрального) максимума (рис. 286).

С увеличением числа щелей дифракционной решетки:

- растет яркость главных максимумов;
- максимумы становятся уже

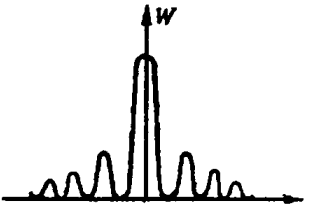


Рис. 286

Условие минимума для дифракционной решетки:

$$d\sin\varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow$$

на разности хода укладывается ***нечетное число длин полуволн***.

Максимумы для различных длин волн располагаются под различными углами φ к первоначальному распространению света $\Rightarrow$ дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр и применяется как ***дисперсионный прибор***.

9.2.4. Поляризация света

Поляризованной называется волна, в которой существует предпочтительное направление колебаний.

Поляризация возможна только у ***поперечных*** волн. Естественный свет неполяризован, так как он излучается атомами с совершенно произвольной ориентацией в пространстве и в каждой точке луча направление вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ произвольно.

На рисунке 287 продемонстрирована сущность поперечных механических волн: а) поперечная волна на шнуре свободно проходит через ящики при параллельном расположении щелей; б) второй ящик гасит волну, когда его щель перпендикулярна колебаниям на шнуре; в) ящик пропускает только ту волну, в которой колебания параллельны его щели.

Если колебания вектора $\vec{E}$ происходят вдоль одной линии, такой свет называется ***линейно-поляризованным***, если в одной плоскости — ***плоско поляризованным***.

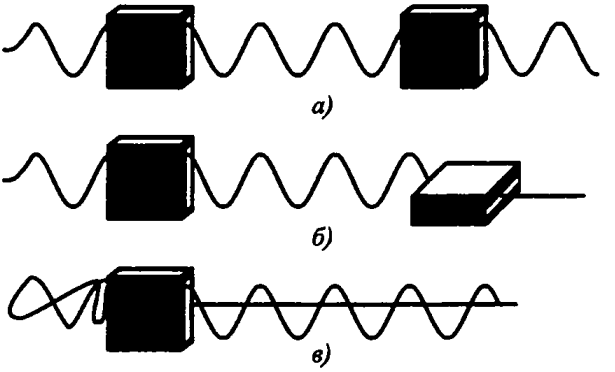


Рис. 287

Явление поляризации применяется:

- в лампах хирургических операционных, стоматологических кабинетов;
- в затененных стеклах автомобилей, домов, когда снаружи не видно, что происходит внутри;
- очки-хамелеоны, меняющие пропускную способность при изменении освещенности.

9.2.5. Шкала электромагнитных волн

Длина электромагнитных волн, к которым относятся радиолволны, инфракрасные, световые и ультрафиолетовые волны, рентгеновские и гамма-лучи, изменяется в больших пределах. Примерные границы для электромагнитных волн различной длины:

№ п/п	*Типы волн*	*Длина волны λ*
1.	Радиоволны	30 км ÷ 1 мм
2.	Инфракрасные волны	1 мм ÷ 0,7 мкм
3.	Световые волны	0,7 мкм ÷ 0,4 мкм
4.	Ультрафиолетовые волны	0,4 мкм ÷ 5 нм
5.	Рентгеновские лучи	5 нм ÷ 4 нм
6.	Гамма-лучи	4 нм ÷ 0,1 пм

Указания к решению задач

1. Задачи, в которых требуется определить ход светового луча при наличии одной или нескольких преломляющих плоскостей (например, ход луча через призму), решают с помощью закона преломления, применяя его поочередно к каждому случаю преломления на границе двух сред и используя геометрические соотношения, вытекающие из условия задачи.

2. Задачи на определение размеров и взаимного расположения изображений, предметов и линз начинают с выполнения построений. Построив изображение предмета и обозначив расстояния от предмета и изображения до линзы, можно перейти к составлению уравнений, основными из которых являются увеличение линзы и формула линзы.

3. Если в задачах говорится о наложении линий в дифракционном спектре, это означает, что углы, под которыми видны дифракционные максимумы, будут одинаковыми.

Примеры решения задач

Задача 1.

Объектив фотоаппарата имеет фокусное расстояние 50 мм. С какой выдержкой надо снять автомобиль, находящийся на расстоянии 2 км от фотоаппарата и движущийся равномерно со скоростью 72 $\frac{км}{ч}$ перпендикулярно оптической оси фотоаппарата, чтобы его изображение на снимке переместилось за это время на расстояние 0,005 мм? Построить изображение.

Дано:	СИ
$F = 50$ мм	$= 5\cdot10^{-2}$ м
$\upsilon = 72\ \frac{км}{ч}$	$= 20\ \frac{м}{с}$
$d = 2$ км	$= 2\cdot10^{3}$ м
$S_1 = 0{,}005$ мм	$= 5\cdot10^{-6}$ м
$t - ?$	

Решение:

В случае фотоаппарата расстояние от предмета до линзы d должно быть больше двойного фокусного расстояния $2F$:

$d > 2F \Rightarrow$

получается действительное, уменьшенное и перевернутое изображение предмета на пленке.

Для построения изображения автомобиля (предмета *AB)* рассмотрим два луча (рис. 288, а): один из лучей, падающий параллельно главной оптической оси, преломившись, пойдет через фокус *F* объектива фотоаппарата; другой, идущий через оптический центр объектива *O*, не изменит своего направления. Точка пересечения A_1 преломленных лучей является действительным изображением точки *A*. Опуская из точки A_1 перпендикуляр на главную оптическую ось, получим действительное, уменьшенное и перевернутое изображение A_1B_1 предмета *AB*.

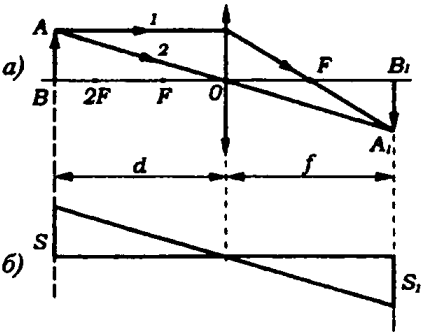


Рис. 288

За время выдержки *t* автомобиль переместится на расстояние *s*, равное;

$$s = \upsilon t, \Rightarrow t = \frac{s}{\upsilon}.$$

Из рисунка 288, *б* следует, что

$$\frac{s}{s_1} = \frac{d}{f} \Rightarrow s = \frac{s_1 d}{f}.$$

Расстояние *f* найдем из формулы собирающей линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \Rightarrow f = \frac{d \cdot F}{d - F} \Rightarrow s = \frac{s_1 d(d-F)}{d \cdot F} = \frac{s_1(d-F)}{F} \Rightarrow$$

$$t = \frac{s_1(d-F)}{F \cdot \upsilon} \approx \frac{s_1 d}{F \cdot \upsilon} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 20} = 10^{-2} \text{ (с)}.$$

Ответ: $t = 10^{-2}$ с.

Задача 2.

Пучок лучей, параллельных главной оптической оси, падает на двояковыпуклую линзу, главное фокусное расстояние которой 12 см. На расстоянии 14 см от первой линзы расположена вторая двояковыпуклая линза с главным фокусным расстоянием 2 см. Главные оптические оси линз совпадают. Где получится изображение? Какова оптическая сила данной системы линз?

Дано:
$F_1 = 12$ см
$l = 14$ см
$F_2 = 2$ см

$D - ?$

Решение:

Построим ход лучей в данной оптической системе (рис. 289).

Из рисунка видно, что фокусы F_1 и F_2, линз совпадают. Следовательно, выходящий из второй линзы пучок лучей параллелен главной оптической оси ⇒ изображения не будет (находится в бесконечности).

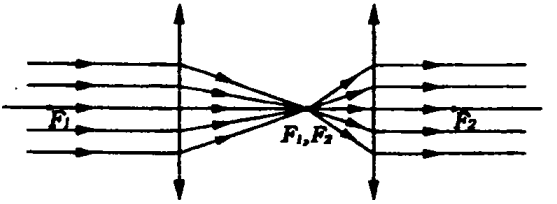


Рис. 289

Оптическая сила D системы линз равна:

$D = D_1 + D_2$,

где D_1 — оптическая сила первой линзы;

D_2 — оптическая сила второй линзы.

Учитывая, что $D_1 = \frac{1}{F_1}$ и $D_2 = \frac{1}{F_2}$,

получим:

$$D = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} = \frac{F_1 + F_2}{F_1 F_2} = \frac{0{,}12 + 0{,}02}{0{,}12 \cdot 0{,}02} = 58{,}5 \text{ (дптр)}.$$

Ответ: $D = 58{,}5$ дптр.

Задача 3.

Как изменится фокусное расстояние и оптическая сила двояковыпуклой стеклянной линзы с радиусами кривизны R_1 и R_2, если линзу погрузить в среду с показателем преломления n_1' ($n_1' = 1{,}58$), большим, чем показатель преломления стекла n_2?

Дано:

R_1

R_2

$n_1' = 1{,}58$

$n_1' > n_2$

$\frac{F'}{F}$ – ?

$\frac{D'}{D}$ – ?

Решение:

Если световой луч из линзы выходит в воздух, а R_1 и R_2 — радиусы кривизны линзы, то фокусное расстояние линзы определяется по формуле:

$$F' = \frac{1}{(n_{2,1} - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)},$$

где относительный показатель преломления стекла $n_{2,1}$:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

При погружении линзы в среду с показателем преломления n_1' фокусное расстояние определяется по той же формуле:

$$F' = \frac{1}{(n_{2,1}' - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}.$$

Отношение фокусных расстояний:

$$\frac{F'}{F} = \frac{(n_{2,1} - 1)}{(n_{2,1}' - 1)} = \frac{1{,}5 - 1}{\frac{1{,}5}{1{,}58} - 1} = \frac{0{,}5}{-0{,}05} \Rightarrow$$

$$F' = -10F.$$

Знак минус означает, что ***собирающая линза*** при погружении ее в оптически более плотную среду ***становится рассеивающей*** ⇒ ее оптическая сила уменьшится в 10 раз:

$$D' = \frac{D}{10}.$$

Ответ: $F' = -10F$; $D' = \frac{D}{10}$.

Задача 4.

Дифракционная решетка имеет 50 штрихов на 1 мм длины. Под каким углом виден максимум второго порядка света с длиной волны 400 нм?

Дано:	**СИ**
$N = 50\ \frac{1}{мм}$	$= 5 \cdot 10^4\ \frac{1}{м}$
$\lambda = 400$ нм	$= 4 \cdot 10^{-7}$ м
$k = 2$	
$\varphi - ?$	

Решение:

Условие максимума для дифракционной решетки:

$d\sin\varphi = k\lambda$,

где $d\sin\varphi$ — разность хода лучей;

d — период дифракционной решетки:

$$d = \frac{1}{N};$$

k — порядок дифракционного максимума. ⇒

$$\sin\varphi = \frac{k\lambda}{d} = k\lambda N = 2 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^4 = 4 \cdot 10^{-2} \Rightarrow$$

$\varphi = \arcsin 0{,}04$.

Ответ: $\varphi = \arcsin 0{,}04$.

Задача 5.

Точечный источник света движется к плоскому зеркалу со скоростью 0,1 $\frac{м}{с}$ в направлении, составляющем угол 30° с плоскостью зеркала. С какой относительной

скоростью сближаются источник и его изображение в зеркале?

1) 0,20 $\frac{м}{с}$; 2) 0,10 $\frac{м}{с}$; 3) 0,15 $\frac{м}{с}$;

4) 0,05 $\frac{м}{с}$; 5) 0,17 $\frac{м}{с}$.

Дано:

$\upsilon = 0{,}1\ \frac{м}{с}$

$\alpha = 30°$

$\upsilon' - ?$

Решение:

Разложим скорость движения точечного источника света на составляющие υ_1 и υ_2 (рис. 290).

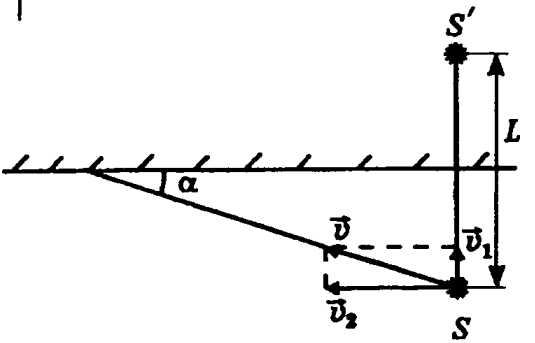


Рис. 290

Так как источник и его изображение будут сближаться, ⇒ расстояние L будет уменьшаться ⇒ надо рассматривать составляющую $\upsilon_1 = \upsilon\sin\alpha$.

С такой же скоростью будет приближаться и изображение ⇒

$$\upsilon' = 2\upsilon\sin\alpha = 2\upsilon\cdot\frac{1}{2} = \upsilon = 0{,}1(\frac{м}{с}).$$

Проанализировав ответы, выбираем ответ № 2.

Ответ: № 2.

Задача 6.

На какой угол повернется отраженный от зеркала солнечный луч при повороте зеркала на угол 30°?

1) 30°; 2) 60°; 3) 15°; 4) 0°; 5) 90°.

Решение:

Данная задача решается при помощи графического построения (рис. 291).

Если зеркало повернулось на угол φ, то на этот же угол повернулся и перпендикуляр к зеркалу $\Rightarrow$

падающим лучом стал угол $(\varphi + \alpha)$ $\Rightarrow$

отраженный о зеркала луч повернется на угол, равный 2φ:

$2\varphi = 60^{\circ}$.

Правильным будет ответ № 2.

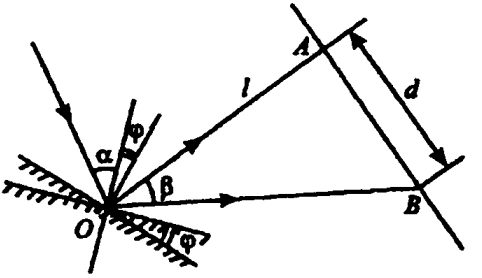


Рис. 291

Ответ: № 2.

Задача 7.

Частота световой волны при переходе из среды с абсолютным показателем преломления 2 в среду с абсолютным показателем преломления 1,5

1) уменьшается в $\frac{4}{3}$ раза; 2) уменьшается в 3 раза;

3) увеличивается в $\frac{4}{3}$ раза; 4) увеличивается в 3 раза;

5) не изменяется.

Решение:

Частота световой волны ***всегда постоянна***, в то время, как соответствующая ей длина волны зависит от фазовой скорости света в данной среде $\Rightarrow$ выбираем ответ № 5.

Ответ: № 5.

Задача 8.

Можно ли с помощью рассеивающей линзы получить действительное изображение предмета? Если да, то где его нужно расположить?

1) нет, нельзя;
2) да, между линзой и фокусом;
3) да, между фокусом и двойным фокусом;
4) да, в двойном фокусе;
5) да, за двойным фокусом.

Решение:

Рассеивающая линза при любом положении предмета дает только мнимое, уменьшенное изобораженне ⇒ правильным будет ответ № 1.

Ответ: № 1.

Задача 9.

Для определения длины волны света использовали дифракционную решетку с перидом $d = 0{,}01$ мм и экран, расположенный на расстоянии $L = 2$ м от решетки. Расстояние между центральным светлым пятном и соседним с ним $x = 10$ см (рис. 292). Чему равна длина волны света в нм?

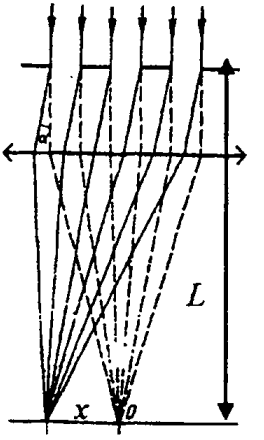


Рис. 292

Дано:	**СИ**
$d = 0{,}01$ мм	$= 10^{-5}$ м
$x = 10$ см	$= 10^{-1}$ м
$L = 2$ м	
$k = 1$	
$\lambda - ?$	

Решение:

Условие максимума для дифракционной решетки:

$$d\sin\varphi = k\lambda.$$

При малых углах $\sin\varphi = \mathrm{tg}\varphi = \dfrac{x}{L} \Rightarrow$

$$\frac{dx}{L} = k\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{dx}{kL} = \frac{10^{-5}\cdot 10^{-1}}{1\cdot 2} = 5\cdot 10^{-7}\,(\text{м}) = 500\ \text{нм}.$$

Ответ: $\lambda = 500$ нм.

Задача 10.

Человек высотой $h = 2$ м стоит на расстоянии $l = 50$ м от столба высотой $H = 10$ м. На вершине столба горит лампочка. На каком расстоянии от человека на линии, соединяющей основание столба и стопы человека, следует поместить маленькое зеркало, чтобы человек мог видеть в нем отражение лампочки?

Дано:
$h = 2$ м
$l = 50$ м
$H = 10$ м
$x - ?$

Решение:

На основании закона отражения света: угол падения равен углу отражения (рис. 293):

$\angle\alpha = \angle\beta \Rightarrow$

$tg\alpha = tg\beta \Rightarrow$

$$\Rightarrow \frac{x}{h} = \frac{l-x}{H} \Rightarrow xH = (l-x)h \Rightarrow$$

$$x = \frac{lh}{h+H} = \frac{50\cdot 2}{12} = 8{,}3\ (\text{м}).$$

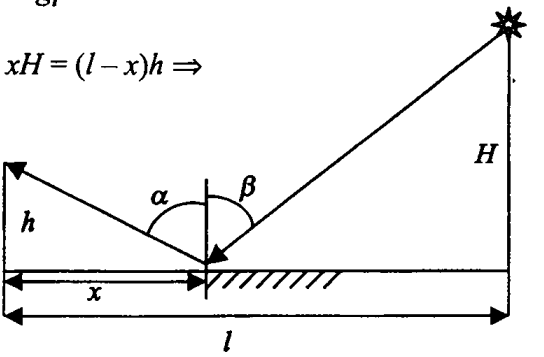


Рис. 293

Ответ: 8,3 м.

Задача 11.

Первый человек стоит сбоку от плоского зеркала O_1O_2 в точке А. Второй человек идет к зеркалу по прямой ОВ,

проходящей через середину. Если шаг сетки на рисунке 294 равен 1 м, то в момент, когда оба человека увидят друг друга в зеркале, расстояние от зеркала до второго человека будет равно:

1) 1 м; 2) 1,5 м; 3) 2 м; 4) 3 м; 5) 4 м.

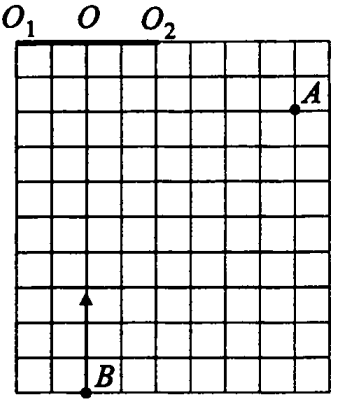


Рис. 294

Решение:

Чтобы оба человека увидели друг друга в зеркале, нужно, чтобы пересеклись лучи: падающий на край зеркала из точки А, а затем отраженный от зеркала в точке O_2 и продолжение луча из точки В. ⇒ Расстояние от зеркала до второго человека (рис. 295) будет равно 1 м. ⇒ Правильный ответ — № 1.

Ответ: № 1.

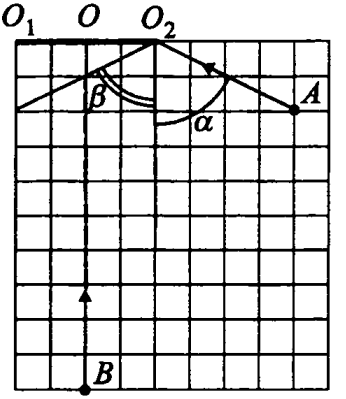


Рис. 295

Задача 12.

При помощи рассеивающей линзы получено уменьшенное в 1,5 раза изображение предмета. Если фокусное расстояние линзы равно 60 см, то расстояние от предмета до изображения равно … (см). (*Ответ округлите до целых.*)

Дано:	**СИ**
$F = 60$ см	$= 0{,}6$ м
$k = \dfrac{1}{1{,}5}$	$= \dfrac{2}{3}$
$(d - f) - ?$	

Решение:

Для рассеивающей линзы (рис. 296):

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}.$$

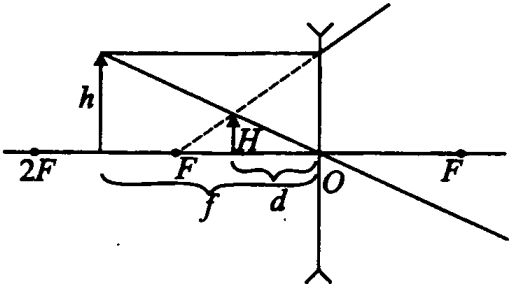


Рис. 296

Увеличение линзы:

$$k = \frac{f}{d} \Rightarrow f = kd = \frac{2d}{3} \Rightarrow$$

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{3}{2d} = -\frac{1}{2d} \Rightarrow d = \frac{F}{2} = 0{,}3 \text{ (м)}.$$

$$f = \frac{2 \cdot 0{,}3}{3} = 0{,}2 \text{ (м)}.$$

$$d - f = 0{,}3 - 0{,}2 = 0{,}1 \text{ (м)} = 10 \text{ см}.$$

Ответ: 10 см.

Вариант № 12

Задача 1.

Как изменится длина волны света при переходе из среды с абсолютным показателем преломления 2 в среду с абсолютным показателем преломления 1,5?

Ответ: увеличится в $\frac{4}{3}$ раза.

Задача 2.

Высота солнца над горизонтом составляет 46°. Чему должен быть равен угол падения световых лучей на плос-

кое зеркало, чтобы отраженные от плоского зеркала солнечные лучи пошли вертикально вниз?

Ответ: 68°.

Задача 3.

На каком расстоянии от собирающей линзы с фокусным расстоянием 20 см следует поместить источник света, чтобы его изображение было мнимым и увеличенным в 4 раза?

Ответ: 15 см.

Задача 4.

Оптическая сила объектива фотоаппарата 2,5 дптр. С какого расстояния нужно сфотографировать чертеж, чтобы на негативе получить его копию в масштабе 1:7?

Ответ: 3,2 м.

Задача 5.

Чему равен абсолютный показатель преломления среды, длина световой волны в которой равна $5 \cdot 10^{-7}$ м, а частота $5 \cdot 10^{14}$ Гц?

Ответ: 1,2.

Задача 6.

На дифракционную решетку с периодом 1,5 мм нормально падает белый свет. Чему равен угол между максимумом первого порядка для излучения с длиной волны λ_1 = 0,75 мкм и минус второго порядка излучения с длиной волны λ_2 = 0,375 мкм?

Ответ: 60°.

Задача 7.

При помощи дифракционной решетки с периодом 0,02 мм получено первое дифракционное изображение на

расстоянии 1,8 м от решетки и 3,6 см от центрального максимума. Найти длину световой волны.

Ответ: 0,4 мкм.

Задача 8.

Чему равна скорость распространения света в скипидаре, если при падении света на поверхность скипидара из вакуума угол падения равен 45°, а угол преломления 30°?

Ответ: $2{,}1 \cdot 10^8 \ \frac{м}{с}$.

Задача 9.

Если спектры третьего и четвертого порядков при дифракции белого света, нормально падающего на решетку, частично перекрываются, то какая длина волны спектра четвертого порядка накладывается на длину волны 780 нм спектра третьего порядка?

Ответ: 585 нм.

Задача 10.

На экране, расположенном на расстоянии L = 6 м от двух когерентных источников, лежащих в параллельной экрану плоскости, наблюдается интерференционная картина. Расстояние между двумя ближайшими светлыми полосками, лежащими по разные стороны плоскости симметрии установки, Δx = 4,8 мм. Расстояние между источниками света равно 1 мм. Чему равна длина световой волны в нм?

Ответ: 400 нм.

Задача 11.

На экране с помощью собирающей линзы получено уменьшенное в 3 раза изображение предмета. Если фокусное расстояние линзы равно 0,3 м, то экран расположен от линзы на расстояние … м. (*Ответ округлить до десятых.*)

Ответ: 0,4 м.

Задача 12.

На расстоянии L_1 = 40 см от плоского зеркала находится точечный источник света. Затем его переместили параллельно поверхности зеркала на L_2 = 20 см и отодвинули от экрана на L_3 = 20 см в перпендикулярном к зеркалу направлении. Как в результате такого передвижения изменилось расстояние между источником и изображением?

Ответ: увеличилось в 1,5 раза.

Тест № 12

Задача 1.

Луч света падает на границу раздела двух сред. Угол падения α равен 60°. Преломленный луч составляет с отраженным угол φ = 90°. Показатель преломления второй среды относительно первой

1) 0,6; 2) 0,9; 3) 1,42; 4) 1,7; 5) 1,9.

Задача 2.

Световой луч падает перпендикулярно плоскости основания кварцевой призмы, сечение которой представляет правильный треугольник. Коэффициент преломления кварца n = 1,7. Чему равен угол между направлением падающего луча и лучом, вышедшим из призмы в воздух (рис. 297)?

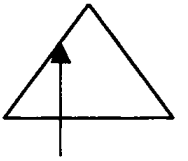


Рис. 297

Задача 3.

Луч света падает на горизонтально расположенную стеклянную пластинку толщиной d = 5 мм в т. A и выходит из нее в точке B, смещенной по горизонтали от т. A на расстояние l = 2 мм. Абсолютный показатель преломления стекла n = 1,5. Аналогичное смещение b для луча, от-

раженного от пластины в т. A и прошедшего слой воздуха той же толщины d, (рис. 298) равно:

1) 3,0 мм; 2) 3,3 мм;
3) 3,6 мм; 4) 3,9 мм;
5) 4,2 мм.

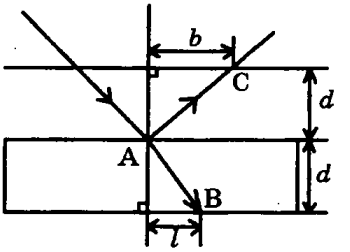


Рис. 298

Задача 4.

Найдите наибольший порядок спектра для жёлтой линии натрия с длиной волны $5{,}89 \cdot 10^{-7}$ м, если период дифракционной решётки равен 2 мкм.

1) 2; 2) 3; 3) 4; 4) 1;
5) недостаточно данных для ответа.

Задача 5.

Рассеивающая линза имеет фокусное расстояние F. Где необходимо поместить предмет, чтобы его изображение было в два раза меньше самого предмета?

1) $d > F$; 2) $F < d < 2F$; 3) $d = 2F$;
4) $d = \frac{F}{2}$; 5) $d = F$.

Задача 6.

Скорость распространения света в первой прозрачной среде 225 000 $\frac{км}{с}$, а во второй — 200 000 $\frac{км}{с}$. Луч света падает на поверхность раздела этих сред из первой среды под углом падения 30°. Угол преломление при этом:

1) больше 30°; 2) меньше 30°; 3) равен 30°.
4) происходит явление полного внутреннего отражения;
5) данных для оценки угла преломления недостаточно.

Задача 7.

Посредине между двумя плоскими зеркалами помещен точечный источник света. Если источник начнет двигаться в направлении, перпендикулярном плоскостям зеркал со скоростью 2 $\frac{м}{с}$, то первые мнимые изображения источника в зеркалах будут двигаться относительно друг друга со скоростью:

1) 2 $\frac{м}{с}$; 2) 4 $\frac{м}{с}$; 3) 8 $\frac{м}{с}$; 4) 0 $\frac{м}{с}$; 5) 1 $\frac{м}{с}$.

Задача 8.

На горизонтальном столе лежит книга. Чтобы изображение книги в плоском зеркале находилось в вертикальной плоскости, зеркало должно быть расположено к поверхности стола под углом:

1) 90°; 2) 60°; 3) 45°; 4) 30°;
5) такого угла не существует.

Задача 9.

Круглый бассейн радиусом R = 5 м залит до краев водой. Над центром бассейна на высоте h = 3 м от поверхности воды висит лампа. На какое расстояние l от края бассейна может отойти человек, рост которого H = 1,8 м, чтобы все еще видеть отражение ламп в воде?

1) 5,0 м; 2) 4,2 м; 3) 3,8 м; 4) 3,0 м; 5) 2,0 м.

Задача 10.

На рисунке 299 OO′ — главная оптическая ось линзы. S — предмет, S' — его мнимое изображение, данное линзой. Какая это линза и с какой стороны от изображения она расположена?

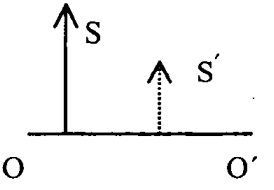


Рис. 299

1) рассеивающая, справа от изображения;
2) рассеивающая, слева от изображения;
3) собирающая, справа от изображения;
4) собирающая, слева от изображения;
5) рассеивающая, между предметом и изображением.

Задача 11.

На рисунке 300 показан ход луча света, проходящего из среды с показателем преломления n_1 через плоскопараллельную пластинку с показателем преломления n_2 в среду с показателем преломления n_3. Укажите верное соотношение показателей преломления:

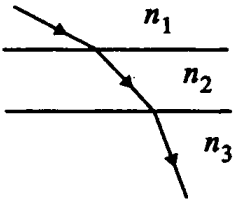


Рис. 300

1) $n_1 > n_2 > n_3$; 2) $n_1 > n_3 > n_2$;
3) $n_2 > n_1 > n_3$; 4) $n_2 > n_3 > n_1$;
5) $n_3 > n_2 > n_1$.

Задача 12.

На дифракционную решетку с периодом 2,2 мкм нормально падает белый свет. Угол между максимумом второго порядка для инфракрасного излучения (λ_1 = 1,1 мкм) и минимумом второго порядка для зеленого света (λ_2 = 550 нм) равен:

1) 150°; 2) 135°; 3) 120°; 4) 90°; 5) 60°.

ГЛАВА 10. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Программа по физике содержит следующие вопросы по данным разделам:

Инвариантность скорости света. Принцип относительности Эйнштейна. Скорость света в вакууме как предельная скорость передачи сигнала.

Релятивистская механика. Пространство и время в специальной теории относительности. Связь массы и энергии. Изменение массы, длины, времени в системах отсчета, движущихся со скоростью, близкой к скорости света.

Тепловое излучение. Постоянная Планка. Кванты света. Фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Постоянная Планка. Применение фотоэффекта в технике.

Гипотеза Луи де Бройля. Дифракция электронов. Корпускулярно-волновой дуализм.

Опыт Резерфорда по рассеянию α-частиц. Планетарная модель атома. Боровская модель атома водорода. Спектры. Люминесценция. Атом и атомное ядро. Ядерная модель атома. Квантовые постулаты Бора. Испускание и поглощение света атомом. Непрерывный и линейный спектры. Спектральный анализ. Лазер.

Состав ядра атома. Изотопы. Нуклонная модель ядра. Протоны и нейтроны. Заряд ядра. Массовое число ядра. Энергия связи атомных ядер.

Деление, ядер. Синтез ядер. Ядерные реакции. Сохранение заряда и массового числа при ядерных реакциях.

Радиоактивность. Альфа и бета-частицы, гамма–излучение. Закон радиоактивного распада.

Методы наблюдения и регистрации частиц в ядерной физике. Деление ядер урана. Ядерный реактор. Выделение энергии при делении и синтезе ядер. Использование ядерной энергии. Дозиметрия.

Термоядерные реакции. Биологическое действие радиоактивных излучений.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

10.1. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Теория относительности — это физическая теория, рассматривающая пространственно-временные закономерности, справедливые для любых физических процессов.

Теория относительности, описывающая явления, происходящие при высоких скоростях, раскрывает новые удивительные свойства окружающего мира. При этом законы механики Ньютона оказываются частным случаем более общих законов движения.

10.1.1. Принцип относительности Галилея

Галилей ввел в классическую механику ***принцип относительности***, смысл которого в следующем: никакими ***механическими*** опытами, проведенными в инерциальной системе отсчета, невозможно установить, движется система равномерно и прямолинейно или находится в покое ⇒ ***законы механики имеют один и тот же вид в инерциальных системах отсчета***.

10.1.2. Постулаты Эйнштейна

Эйнштейн обобщил принцип относительности Галилея, сформулированный для механических явлений, на все явления природы ⇒ ***принцип относительности Эйнштейна:*** никакими ***физическими*** опытами (механическими, электрическими, оптическими), произведенными в инерциальной системе отсчета, невозможно установить, покоится эта система или движется равномерно и прямолинейно ⇒ равноправность (инвариантность) всех инерциальных систем.

Эйнштейн в 1905 г. сформулировал и второй постулат, на основе которых создал специальную теорию относительности (СТО): ***принцип постоянства скорости света:*** скорость света в вакууме (c) одинакова во всех инерциальных системах отсчета по всем направлениям. Она не зависит от движения источника света и наблюдателя.

10.1.3. Релятивистская механика

Механика, изучающая законы движения при скоростях, близких к скорости света, называется ***релятивистской механикой***.

Энергия покоя частицы:

$$E_0 = m_0 c^2,$$

где m_0 — масса покоя частицы.

Закон взаимосвязи массы и энергии:

$$E = mc^2,$$

где c — скорость света в вакууме;

m — ***релятивистская масса,***

является ***уравнением Эйнштейна***.

Релятивистский закон сложения скоростей:

если υ' и υ — скорости движения материальной точки относительно инерциальных систем отсчета, одна из которых движется относительно другой со скоростью V, то:

$$\upsilon=\frac{\upsilon'+V}{1+\frac{\upsilon' V}{c^2}}.$$

10.1.4. Масса, длина, время и импульс в релятивистской механике

Математический анализ явлений, происходящих в инерциальных системах отсчета, который Эйнштейн провел на основе сформулированных им постулатов, привел к относительности понятий длины и промежутка времени, массы и импульса тела.

Длина l, время t и масса m в системе отсчета, движущейся со скоростью x относительно неподвижной системы отсчета, могут быть рассчитаны:

$$l=l_0\sqrt{1-\beta^2},$$

$$t=\frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

где $\beta=\frac{\upsilon}{c}$;

l_0, t_0 и m_0 — длина, время и масса в неподвижной системе отсчета.

Импульс тела в теории относительности:

$$p=m\upsilon=\frac{m_0\upsilon}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

10.1.5. Релятивистское соотношение между массой и энергией

Исключительно важным следствием постулатов СТО является связь между массой и энергией.

Кинетическая энергия E массы m_0, движущейся со скоростью x относительно неподвижной системы отсчета, согласно СТО:

$$E = m_0 c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) = \Delta m c^2,$$

где $\beta = \frac{\upsilon}{c}$;

Δm — увеличение массы:

$$\Delta m = m_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right).$$

Полная энергия W равна сумме кинетической энергии E и энергии покоящегося тела E_0:

$$W = E + E_0 = \Delta m c^2 + m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}. \Rightarrow$$

Если возвести это равенство в квадрат:

$m_0^2 c^4 = W^2 - p^2 c^2$

и учитывать то, что

$$p = m\upsilon, \Rightarrow W = \frac{p}{\upsilon}c^2. \Rightarrow$$

Связь между энергией и импульсом:

$$p = \sqrt{\frac{W^2 - m_0^2 c^4}{c^2}} = \frac{\sqrt{W^2 - E_0^2}}{c}.$$

10.2. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

10.2.1. Характеристики фотона

С точки зрения квантовой механики, свет представляет собой поток фотонов, движущихся со скоростью c.

Основными характеристиками ***фотона*** являются его ***энергия*** ε и ***импульс*** p:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

где ν — частота световой электромагнитной волны;

ν — длина волны в вакууме;

h — постоянная Планка.

$h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Масса движущегося ***фотона***:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

Фотоны не имеют массы покоя.

10.2.2. Фотоэффект

Фотоэффектом называется явление вырывания электронов с поверхности металла под действием света (внешний фотоэффект, в полупроводниках — внутренний).

Если на присоединенную к батарее металлическую пластинку K сквозь сетку A падает пучок света, то гальванометр будет показывать ток (рис. 301).

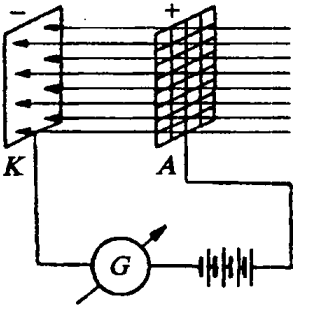


Рис. 301

Фотоэффект может быть объяснен только с ***квантовой*** точки зрения.

Фотоэффект был открыт в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем. Первые фундаментальные исследования фотоэффекта были выполнены в 1888 г. А.Г. Столетовым. Первое теоретическое объяснение законов фотоэффекта дал А. Эйнштейн в 1905 г.

10.2.2.1. Законы фотоэффекта

Первый закон фотоэффекта: сила фототока насыщения I_H зависит только от интенсивности падающего на катод излучения.

На рисунке 302 представлена вольтамперная характеристика фотоэлемента. Увеличить ***фототок насыщения*** I_H можно только увеличив яркость источника падающего света (верхние линии на рисунке 302).

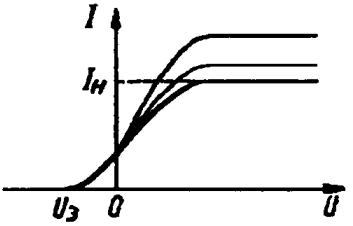


Рис. 302

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m\upsilon^2}{2},$$

где $\frac{m\upsilon^2}{2}$ — кинетическая энергия вылетевшего электрона;

$A_{вых}$ — ***работа выхода:*** энергия, необходимая для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла. $A_{вых}$ зависит ***только*** от материала катода.

Внешний фотоэффект возможен лишь при условии:

$h\nu \geq A_{вых}$.

Второй закон фотоэффекта: максимальная скорость вылетевших электронов зависит только от частоты падающего на катод излучения.

Фотоэлектроны, выбитые светом из катода, имеют начальную кинетическую энергию, наибольшее значение которой равно $\frac{m\upsilon_{max}^2}{2}$. За счет этой энергии электроны могут совершить работу против сил задерживающего электрического поля между катодом и анодом и достигнуть анода. По закону сохранения энергии:

$$\frac{m\upsilon_{max}^2}{2} = eU_з,$$

где $U_з$ — абсолютное значение ***задерживающего потенциала***, при котором фототок прекращается;

e и m — абсолютное значение заряда электрона и его масса.

Третий закон фотоэффекта: для каждого вещества существует такая минимальная частота (максимальная длина волны), называемая ***красной границей фотоэффекта,*** с которой начинается фотоэффект:

$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A_{вых}} \text{ или } \nu_{кр} = \frac{A_{вых}}{h}.$$

Четвертый закон фотоэффекта: фотоэффект безинерционен, т.е. возникает практически мгновенно. Это обуславливает его широкое применение.

10.2.2.2. Применение фотоэффекта

Применение внешнего фотоэффекта:

- звуковое кино (звуковая дорожка на кинолентах);
- вход в метро;
- системы защиты, сигнализации;
- счет деталей на конвейере;
- техника безопасности на заводах.

Применение внутреннего фотоэффекта:

- солнечные батареи (космос, калькуляторы);
- автоматическое включение и выключение уличных фонарей, бакенов для освещения форватера в ночное время.

10.3. АТОМНАЯ ФИЗИКА

Первая модель атома была предложена английским физиком Дж. Томсоном. Она представляла из себя положительно заряженную сферу диаметром порядка 10^{-10} м, внутри которой плавали электроны, подобно «булке с изюмом».

10.3.1. Опыты Резерфорда

Проведенные Резерфордом опыты по рассеянию альфа-частиц (α-частиц) опровергли модель Томсона.

Резерфорд изучал прохождение α-частиц через тонкие металлические пластинки золота и платины с помощью установки, изображенной на рисунке 303.

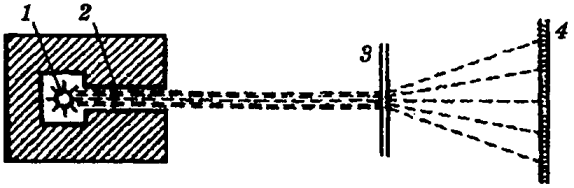


Рис. 303

Источник α-частиц 1, помещенный в свинцовый контейнер 2, попадает на золотую фольгу 3 перпендикулярно ее поверхности и вызывает сцинтилляции (вспышки) на экране 4, покрытом флуоресцирующим веществом, способным светиться. Экран мог вращаться вокруг установки, за счет чего наблюдались вспышки под углами до 150°.

10.3.2. Планетарная модель атома Резерфорда

Для объяснения своих опытов Резерфорд предложил ***планетарную модель атома***, в которой весь положительный заряд атома сосредоточен в ядре, вокруг которого, по-

добно планетам солнечной системы, по замкнутым траекториям вращаются электроны.

Положительно заряженное ядро (Ze) отталкивает α-частицу, которая начинает двигаться по гиперболе, отклонившись на угол θ от первоначального направления (рис.304).

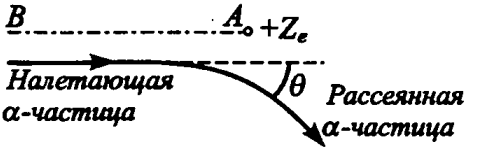


Рис. 304

Если бы α-частица не взаимодействовала с ядром, она бы пролетела от него на расстоянии p, называемом прицельном (рис. 305).

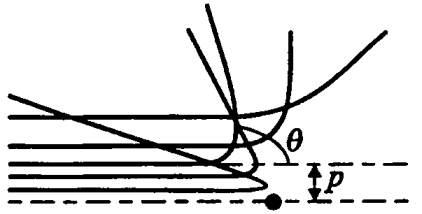


Рис. 305

Величина отклонения тем больше, чем меньше p.

Однако эта модель шла в противоречие с существовавшей в то время классической физикой, согласно которой заряженная частица, какой является электрон, движущаяся с ускорением (центростремительным), должна излучать энергию, чего на самом деле не происходило.

Это противоречие было решено датским физиком Н. Бором.

10.3.3. Постулаты Бора

Идеи Резерфорда были развиты и дополнены Н. Бором, который сформулировал свою гениальную догадку в основных положениях (постулатах).

В атоме существуют стационарные квантовые состояния, которым соответствует определенная энергия E_n.

Первый постулат Бора: электроны в атоме находятся в строго определенных стационарных состояниях. Находясь в стационарном состоянии, атом энергии не излучает.

Второй постулат Бора: атом излучает или поглощает энергию только при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.

Энергия кванта при этом равна:

$h\nu_{ik} = E_k - E_i$,

где E_k и E_i, — энергии электрона в различных стационарных состояниях, которые определяются по Бору соотношением, называемым ***условием квантования стационарных состояний атома:***

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}.$$

Здесь m — масса электрона;

υ — его скорость;

r — радиус круговой орбиты;

n — целое число (главное квантовое число);

h — постоянная Планка: $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Радиусы стационарных орбит могут быть рассчитаны:

$$r_n = \frac{n^2 \cdot h^2}{k \cdot Z \cdot e^2 \cdot m},$$

где $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \dfrac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$,

Z — зарядовое число (для атома водорода $Z = 1$).

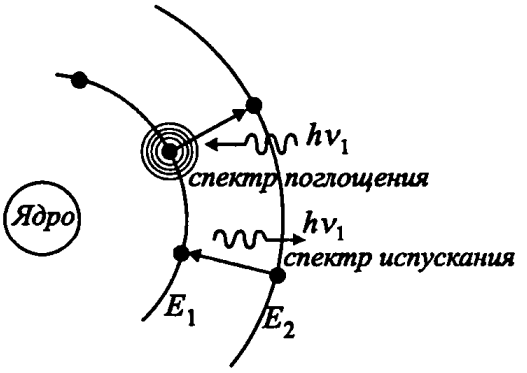


Рис. 306

10.3.4. Спектры

Спектр — совокупность всех значений физической величины, характеризующих систему или процесс.

Спектры бывают:

- ***испускания*** — совокупность частот (длин волн), которые испускаются данным веществом;
- ***поглощения*** — совокупность частот (длин волн), которые поглощаются данным веществом. Они образованы совокупностью темных линий на фоне сплошного спектра раскаленных твердых и жидких тел.

Закон Кирхгоффа: атомы или молекулы данного вещества поглощают свет тех же длин волн, которые они испускают. ⇒

Спектры испускания и поглощения ***взаимно обратимы***.

Спектры испускания делятся на три типа:

- ***линейчатый*** — состоит из отдельных цветных линий на сплошном темном фоне, испускается газами и парами в атомарном состоянии, это спектры атомов. Каждый химический элемент имеет характерный для него линейчатый спектр, отличающийся цветом, положением и числом отдельных светящихся линий;
- ***полосатый*** — цветные полосы, ярко освещенные с одного края и слабо с другого, расположенные на темном фоне, испускается газами и парами в молекулярном состоянии, это спектры молекул;
- ***сплошной*** — сплошная светящаяся полоска чередующихся цветов, излучаются нагретыми жидкостями (расплавленные металлы) и раскаленными твердыми телами, а также газами и парами большой плотности (спектр Солнца, лампы накаливания, спектр свечи).

Спектральный анализ — это определение:

- химического состава вещества;
- количественного соотношения между элементами (процентного содержания);
- агрегатного состояния вещества по его спектру.

По наличию в спектре определенных спектральных линий можно обнаружить малые количества элементов (до 10^{-8} г).

Спектральный анализ применяется в:

- астрономии для получения спектров светящихся тел;
- металлургии для определения процентного содержания компонентов;
- криминалистике;
- фармацевтической промышленности;
- разведке (воздух в шахтах ракет);
- геологии (скопление полезных ископаемых);
- археологии;
- химической промышленности и др.

10.3.5. Водородоподобный атом

Электромагнитное излучение испускается или поглощается в виде кванта энергии $h\nu$ только при переходе атома из одного стационарного состояния в другое.

Величина кванта энергии равна разности энергий тех электронных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона.

Для атома водорода разрешенные состояния в виде энергетических уровней представлены на рисунке 307.

Электрон, поглощая квант энергии, переходит на более высокий энергетический уровень.

Переход из возбужденного состояния возможен на любой нижележащий уровень ⇒ серия спектральных линий.

Если электрон переходит на первый энергетический уровень с более высоких орбит, образуется ***серия***, откры-

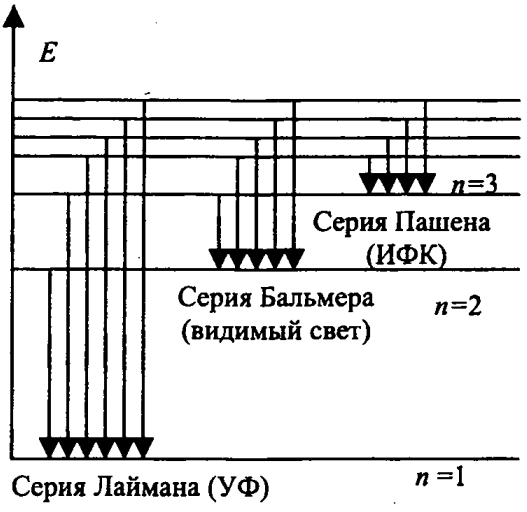


Рис. 307

тая ***Лайманом***, которая лежит ***в ультрафиолетовой области***.

Серия Бальмера образуется при переходе электрона на второй энергетический уровень с более высоких и лежит ***в видимой области***. При этом наблюдаются 3 линии:

- ***красная*** — соответствует переходу электрона с третьего уровня на второй;
- ***голубая*** — переходу с четвертого уровня на второй;
- ***фиолетовая*** — переходу с пятого уровня на второй.

Серия Пашена образуется при переходе электрона на третий энергетический уровень с более высоких и лежит ***в инфракрасной области***.

10.4. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

10.4.1. Состав ядра

Ядро атома состоит из нуклонов:

- протонов (p или ${}^{1}_{1}H$) и
- нейтронов (${}^{1}_{0}n$).

Любой элемент таблицы Менделеева можно представить:

${}^{A}_{Z}X$,

где Z — это:

- порядковый номер элемента в таблице Менделеева;
- число протонов в ядре (заряд ядра атома равен произведению элементарного электрического заряда e на его порядковый номер Z:
  $q = eZ$;
- число электронов в атоме, так как атом в целом электрически нейтрален;

A — это:

- массовое число (в таблице Менделеева);
- общее число нуклонов в ядре:
  $A = Z + N$,
  где N — число нейтронов в ядре.

Нуклоны в ядре удерживаются ***ядерными силами***, которые:

- обладают свойством зарядовой независимости;
- являются силами притяжения;
- обладают свойством насыщения, взаимодействуя только с близлежащими;
- короткодействующие (радиус действия $r \approx 2{,}2 \cdot 10^{-15}$ м);
- нецентральные.

10.4.2. Изотопы

Изотопами называются атомные ядра, занимающие одно и тоже место в таблице Менделеева, т.е. имеющие одинаковое число протонов (Z), но различающиеся числом нейтронов.

Наиболее распространенными изотопами являются изотопы водорода:

${}^{1}_{1}H$ — водород: 1 p — протон;

${}^{2}_{1}H$ — дейтерий: 1 p, 1 n;

${}^{3}_{1}H$ — тритий: 1 p, 2 n.

Большинство химических элементов имеют изотопы, чем объясняется дробное значение массовых чисел.

10.4.3. Ядерные реакции

Ядерными реакциями называются превращения одних атомных ядер в другие при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

Законы сохранения в ядерных реакциях:

Закон сохранения зарядового числа (закон сохранения заряда): сумма нижних индексов частиц, вступивших в ядерную реакцию, равна сумме нижних индексов частиц, полученных в результате реакции.

Закон сохранения массового числа (закон сохранения массы): сумма верхних индексов частиц, вступивших в реакцию, равна сумме верхних индексов частиц, полученных в результате реакции.

Когда о ядро ударяется частица с большой энергией и ядро изменяет свои свойства или вообще изменяется, то говорят, что происходит ядерная реакция (рис. 308).

Первую ядерную реакцию экспериментально осуществил Э. Резерфорд в 1919 г.:

$${}^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O .$$

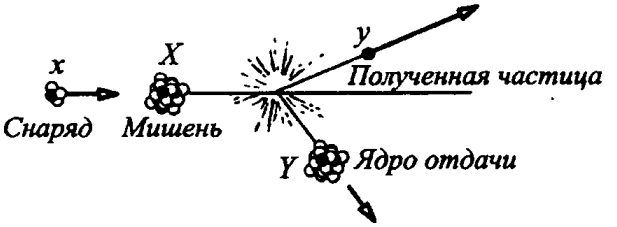


Рис. 308

10.4.4. Дефект массы ядра

Дефект массы ядра — это разность между суммой масс покоя протонов и нейтронов, образующих ядро, и массой покоя ядра:

$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_я$,

где Z — число протонов в ядре;

$(A - Z)$ — число нейтронов в ядре;

m_p, m_n, $m_я$ — массы протона, нейтрона и ядра соответственно.

Излишек массы переходит (по Эйнштейну) в энергию связи ядра на образование мощных внутриядерных сил.

Обычно Δm подсчитывается в атомных единицах массы (а.е.м.).

Атомная единица массы (а.е.м.) равна $\frac{1}{12}$ массы атома углерода ${}^{12}_{6}C$ = 1,66057·10^{-27} кг. Атомную единицу массы можно перевести в единицу системы СИ — кг: 1 кг = 6,022045·10^{26} а.е.м.

10.4.5. Энергия связи атомных ядер

Энергия связи атомного ядра — энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его частицы без сообщения им кинетической энергии:

$\Delta E_{св} = \Delta mc^2$.

Если дефект масс выражен в кг, то энергия связи получается в Дж.

Если же дефект масс подсчитан в а.е.м., то коэффициент взаимосвязи массы и энергии:

$$c^2 = \frac{E}{m} = 8{,}9874 \cdot 10^{16}\ \frac{Дж}{кг} = 931{,}5\ \frac{МэВ}{а.е.м}$$

и лучше пользоваться формулой:

$\Delta E_{св} = \Delta m\ 931{,}5$ (МэВ).

Тогда энергия связи будет выражена в мегаэлектронвольтах

(1 МэВ = 10^6 эВ).

10.4.6. Дефект масс ядерных реакций

При ядерных реакциях присутствует «свой» ***дефект масс дефект масс ядерных реакций*** — разница между суммой масс атомов, вступающих в реакцию, и суммой масс атомов, получившихся в результате реакции.

Если дефект масс оказывается ***положительным***, то ядерная реакция проходит ***с выделением энергии***, если дефект масс оказывается ***отрицательным***, то ядерная реакция идет ***с поглощением энергии***.

Энергия ядерной реакции:

$$\Delta E = \Delta m\ 931{,}5\ (МэВ) = (\sum_i M_i - \sum_j M_j)931{,}5\ (МэВ),$$

где M_i — массы атомов, вступающих в реакцию;

M_j — массы атомов, получившихся в результате реакции.

10.4.7. Радиоактивность

Радиоактивность — способность атомных ядер некоторых элементов спонтанно распадаться, превращаясь в ядра другого элемента.

Радиоактивный распад атомных ядер — самопроизвольный или под действием облучения распад атомных ядер на ядра других элементов, сопровождающийся излучением альфа-частиц, бета-частиц или гамма-квантов.

Альфа-частицы (α) — это ядра атома гелия: ${}^{4}_{2}He$.

Бета-частицы (β) — это электроны, летящие со скоростью, близкой к скорости света: $\upsilon = 0{,}99c$: ${}^{0}_{-1}e$.

Гамма-кванты (γ) — жесткое электромагнитное излучение малой длины волны ($\lambda = 10^{-11} \div 10^{-12}$ м).

Альфа- и бета-частицы вследствие наличия у них заряда отклоняются в электрическом и магнитном полях (в противоложные стороны), а гамма-кванты — не отклоняются (рис. 309).

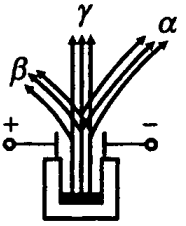


Рис. 309

Правило смещения при α-распаде: при α-распаде элемент смещается на две клетки ***влево*** в таблице Менделеева:

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{A-4}_{Z-2}Y.$$

Правило смещения при β-распаде: при β-распаде элемент смещается на одну клетку ***вправо*** в таблице Менделеева:

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y.$$

Со временем число радиоактивных атомов уменьшается.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0\, 2^{-\frac{t}{T}},$$

где N_0 — первоначальное число радиоактивных атомов;

N — число оставшихся радиоактивных атомов через время t, т.е. не испытавших распада;

T — период полураспада.

Период полураспада T — это промежуток времени, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов.

Период полураспада характеризует быстроту распада радиоактивного изотопа. Период полураспада различных радиоактивных веществ колеблется от долей секунды до миллиардов лет.

Указания к решению задач

1. При решении задач на фотоэффект удобно пользоваться единицей измерения энергии — ***электронвольт*** (эВ) — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 В ($\frac{m\upsilon_{max}^2}{2} = eU_з$):

1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл·В = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

2. Решая задачи с использованием элементов теории относительности, нужно помнить, что релятивистские скорости близки к скорости света $(0{,}8 \div 0{,}99)c$.

3. Решение задач на ядерные реакции основано на применении законов сохранения:

- электрического заряда;
- массового числа (суммарного числа нуклонов);
- энергии;
- импульса.

Первые два закона позволяют правильно записывать ядерные реакции даже в тех случаях, когда одна из частиц — участников реакции или ее продуктов — не дана.

4. Если в задаче нужно из нескольких вариантов выделить линии, соответствующие ***испусканию*** фотона атомом, то этот процесс сопровождается переходом электрона на более низкий уровень, в случае ***поглощения*** — на более высокий уровень.

5. При вычислении дефекта масс Δm значения масс берутся из справочных таблиц и используются ***без округления***.

Примеры решения задач

Задача 1.

На металлическую пластину падает монохроматический свет с длиной волны 324 мкм. До какого максимального потенциала зарядится цинковая пластина, если работа выхода электронов из цинка равна 3,74 эВ?

Дано:	СИ	Решение:
λ = 324 нм	$= 324 \cdot 10^{-9}$ м	Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта:
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл		
$A_{вых} = 3{,}74$ эВ	$= 3{,}74 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж	
$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с		
$U_з$ – ?		

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m\upsilon^2}{2}$$

кинетическая энергия вылетевших электронов:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = h\nu - A_{вых}.$$

Вылет электронов прекратится, когда потенциальная энергия в задерживающем поле станет равна его кинетической энергии:

$$\frac{m\upsilon_{max}^2}{2} = eU_з \Rightarrow U_з = \frac{h\nu - A_{вых}}{e}.$$

Так как $c = \lambda\nu \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow$

$$U_з = \frac{h\nu - A_{вых}}{e} = \frac{hc - \lambda A_{вых}}{\lambda e} = \frac{hc}{\lambda e} - \frac{A_{вых}}{e}.$$

$$[U_з] = \frac{Дж \cdot с \cdot м}{с \cdot м \cdot Кл} = \frac{А \cdot В \cdot с}{А \cdot с} = \text{В}.$$

$1\text{эВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Кл} \cdot 1\text{В} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Дж} \Rightarrow$

$$\frac{Дж}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\, Кл} = 1\text{эВ}.$$

$$U_з = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{324 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} - 3,74 = 0,09 \text{ (эВ)}.$$

Ответ: $U_з = 0,09$ эВ.

Задача 2.

Найти полную энергию тела массой 1 кг.

Дано:

$m = 1$ кг

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$

$E - ?$

Решение:

Масса и энергия связаны между собой соотношением Эйнштейна:

$E = mc^2 \Rightarrow$

$E = 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{16}$ (Дж).

Ответ: $E = 9 \cdot 10^{16}$ (Дж).

Задача 3.

Определить энергию, выделяющуюся при термоядерной реакции синтеза гелия массой 1 г из атомов дейтерия и трития.

Дано:

$m = 1$ г

$m_n = 1,00866$ а.е.м.

$M_{^2_1H} = 2,01410$ а.е.м.

$M_{^3_1H} = 3,01605$ а.е.м.

$M_{^4_2He} = 4,00260$ а.е.м.

$E - ?$

Решение:

Запишем уравнение термоядерной реакции синтеза:

$$^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^4_2He + ^1_0n.$$

Дефект масс реакции определяется соотношением:

$$\Delta m = M_{^2_1H} + M_{^3_1H} - M_{^4_2He} - m_m =$$

$$= 2,01410 + 3,01605 - 4,00260 - 1,00866 =$$

$$= 0,01889 \text{ (а.е.м)}.$$

Так дефект масс положителен, то выделяется следующая энергия:

$\Delta E = \Delta mc^2 = \Delta m\ 931,5 = 0,01889 \cdot 931,5 = 17,6$ (МэВ).

Эта энергия выделяется при синтезе одного атома гелия.

Для синтеза всех атомов, содержащихся в гелии массой 1 г, имеем:

$$E = \frac{m}{M} N_A \Delta E = \frac{1}{4} 6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 17{,}6 = 26{,}5 \cdot 10^{23} \text{ (МэВ)} =$$
$$= 4{,}24 \cdot 10^{11} \text{ (Дж)}.$$

Ответ: $E = 4{,}24 \cdot 10^{11}$ Дж.

Задача 4.

Определить энергию связи ядра изотопа лития $^{6}_{3}Li$.

Дано:	**Решение:**
$m_n = 1{,}00866$ а.е.м. $M_{^6_3Li} = 7{,}01601$ а.е.м. $M_{^1_1H} = 1{,}00783$ а.е.м. $\Delta E_{св}$ – ?	Энергия связи атомного ядра определяется по формуле: $\Delta E_{св} = \Delta mc^2 =$ $= \Delta m$ 931,5 (МэВ) Дефект масс ядра определяется соотношением:

$$\Delta m = Zm_P + (A - Z)m_n - m_я =$$
$$= Z\, M_{^1_1H} + (A - Z)m_n - M_{^6_3Li},$$

где Z — число протонов в ядре;

$(A - Z)$ — число нейтронов в ядре;

m_P, m_n, $m_я$ — массы протона, нейтрона и ядра соответственно;

$M_{^6_3Li}$ и $M_{^1_1H}$ — массы ядер изотопа лития $^{6}_{3}Li$ и водорода $^{1}_{1}H$ соответственно (ядро атома водорода и есть протон).

Для изотопа лития $^{6}_{3}Li$ имеем:

$Z = 3$, $A = 7 \Rightarrow (A - Z) = 4 \Rightarrow$

$\Delta m = 3 \cdot 1{,}00783 + 4 \cdot 1{,}00866 - 7{,}01601 = 0{,}04212 \Rightarrow$

$\Delta E_{св} = \Delta mc^2 = \Delta m$ 931,5 (МэВ) $= 0{,}04212 \cdot 931{,}5$(МэВ) $=$
$= 39{,}23$ (МэВ).

Ответ: $\Delta E_{св} = 39{,}23$ МэВ.

Задача 5.

С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы в состоянии движения его масса покоя была втрое больше его массы покоя?

Дано:	**Решение:**
$m = 3m_0$	При движении релятивистской частицы ее масса изменяется:
$\upsilon - ?$	

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

где $\beta = \frac{\upsilon}{c}$;

m_0 — масса в неподвижной системе отсчета.

$$3m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow \sqrt{1-\beta^2} = \frac{1}{3} \Rightarrow (1-\beta^2) = \frac{1}{9} \Rightarrow$$

$$9\left(1-\frac{\upsilon^2}{c^2}\right) = 1 \Rightarrow \frac{8}{9} = \frac{\upsilon^2}{c^2} \Rightarrow \upsilon = \frac{2c}{3}\sqrt{2}.$$

Ответ: $\upsilon = \frac{2c}{3}\sqrt{2}$.

Задача 6.

Написать недостающие обозначения в ядерной реакции:

$${}^{27}_{13}Al + \gamma \rightarrow {}^{26}_{12}Mg + ?$$

Решение:

При ядерной реакции выполняются законы сохранения числа нуклонов, т.е. массового числа:

$\Sigma A_i = \Sigma A_K$

и зарядового числа, т.е. числа зарядов:

$\Sigma Z_i = \Sigma Z_k$,

где A_i — массовые числа исходных;

A_K — массовые числа конечных продуктов реакции;

Z_i — зарядовые числа исходных;

Z_K — зарядовые числа конечных продуктов реакции.

На основании этих законов и с помощью периодической системы элементов Д.И. Менделеева получим:

$$^{27}_{13}Al + \gamma \rightarrow {}^{26}_{12}Mg + {}^{1}_{1}H \Rightarrow$$

испускаемой частицей будет протон.

Ответ: $^{27}_{13}Al + \gamma \rightarrow {}^{26}_{12}Mg + {}^{1}_{1}H$.

Задача 7.

Какая доля радиоактивных ядер изотопа $^{14}_{6}C$ распадается через 10 лет, если его период полураспада равен 557 лет?

Дано:	**Решение:**
$t = 10$ лет $T = 557$ лет	Из закона радиоактивного распада следует:
$\frac{N'}{N_0}$ – ?	$N = N_0\, 2^{-\frac{t}{T}}$,

где N_0 — первоначальное число радиоактивных атомов;

N — число оставшихся радиоактивных атомов через время t, т.е. не испытавших распада;

T — период полураспада $\Rightarrow$

$$\frac{N}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}} = 2^{-\frac{10}{557}} = 2^{-0,0179} = \frac{1}{2^{0,0179}} \approx 0,988.$$

Выразим это число в процентах:

$$\frac{N}{N_0} = 98,8\% \Rightarrow$$

Доля радиоактивных ядер изотопа $^{14}_{6}C$, распавшихся через 10 лет, равна:

$$\frac{N'}{N_0} = 100\% - 98,8\% = 1,2\%.$$

Ответ: $\frac{N'}{N_0} = 1,2\%$.

Задача 8.

Сколько возможных квантов с различной энергией может испустить атом водорода, если электрон находится на четвертой стационарной орбите?

1) 1; 2) 2;
3) 3; 4) 4;
5) 6.

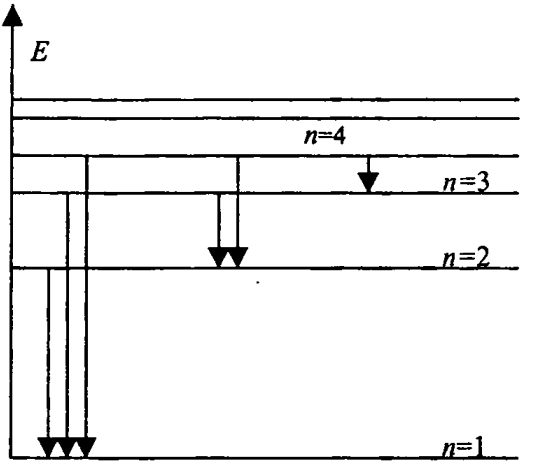


Рис. 310

Решение:

Атом водорода испускает кванты энергии, если электрон переходит с более высокой стационарной орбиты на более низкую. На рисунке 310 представлены все возможные варианты таких переходов. ⇒

Их всего 6. Проанализировав варианты представленных ответов, выбираем ответ № 5.

Ответ: № 5.

Задача 9.

При какой скорости кинетическая энергия частицы равна ее энергии покоя?

1) $2{,}9\cdot10^8\ \frac{м}{с}$; 2) $2{,}8\cdot10^8\ \frac{м}{с}$; 3) $2{,}7\cdot10^8\ \frac{м}{с}$;

4)) $2{,}6\cdot10^8\ \frac{м}{с}$; 5) $2{,}5\cdot10^8\ \frac{м}{с}$.

Дано:

$E = E_0$

$c = 3\cdot10^8\ \frac{м}{с}$

$\upsilon - ?$

Решение:

Кинетическая энергия E массы m_0, движущейся со скоростью υ:

$$E = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right) = E_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right) \Rightarrow$$

$$E = E_0, \text{ если } \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 = 1 \Rightarrow 2\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = 1 \Rightarrow$$

$$\upsilon = c\sqrt{\frac{3}{4}} \approx 0{,}866\, c = 2{,}598 \cdot 10^8 \left(\frac{м}{c}\right) \approx 2{,}6 \cdot 10^8\ \frac{м}{c}.$$

Проанализировав варианты ответа, выбираем ответ № 4.

Ответ: № 4.

Задача 10.

Определите энергетический выход ядерной реакции

$^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n$.

Ответ выразите в пикоджоулях (пДж). Поставьте знак минус, если энергия поглощается.

Дано:

энергия ядра $^{7}_{3}Li$ = 6535,4 МэВ

энергия ядра $^{4}_{2}He$ = 3728,4 МэВ

энергия ядра $^{10}_{5}B$ = 9327,1 МэВ

энергия покоя нейтрона $^{1}_{0}n$ =939,6 МэВ

ΔE – ?

Решение:

Значения энергий ядер и частиц берутся из таблиц.

Подсчитаем энергию E_1 слева и энергию E_2 справа ядерной реакции:

E_1 = 6535,4 + 3728,4 = 10263,8 (МэВ).

E_2 = 9327,1 + 939,6 = 10266,7 (МэВ). ⇒

Так как значение энергии E_2 (справа) > E_1 (слева) ⇒ энергия поглощается ⇒ в ответе должен стоить знак минус.

1МэВ = 10^6 эВ = $10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж = $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Дж.

1 пДж = 10^{-12} Дж ⇒

1МэВ = 0,16 пДж.

ΔE = 10263,8 – 10266,7 = – 2,9 (МэВ) = – 0,464 пДж ≈ ≈ – 0,5 пДж.

Ответ: – 0,5 пДж.

Задача 11.

Рентгеновская трубка, работающая при напряжении U = 25 кВ и потребляющая ток I излучает ежесекундно $N = 1{,}8 \cdot 10^{20}$ фотонов с длиной волны λ = 2 нм. Если коэффициент полезного действия трубки равен 6,5%, то сила тока трубки равна:

1) 6 А; 2) 8 А; 3) 9 А; 4) 11 А; 5) 14 А.

Дано:	**СИ**
$U = 25$ кВ	$= 25 \cdot 10^3$ В
$\lambda = 2$ нм	$= 2 \cdot 10^{-9}$ м
$t = 1$ с	
$N = 1{,}8 \cdot 10^{20}$	
$c = 3 \cdot 10^8 \ \frac{м}{с}$	
$\eta = 6{,}5$ %	
$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
$I - ?$	

Решение:

Запишем выражение для *КПД* через мощность:

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} 100\%.$$

$$P_{затр} = IU;$$

$$P_{пол} = \frac{A}{t};$$

$$A = N \cdot \varepsilon$$

Энергия фотона

$$E = h\nu;\ c = \lambda\nu \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow$$

$$P_{пол} = \frac{Nhc}{t\lambda} 100\% \Rightarrow \eta = \frac{Nhc}{t\lambda IU} 100\% \Rightarrow$$

$$I = \frac{Nhc}{t\lambda U\eta} 100\%.$$

Сделаем проверку по размерности:

$$[I] = \frac{Дж \cdot с \cdot м \cdot \%}{с \cdot м \cdot с \cdot В \cdot \%} = \frac{А \cdot В \cdot с}{В \cdot с} = \text{А}.$$

$$I = \frac{1{,}8 \cdot 10^{20} \cdot 6{,}626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 100}{1 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 6{,}5} = 11(\text{А}).$$

Проанализировав варианты ответов, выбираем правильный ответ № 4.

Ответ: № 4.

Задача 12.

Ядро состоит из 90 протонов и 144 нейтронов. После испускания двух β-частиц и одной α-частицы это ядро будет иметь:

1) 85 протонов и 140 нейтронов;
2) 87 протонов и 140 нейтронов;
3) 90 протонов и 140 нейтронов;
4) 85 протонов и 148 нейтронов;
5) 87 протонов и 148 нейтронов.

Решение:

На 90 месте в таблице Менделеева (оно определяется числом протонов в ядре) стоит элемент торий Th. Запишем осуществляемую ядерную реакцию, учитывая, что

$A = Z + N = 90 + 144 = 234$:

$^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{-1}e + {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{A_1}_{Z_1}\text{X}$.

На основании закона сохранения зарядового числа:

$Z_1 = 90 - 1 - 1 + 2 = 90$,

и массового числа:

$A_1 = 234 - 4 = 230$.

Тогда число протонов в новом ядре будет равно $Z_1 = 90$, а число нейтронов:

$N = A_1 - Z_1 = 230 - 90 = 140$ (нейтронов)

Проанализировав варианты ответов, выбираем правильный ответ № 3.

Ответ: № 3.

Вариант № 13

Задача 1.

Какую энергию можно получить в реакции деления 1 г урана $^{235}_{92}U$, если при делении одного ядра урана–235 выделяется энергия, равная $3{,}2 \cdot 10^{-11}$ Дж?

Ответ: $8{,}2 \cdot 10^{10}$ Дж.

Задача 2.

При какой скорости движения (в долях скорости света c) релятивистское сокращение длины движущегося тела составляет 25%?

Ответ: 0,66 с.

Задача 3.

При слиянии двух частиц одинаковой массы покоя m_0, движущихся со скоростью x, близкой к скорости света c, выделяется энергия E. Чему равна масса покоя образовавшейся в результате слияния частицы?

Ответ: $2m_0 - \frac{E}{c^2}$.

Задача 4.

Если c — скорость света в вакууме, то с какой скоростью должна двигаться нестабильная частица относительно наблюдателя, чтобы ее время жизни было в 10 раз больше, чем у такой же, но покоящейся частицы?

Ответ: 0,995c.

Задача 5.

Лазер мощностью 30 Вт испускает 10^{20} фотонов в секунду. Какова длина волны излучения такого лазера? Скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, постоянная Планка $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Ответ: 0,66 мкм.

Задача 6.

Работа выхода электрона из металла равна $6{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Определить частоту света, вырывающего с поверхности этого металла электроны, полностью задерживающиеся разностью потенциалов 5 В.

Ответ: $2{,}2 \cdot 10^{15}$ Гц.

Задача 7.

С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона длиной волны $\lambda = 5{,}2 \cdot 10^{-7}$ м?

Ответ: $8{,}4 \cdot 10^5 \ \frac{м}{с}$.

Задача 8.

Стержень движется в продольном направлении с постоянной скоростью относительно инерциальной системы отсчета. При каком значении скорости (в долях скорости света) длина стержня в этой системе отсчета будет в 1,66 раза меньше его собственной длины?

Ответ: 0,8 *c*

Задача 9.

В теории Бора полная энергия электрона атома водорода на *n*-й орбите определяется соотношением: $E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}$ эВ. Какую наименьшую энергию нужно сообщить невозбужденному атому водорода, чтобы спектр излучения газа из таких атомов содержал только одну спектральную линию?

Ответ: 10,2 эВ.

Задача 10.

Сколько фотонов в 1 секунду испускает нить электрической лампочки полезной мощностью 1 Вт, если средняя длина волны излучения равна 1 мк?

Ответ: $5 \cdot 10^{18}$.

Задача 11.

Собственное время жизни нестабильной частицы равно 10 нс. Какой путь пролетает эта частица до распада в лабораторной системе отсчета, где время ее жизни равно 20 нс?

Ответ: 5 м.

Задача 12.

Если в ядре изотопа гелия ${}^{3}_{2}He$ все протоны заменить нейтронами, а нейтроны — протонами, то какое получится ядро?

Ответ: ${}^{3}_{1}H$.

Тест № 13

Задача 1.

Частота падающего на фотоэлемент излучения уменьшается вдвое. Во сколько раз нужно изменить задерживающее напряжение, если работой выхода электрона из материала фотоэлемента можно пренебречь?

1) увеличить в два раза;
2) уменьшить в два раза;
3) увеличить в $\sqrt{2}$ раз;
4) уменьшить в $\sqrt{2}$ раз;
5) оставить без изменения.

Задача 2.

Какой вид электромагнитного излучения соответствует диапазону длин волн от 1 мкм до 5 мкм?

1) инфракрасное излучение;
2) ультрафиолетовое излучение;
3) радиоволны;
4) видимый глазом свет;
5) рентгеновское излучение.

Задача 3.

Во сколько раз энергия фотона, соответствующего гамма-излучению с частотой $3 \cdot 10^{21}$ Гц, больше энергии фотона рентгеновского излучения с длиной волны $3 \cdot 10^{-10}$ м?

1) 30; 2) 90; 3) 200; 4) 900; 5) 3000.

Задача 4.

Какова природа сил, отклоняющих альфа-частицы от прямолинейной траектории в опытах Резерфорда?

1) гравитационная; 2) электромагнитная;
3) ядерная; 4) гравитационная и ядерная;
5) ядерная и электромагнитная.

Задача 5.

При освещении катода фотоэлемента монохроматическим светом с частотой *н* максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов E_1, а при облучении светом с частотой $\nu_2 = 3\nu_1$ она равна E_2. Каково соотношение между значениями E_1 и E_2 ?

1) $E_2 = E_1$; 2) $E_2 = 3E_1$; 3) $E_2 = \sqrt{3}\ E_1$;
4) $E_2 > 3E_1$; 5) $E_2 < 3E_1$.

Задача 6.

Работа выхода электронов из материала катода трубки 2 эВ. Катод облучается потоком фотонов с энергией *E*. При задерживающей разности потенциалов 10 В ток через электронную трубку становится равным нулю. Чему равна энергия *E* падающего света?

1) 12 эВ; 2) 10 эВ; 3) 8 эВ;
4) 20 эВ; 5) $1{,}610^{-19}$ Дж.

Задача 7.

Какие элементарные частицы образуются при аннигиляции медленно движущихся электрона и позитрона?

1) электрон и γ-квант; 2) два электрона;
3) два позитрона; 4) два γ-кванта;
5) один γ-квант.

Задача 8.

При поглощении нейтрона ядром азота ${}^{14}_{7}N$ испускается протон. В ядро какого изотопа превращается ядро ${}^{14}_{7}N$?

1) ${}^{16}_{8}O$; 2) ${}^{14}_{6}C$; 3) ${}^{12}_{6}C$; 4) ${}^{15}_{8}C$; 5) ${}^{15}_{7}N$.

Задача 9.

Атом водорода при переходе электрона из возбужденного состояния на первую стационарную орбиту излучает электромагнитную волну, относящуюся к:

1) инфракрасному диапазону;
2) видимому свету;
3) ультрафиолетовому излучению;
4) рентгеновскому излучению;
5) γ-излучению.

Задача 10.

При бомбардировке изотопа ${}^{6}_{3}Li$ альфа-частицами происходит ядерная реакция с испусканием нейтронов и образованием ядра изотопа бора. Запишите обозначение этого изотопа.

1) ${}^{10}_{5}B$; 2) ${}^{10}_{6}B$; 3) ${}^{9}_{5}B$; 4) ${}^{8}_{5}B$; 5) ${}^{9}_{6}B$.

Задача 11.

Рентгеновская трубка, работающая при напряжении $U = 25$ кВ и потребляющая ток $I = 12$ А, излучает фотоны с частотой $\nu = 2 \cdot 10^{17}$ Гц. Если коэффициент полезного действия трубки равен 6,6%, то число излучаемых за 1 секунду фотонов равно:

1) $1{,}5 \cdot 10^{20}$; 2) $2{,}7 \cdot 10^{20}$; 3) $3{,}4 \cdot 10^{20}$;
4) $5{,}1 \cdot 10^{20}$; 5) $8{,}3 \cdot 10^{20}$.

Задача 12.

В реакторе происходит ядерное превращение:

$p + ? \rightarrow {}^{2}_{1}H$.

Недостающая частица — это:

1) электрон; 2) протон; 3) α-частица;
4) нейтрон; 5) позитрон.

Заключительные рекомендации

Предложенный в данном издании материал охватывает всю программу по физике, которую необходимо знать для успешной сдачи единого государственного экзамена (ЕГЭ) по физике, централизованного тестирования, вступительных экзаменов в вуз. При внимательном изучении предложенного ***теоретического материала***, можно найти ответы на все вопросы заданий ЕГЭ и тестовых заданий.

Здесь имеется широкий спектр задач по физике: приведены решения наиболее сложных задач и предложены задачи для самостоятельного решения.

Все рассмотренные задачи (и решенные, и предложенные для самостоятельного решения) взяты из различных вариантов контрольных измерительных материалов к ЕГЭ и государственному тестированию, причем выбирались такие задачи, которые, как правило, не решаются сразу по известному алгоритму, а требуют глубокого проникновения в суть физических явлений. Поэтому необходимо обращать внимание на ход решения, на логику решения задач.

Научиться решать задачи можно только в том случае, если решать их достаточно много и разной степени сложности, поэтому вероятность усвоения материала и успешной сдачи экзаменов зависит от количества решенных задач.

Проработав предложенный в учебнике материал, можно приступать к решению задач из сборников тестов и вариантов контрольных измерительных материалов по ЕГЭ, выпускаемых Министерством образования Российской федерации. Это поможет Вам самостоятельно проверить ваши знания и выработать своеобразный «иммунитет» к такой форме экзамена.

В тестовых заданиях огромное значение имеет не только знанию теоретического материала, но и логика:

- проверяется способность мыслить логически;
- оценивается умение сделать логический вывод.

Удачи Вам!

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1а

Единицы физических величин

Наименование	*Обозначение*	*Единица измерения*	*Размерность*
Длина	L, l, s	метр	м
Ширина	b	метр	м
Высота	H, h	метр	м
Толщина	H, h	метр	м
Радиус	R, r	метр	м
Диаметр	D, d	метр	м
Время	t	секунда	с
Температура	T	Кельвин	К
Температура	t, τ, θ	градус Цельсия	°С
Площадь	S	квадратный метр	$м^2$
Объем	V	кубический метр	$м^3$
Период	T	секунда	с
Заряд	q, Q	Кулон	Кл = А·с
Сила тока	I	Ампер	А
Потенциал	φ	Вольт	В
Напряжение	U	Вольт	В
ЭДС	ε	Вольт	В
Работа (эл.)	A	Джоуль	Дж = А·В·с
Энергия (эл.)	W	Джоуль	А·В·с
Мощность (эл.)	P	Ватт	Вт = А·В
Частота	ν	Герц	$с^{-1}$ = Гц
Угловая скорость	ω	радиан в секунду	$с^{-1}$
Циклическая частота	ω	Герц	$с^{-1}$ = Гц
Магнитный поток	Φ	Вебер	Вб = В·с

Приложение 1б

Единицы физических величин

Наименование	***Обозначение***	***Единица измерения***	***Размерность***
Скорость	v, u	метр в секунду	$\frac{м}{с}$
Ускорение	a	метр в секунду в квадрате	$\frac{м}{с^2}$
Плотность	ρ	килограмм на кубический метр	$\frac{кг}{м^3}$
Сила	F	Ньютон	$Н = \frac{кг \cdot м}{с^2}$
Момент силы	M	Ньютон-метр	$Н{\cdot}м = \frac{кг \cdot м^2}{с^2}$
Импульс тела	mv	килограмм-метр на секунду	$\frac{кг \cdot м}{с}$
Импульс силы	Ft	Ньютон-секунда	$Н{\cdot}с = \frac{кг \cdot м}{с}$
Работа	A	Джоуль	$Дж = Н{\cdot}м = \frac{кг \cdot м^2}{с^2}$
Количество теплоты	Q	Джоуль	$Дж = \frac{кг \cdot м^2}{с^2}$
Энергия	W, E, U, $П$	Джоуль	$Дж = \frac{кг \cdot м^2}{с^2}$
Мощность	N	Ватт	$Вт = \frac{Дж}{с} = \frac{кг \cdot м^2}{с^3}$

Приложение 1в

Единицы физических величин

Наименование	***Обозначение***	***Единица измерения***	***Размерность***
Коэффициент трения	μ, $к$	—	—
Давление	p	Паскаль	Па $= \frac{Н}{м^2}$
Удельная теплоемкость	c	Джоуль на килограмм Кельвин	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Теплоемкость	C	Джоуль на Кельвин	$\frac{Дж}{К}$
Сопротивление	R	Ом	$\frac{В}{А}$
Проводимость	G	$\frac{1}{Ом}$ = Сименс	$\frac{А}{В}$
Удельное сопротивление	ρ	Ом-метр	Ом·м
Электроемкость	C	Фарад	Ф $= \frac{А \cdot с}{В}$
Индуктивность	L	Генри	Гн $= \frac{В \cdot с}{А}$
Магнитная индукция	B	Тесла	Тл $= \frac{Н}{А \cdot м}$

Приложение 1г

Единицы физических величин

Наименование	***Обозначение***	***Единица измерения***	***Размерность***
Напряженность электрического поля	E	Вольт на метр	$\frac{В}{м}$
Напряженность магнитного поля	H	Ампер на метр	$\frac{А}{м}$
Оптическая сила	D	диоптрия	дптр = $м^{-1}$
Плотность тока	j	Ампер на квадратный метр	$\frac{А}{м^2}$
Жесткость	k	Ньютон на метр	$\frac{Н}{м}$
Поверхностная плотность заряда	σ	Кулон на квадратный метр	$\frac{Кл}{м^2}$

Приложение 2

Десятичные приставки к единицам СИ

Наименование	***Обозначение***	***Отношение к главной единице***	***Наименование***	***Обозначение***	***Отношение к главной единице***
фемто	ф	10^{-15}	пета	П	10^{15}
пико	п	10^{-12}	тера	Т	10^{12}
нано	н	10^{-9}	гига	Г	10^{9}
микро	мк	10^{-6}	мега	М	10^{6}
милли	м	10^{-3}	кило	к	10^{3}
санти	с	10^{-2}	гекто	г	10^{2}
деци	д	10^{-1}	дека	да	10^{1}

Приложение 3а

Таблица основных физических констант

Константа	***Обозначение***	***Значение***
Скорость света в вакууме	c	$2{,}99792458 \cdot 10^{8} \frac{м}{с}$
Ускорение свободного падения	g	$9{,}80665 \frac{м}{с^2}$
Элементарный заряд	e	$1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m}$	$1{,}76 \cdot 10^{11} \frac{Кл}{кг}$
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$1{,}6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ кг
Гравитационная постоянная	G	$6{,}6720 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8{,}31441 \frac{Дж}{К \cdot моль}$
Постоянная Больцмана	k	$1{,}380662 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$
Число Авогадро	N_A	$6{,}022045 \cdot 10^{23} \frac{1}{моль}$
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}85418783 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{м}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м} = 1{,}26 \cdot 10^{-6} \frac{Гн}{м}$

15. Зак. 229

Приложение 3б

Таблица основных физических констант

Константа	***Обозначение***	***Значение***
Коэффициент k в законе Кулона	$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$	$9\cdot10^9\frac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$
Постоянная Планка	h	$6{,}626176\cdot10^{-34}$ Дж·с
Мегаэлектронвольт	МэВ	$1{,}60219\cdot10^{-13}$ Дж
Киловатт–час	КВт–ч	$3{,}6\cdot10^6$ Дж
Лошадиная сила	л.с.	735,5 Вт
Атомная единица массы	*а.е.м.*	$1{,}66057\cdot10^{-27}$ кг
Коэффициент взаимосвязи массы и энергии	$c^2=\frac{E}{m}$	$8{,}9874\cdot10^{16}\frac{Дж}{кг}=$ $931{,}5\frac{МэВ}{а.е.м.}$
Энергия покоя электрона	$E_{0e}=m_ec^2$	$8{,}187\cdot10^{-14}$ Дж = 0,511 МэВ
Энергия покоя протона	$E_{0p}=m_pc^2$	$1{,}503\cdot10^{-10}$ Дж = 938,26 МэВ
Энергия покоя нейтрона	$E_{0n}=m_nc^2$	$1{,}505\cdot10^{-10}$ Дж = 939,55 МэВ
Постоянная Ридберга	R	$3{,}29\cdot10^{15}\frac{1}{с}=1{,}097\cdot10^7\frac{1}{м}$
Молярная масса водорода	μ_{H_2}	$2\cdot10^{-3}\frac{кг}{моль}$
Молярная масса гелия	μ_{He}	$4\cdot10^{-3}\frac{кг}{моль}$
Молярная масса кислорода	μ_{O_2}	$32\cdot10^{-3}\frac{кг}{моль}$

Приложение 3в

Таблица основных физических констант

Константа	*Обозначение*	*Значение*
Молярная масса углекислого газа	μ_{CO_2}	$44 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}$
Масса атома гелия	m_{oHe}	$6.64 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса атома водорода	m_{oH}	$1.67 \cdot 10^{27}$ кг
Масса атома азота	m_{oN}	$23{,}2 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса атома углерода	m_{oC}	$19.9 \cdot 10^{-27}$ кг
Классический радиус электрона	r_e	$2{,}817938 \cdot 10^{-15}$ м

Приложение 3г

Международная система единиц (СИ)

Основные единицы системы СИ			
№ п/п	Величина	Наименование	Обозначение
1.	Длина	метр	м
2.	Масса	килограмм	кг
3.	Время	секунда	с
4.	Температура	Кельвин	К
5.	Количество вещества	моль	моль
6.	Сила электрического тока	ампер	А
7.	Сила света	кандела	кд
Дополнительные единицы системы СИ			
№ п/п	Величина	Наименование	Обозначение
1.	Плоский угол	Радиан	рад
2.	Телесный угол	Стерадиан	ср

Основные формулы

МЕХАНИКА

Равномерное прямолинейное движение

$$\vec{s} = \vec{v}t,\ s_x = v_x t,\ s = vt;\ \ l = vt;\ x = x_0 + vt,\ v_{ср} = \frac{l_{общ}}{t_{общ}}.$$

Равноускоренное прямолинейное движение

$$a = \frac{v_t - v_0}{t},\ \ v_{ср} = \frac{v_o + v_t}{2};$$

$$\vec{v}_t = \vec{v}_0 + \vec{a}t;\ \ v_{tx} = v_{ox} + a_x t;\ \ v_t = v_o + at;$$

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2};\ \ s_x = v_{ox}t + \frac{a_x t^2}{2};\ \ s = v_o t \pm \frac{at^2}{2};$$

$$l = v_o t \pm \frac{at^2}{2};\ \ x = x_o + v_o t \pm \frac{at^2}{2};\ v_t^2 - v_o^2 = \pm 2as$$

Равноускоренное движение	*Свободное падение* $v_o = 0,\ a \Rightarrow g;\ s \Rightarrow h$	*Движение тела, брошенного вертикально вверх* ↑
$a = \frac{v_t - v_0}{t}$ $v_t = v_o + at$ $s = v_o t \pm \frac{at^2}{2}$ $v_t^2 - v_o^2 = \pm 2as$	$g = \frac{v_t}{t}$ $v_t = gt$ $h = \frac{gt^2}{2}$ $v_t^2 = 2gh$ $h_{max} = \frac{v_t^2}{2g}$	$-g = -\frac{v_0}{t}$ $-v_o = -gt$ $h = v_o t - \frac{gt^2}{2}$ $-v_0^2 = -2gh$ $h_{max} = \frac{v_0^2}{2g}$

$$\Rightarrow v_t \downarrow = v_0 \uparrow;\ t \downarrow = t \uparrow$$

Пути, проходимые телом, движущимся с ускорением, в равные, последовательные промежутки времени, пропорциональны ряду нечетных чисел:

$s_1 : s_2 : s_3 : \ldots : s_n = 1 : 3 : 5 : \ldots : (2n - 1)$.

Движение тела, брошенного горизонтально

1) *по горизонтали*

$\vec{\upsilon}_0 = const \Rightarrow s = \upsilon_0 t;$

$\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}, \upsilon_x = \upsilon_0, \upsilon_y = gt.$

2) *по вертикали*:

$$h = \frac{gt^2}{2};$$

Движение тела, брошенного под углом к горизонту

1) *по горизонтали*

$\vec{\upsilon}_{0x} = const \Rightarrow s = \upsilon_{0x} t;$

$\upsilon_{0x} = \upsilon_0 \cos\alpha;$

2) *по вертикали*:

$h = \upsilon_{0y} t - \frac{gt^2}{2}; \upsilon_{0y} = \upsilon_0 \sin\alpha;$

3) $t = \frac{2\upsilon_0 \sin\alpha}{g};$

4) $t_{под} = t_{сп} = \frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{g};$

5) $h_{max} = \frac{g t_{сп}^2}{2} = \frac{\upsilon_0^2 \sin^2\alpha}{2g};$

$h_{max} \sim \upsilon_0^2$

6) $s = \frac{2\upsilon_0^2 \sin\alpha \cdot \cos\alpha}{g}; s \sim \upsilon_0^2$

Равномерное движение по окружности

Частота

$\nu = \frac{n}{t}, T\nu = 1$

Угловая скорость

$\omega = \frac{\varphi}{t}, \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

Линейная скорость

$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \omega R$

Центростремительное ускорение

$$a_ц = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2 R\nu^2$$

Первый закон Ньютона

$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0 \Rightarrow \vec{\upsilon} = const, \Rightarrow \vec{a} = 0$

Второй закон Ньютона

$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \Rightarrow \vec{F} = m\vec{a}$

Основное уравнение динамики

$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$

Третий закон Ньютона

$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$

Закон всемирного тяготения

$$mg = G\frac{mM}{R^2}$$

Закон Гука

$$\sigma = E\varepsilon,\ \sigma = \frac{F}{S},\ \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$F_{упр} = -kx$$

Вес тела на высоте

$$mg_h = G\frac{mM}{(R+h)^2}$$

Импульс тела

$$m\vec{\upsilon}$$

Импульс силы

$$\vec{F}t$$

Сила трения

$$F_{тр} = \mu N = \mu mg,\ 0 < \mu < 1$$

Закон сохранения импульса

$$m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + \ldots + m\vec{\upsilon}_n = const$$

Второй закон Ньютона

$$\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{\upsilon})$$

Первая космическая скорость

$$\upsilon_I = \sqrt{gR} = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Вторая космическая скорость

$$\upsilon_{II} = \sqrt{2gR} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Механическая работа

$$A = \left(\vec{F}\cdot\vec{s}\right) = Fs\cos\alpha$$

Мощность

$$N = \frac{A}{t} = F_{тяги}\upsilon_{ср}$$

$$A = -\left(\frac{kx^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$$

Потенциальная энергия

$$E_п = mgh,\ E_п = \frac{kx^2}{2}$$

Закон сохранения механической энергии

$$E = E_k + E_п = const$$

Кинетическая энергия

$$E_к = \frac{m\upsilon^2}{2}$$

КПД

$$\eta = \frac{A_{пол}}{A_{затр}}100\%,\ \eta = \frac{N_{пол}}{N_{затр}}100\%$$

$$A = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}$$

Первое условие равновесия

$$\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i = 0,\ \sum_{i=1}^{n}F_x = 0;\ \sum_{i=1}^{n}F_y = 0;\ \sum_{i=1}^{n}F_z = 0$$

Момент силы

$$M - Fl$$

Правило моментов

$$F_1l_1 = F_2l_2$$

ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ

Давление

$$p=\frac{F\cos\alpha}{S}$$

Гидравлический пресс

$$\frac{F_2}{F_1}=\frac{S_2}{S_1},\ \frac{F_2}{F_1}=\frac{h_1}{h_2}$$

Гидростатическое давление

$$p=\rho gh$$

Закон Архимеда

$$F_{выт}=\rho_{ж}gV$$
$$P_{в\ возд}-P_{в\ жидк}=$$
$$=F_{выт}$$

Закон сообщающихся сосудов

$$\frac{h_1}{h_2}=\frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Условия плавания тел

- $mg=F_{выт}$
- $\rho_T\leqslant\rho_{ж}$

Уравнение неразрывности струи

$$\rho\upsilon S=const,\ \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}=\frac{S_2}{S_1}$$

Уравнение Бернулли

$$p_1+\rho gh_1+\frac{\rho\upsilon_1^2}{2}=p_2+\rho gh_2+\frac{\rho\upsilon_2^2}{2}=const$$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Постоянная Авогадро

$$N_A=\frac{N}{\nu}$$

Количество вещества

$$\nu=\frac{m}{\mu}=\frac{N}{N_A}$$

Молярная масса

$$\mu=\frac{m}{\nu}=m_0N_A$$

Постоянная Больцмана

$$k=\frac{R}{N_A}$$

Масса одной молекулы

$$m_0=\frac{m}{N}=\frac{m}{\nu N_A}=\frac{\mu}{N_A}$$

Основное уравнение МКТ

$$p=\frac{2}{3}n_0\overline{E}_k$$

Концентрация молекул

$$n_0=\frac{p}{kT}$$

Средняя кинетическая энергия ($m_0=1$)

$$\overline{E}_k=\frac{3}{2}\kappa T$$

Средняя длина свободного пробега

$$\overline{\lambda}=\frac{1}{\sqrt{2}\pi n_0\sigma^2}$$

Давление идеального газа

$$p=n_0kT=\frac{1}{3}nm_0\overline{\upsilon}^2=\frac{1}{3}\rho\overline{\upsilon}^2$$

Средняя квадратичная скорость движения молекул

$$\upsilon_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{3\kappa T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$$

Объединенный газовый закон

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_0V_0}{T_0} = const\ ,\ m = const$$

Закон Бойля–Мариотта

$$p_0V_0 = p_1V_1 = const,$$
$$T = const,\ m = const$$

Закон Гей-Люссака

$$V = V_0(1+\alpha_V\, t),\ p = const,$$
$$m = const,\ \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_0}{T_0} = const$$

Закон Шарля

$$p = p_0(1+\alpha_p\, t),\ V = const,$$
$$m = const,\ \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_0}{T_0} = const$$

Закон Дальтона

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

Уравнение Менделеева–Клапейрона

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

Внутренняя энергия одного моля одноатомного идеального газа

$$U_{моль} = \frac{3}{2}N_A kT = \frac{3}{2}RT$$

Плотность газов

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}$$

Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T$$

Внутренняя энергия одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2}\cdot\frac{m}{\mu}RT$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Количество теплоты

$$\Delta Q = cm\Delta T$$

Теплоемкость тела

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T},\ C = mc$$

Удельная теплоемкость

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}$$

Первый закон термодинамики

$$\Delta Q = \Delta U + A\uparrow,\ \Delta Q = \Delta U - A\downarrow,\ A\uparrow = -A\downarrow$$

I закон, изотермический процесс ($T = const$)

$$\Delta Q = A = p\Delta V$$

Работа газа

$$A = p\Delta V$$

I закон, изобарный процесс ($p = const$)

$$\Delta Q = \Delta U + A = \Delta U + p\Delta V = \frac{5}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{5}{2}p\Delta V$$

I закон, изохорный процесс ($V = const$)

$$\Delta Q = \Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{3}{2}p\Delta V$$

I закон, адиабатный процесс ($\Delta Q = 0$)

$$\Delta U = -A$$

КПД теплового двигателя

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H}100\%,\ \eta = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H}100\%,\ \eta = \frac{A}{Q_H}100\%$$

Работа теплового двигателя

$$A = Q_H - Q_X$$

Уравнение теплового баланса

$$c_1 m_1(t_1 - \theta) = c_2 m_2(\theta - t_2)$$

Удельная теплота сгорания топлива

$$q = \frac{\Delta Q}{m}$$

Удельная теплота парообразования

$$r = \frac{\Delta Q}{m}$$

Удельная теплота плавления

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{m}$$

Относительная влажность

$$\varphi = \frac{\rho_A}{\rho_H}100\% = \frac{p_A}{p_H}100\%$$

Коэффициент поверхностного натяжения

$$d = \frac{F_n}{l}$$

Высота подъема жидкости в капилляре

$$h = \frac{2\pi\cos\theta}{R\rho g}$$

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Закон Кулона в вакууме

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

Закон Кулона в среде

$$F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

Напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Напряженность электрического поля точечного заряда

$$E = k\frac{q}{\varepsilon r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

Принцип суперпозиции полей

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$$

Закон сохранения электрического заряда

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n$$

Поверхностная плотность зарядов

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

Напряженность равномерно заряженной бесконечной плоскости

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

Потенциал

$$\varphi = \frac{A}{q}, \varphi = \frac{\Pi}{q}$$

Разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \frac{A}{q}$$

Потенциал точечного заряда

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r} = k\frac{q}{\varepsilon r}$$

Потенциал поля шара

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 (R + r)}$$

Напряженность поля шара

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 (R + r)^2}$$

Связь потенциала и напряженности

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d}$$

Потенциальная энергия двух зарядов

$$\Pi = W_n = \frac{kq^2}{\varepsilon r} = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$$

Потенциальная энергия

$$A = q?\Delta\varphi = q\frac{k}{\varepsilon}\left(\frac{q_1}{r_1} - \frac{q_1}{r_2}\right) = \frac{kqq_1}{\varepsilon}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{qq_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Электроемкость уединенного проводника

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Электроемкость конденсатора

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

Электроемкость сферического проводника

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R$$

Емкость параллельных конденсаторов

$$C_б = C_1 + C_2 + \ldots + C_n = \sum_{i=1}^{n} C_i$$

Емкость сферического конденсатора

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

Емкость последовательно соединенных конденсаторов

$$\frac{1}{C_б} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{C_i}$$

Потенциал заряженных шаров после их соединения

$$\varphi' = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \cdot \varphi_1 + C_2 \cdot \varphi_2}{C_1 + C_2} = \frac{R_1 \cdot \varphi_1 + R_2 \cdot \varphi_2}{R_1 + R_2}$$

Энергия электрического поля

$$W_э = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2}$$

Полная энергия системы

$$W_э = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i\varphi_i$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W_э = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{qU}{2}$$

Энергия не отключенного конденсатора

$$W_э = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$$

Энергия отключенного конденсатора

$$W_э = \frac{q^2}{2C}$$

Энергия однородного электрического поля

$$W_э = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V$$

Объемная плотность энергии

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$

Сила притяжения пластин плоского конденсатора

$$F = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 S}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d^2} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Сила тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, I = \frac{q}{t}, I = ne\bar{\upsilon}S$$

Плотность тока в проводнике

$$j = \frac{I}{S}, j = ne\bar{\upsilon}$$

Сопротивление проводника

$$R = \rho\frac{l}{S}$$

Зависимость от температуры

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

Проводимость проводника

$$G = \frac{1}{R}$$

ЭДС

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q}$$
$$\varepsilon = U + u$$

Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$$

Закон Ома для замкнутого контура

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Последовательное соединение проводников

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n$$

Параллельное соединение проводников

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

Последовательное соединение 2-х и n ЭДС

$$I_{пост} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R + r_1 + r_2},$$

$$I_{пост} = \frac{n\varepsilon}{R + nr}$$

Параллельное соединение n ЭДС

$$I_{пар} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}$$

Ток короткого замыкания

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}$$

Работа постоянного тока

$$A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2t}{R}$$

Полная мощность, выделяемая в цепи

$$P = I\varepsilon$$

Мощность электрического тока

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

КПД

$$\eta = \frac{A_{пол}}{A_{затр}}100\%,\ \eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}}100\%,\ \eta = \frac{Q_{пол}}{Q_{затр}}100\%$$

КПД батареи

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon}$$

КПД электрогенератора

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} = \frac{I^2R}{I^2(R+r)} = \frac{R}{R+r},$$

Сопротивление шунта амперметра

$$R_ш = \frac{R_A}{n-1}$$

Сопротивление шунта вольтметра

$$R_ш = R_V(n-1)$$

Работа сторонних сил в генераторе

$$A = \varepsilon It$$

Закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2Rt = \frac{U^2t}{R}$$

I закон Фарадея

$$m = Kq = KIt$$

II закон Фарадея

$$K = C\chi = \frac{1}{F}\frac{A}{n}$$

Постоянная Фарадея

$$F = |e|N_A$$

Объединенный закон Фарадея

$$m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}q = m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}It$$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Закон Ампера

$$F_A = BIl\sin\alpha$$

Сила Лоренца

$$F_Л = qB\upsilon\sin\alpha$$

Магнитный момент

$$\vec{P}_M = IS\vec{n}_0$$

Скорость вращения частицы

$$\upsilon = \frac{qBR}{m}$$

Период вращения частицы

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

Вектор магнитной индукции

$$B = \frac{F_A}{Il\sin\alpha}$$

Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0},\ \vec{B} = \mu\vec{B}_0,\ \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

Напряженность магнитного поля прямолинейного проводника с током

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Магнитный момент контура

$$\vec{P}_M = IS\vec{n}_0$$

Вращающий момент

$$M_{вр} = P_M B\sin\alpha = BIS\sin\alpha;\ B = \frac{M_{max}}{P_M}$$

Формула Ампера

$$F_A = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS\cos\alpha$$

Магнитное поле соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI,\ n = \frac{N}{l}$$

Закон электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},\ \varepsilon_i = Bl\upsilon\sin\alpha$$

Максимальная ЭДС индукции

$$\varepsilon_{i\max} = BS\omega$$

Индуктивность соленоида

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 V$$

ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_C = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Энергия магнитного поля

$$W_M = \frac{I\Delta\Phi}{2} = \frac{LI^2}{2}$$

Работа магнитного поля

$$A = I\Delta\Phi$$

Энергия магнитного поля соленоида

$$W = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n^2 I^2 V$$

Объемная плотность энергии

$$\varpi = \frac{\Delta W}{\Delta V}$$

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Гармоническое колебание

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0) = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0) = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

Максимальная скорость

$$\upsilon_{max} = A\omega = \frac{2\pi A}{T}$$

Частота колебаний

$$\nu = \frac{n}{t},\ T\nu = 1$$

Циклическая частота

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

Максимальное ускорение

$$a_{max} = A\omega^2 = \frac{4\pi^2 A^2}{T^2}$$

Скорость гармонического колебания

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = A\omega\cos(\omega t + \varphi_0) = \frac{2\pi A}{T}\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

Фаза колебаний

$$\varphi = \omega t + \varphi_0$$

Ускорение колеблющейся точки

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0) = -\frac{4\pi^2 A^2}{T^2}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

Сила, под действием которой точка массы m совершает гармоническое колебание

$$F = ma = -\frac{4\pi^2 A^2}{T^2}m\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) = -\frac{4\pi^2 m}{T^2}x = -kx$$

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Период колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Возвращающая сила

$$F_{возв} = -mg\frac{x}{l}$$

Циклическая частота

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Циклическая частота

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Жесткость пружины

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$$

Сила, под действием которой совершается гармоническое колебание:

$$F = ma = -\frac{4\pi^2 A^2}{T^2} m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) = -\frac{4\pi^2 m}{T^2} x = -kx$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$\Pi = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2}\sin^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{2\pi^2 A^2}{T^2} m \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

Кинетическая энергия колеблющейся точки

$$K = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}\cos^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{2\pi^2 A^2}{T^2} m \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

Полная энергия колебаний

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{m 2\pi^2 A^2}{T^2}$$

Длина волны

$$\lambda = \upsilon T = \frac{\upsilon}{\nu} = \frac{2\pi\upsilon}{\omega}$$

Уравнение гармонической волны

$$x = A\sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi l}{\lambda}\right)$$

Разность фаз

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\frac{l_2 - l_1}{\lambda}$$

Условие максимума при интерференции

$$\Delta l = l_2 - l_1 = 2k\frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, \ldots)$$

Циклическая частота

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Условие минимума при интерференции

$$\Delta l = l_2 - l_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, (k = 0, 1, 2, \ldots)$$

Формула Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Колебания заряда на обкладках конденсатора

$$q = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Колебания напряжения

$$U = U_0 \sin(\omega t + \varphi_0),\ U_0 = \frac{q_0}{C}$$

Колебания ЭДС

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t,\ \varepsilon_{max} = BS\omega$$

Колебания силы тока

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0),$$

$$I_0 = q_0 \omega$$

Эффективное (действующее) значение силы тока

$$I_{эфф} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_0$$

Эффективное (действующее) значение напряжения

$$U_{эфф} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} = 0{,}707 U_0$$

Переменный ток

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L$$

Полное сопротивление цепи переменного тока

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}$$

Емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{\varpi C}$$

Напряжение на активном сопротивлении

$$U_R = IR$$

Напряжение на емкостном сопротивлении

$$U_C = \frac{q}{C}$$

Напряжение на индуктивном сопротивлении

$$U_L = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Скорость электромагнитных волн

$$c = \lambda \nu = \frac{\lambda}{T}$$

Работа трансформатора

- *первичная обмотка*:

$$U_1 = I_1 R_1 + \varepsilon_1$$

- *во вторичной обмотке*:

$$\varepsilon_2 = I_2 R_2 + U_2$$

Энергия потерь

$$W_{потерь} = I^2Rt$$

Коэффициент трансформации

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_{2x}}$$

Скорость электромагнитных волн в среде

$$\upsilon = \frac{c}{n},\ \upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}},\ \sqrt{\varepsilon\mu} = n$$

ОПТИКА

Отражение света

$$\angle\alpha = \angle\beta$$

Преломление света

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$$

Предельный угол полного внутреннего отражения

$$\sin\alpha_{пр} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n},\ (n_2 = 1)$$

Относительный показатель преломления

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$$

Абсолютный показатель преломления

$$n = \frac{c}{\upsilon} = \sqrt{\varepsilon\mu}$$

Формула толстой линзы

$$D = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}$$

Увеличение линзы

$$K = \frac{f}{d} = \frac{H}{h}$$

Формула тонкой линзы

$$\pm\frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}$$

Увеличение лупы

$$K = \frac{L}{F}$$

Период дифракционной решетки

$$d = \frac{1}{N}$$

Условие максимума для интерференции света

$$\Delta l = 2\kappa\frac{\lambda}{2} = \kappa\lambda,\ k = 0, 1, 2 \ldots$$

Условие минимума для интерференции света

$$\Delta l = (2\kappa + 1)\frac{\lambda}{2},\ k = 0, 1, 2 \ldots$$

Условие максимума для интерференции света

$$\frac{d \cdot x}{L} = k\lambda$$

Условие максимума для дифракции света

$$\frac{d \cdot x}{L} = k\lambda$$

Условие максимума для дифракционной решетки

$$d\sin\varphi = k\lambda,\ k = 0, 1, 2 \ldots$$

Условие минимума для дифракционной решетки

$$d\sin\varphi = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$$

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Энергия покоя частицы

$$E = m_0c^2$$

Закон взаимосвязи массы и энергии

$$E = mc^2$$

Длина в движущейся системе отсчета

$$l = l_0\sqrt{1-\beta^2},\ \beta = \frac{\upsilon}{c}$$

Время в движущейся системе отсчета

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}},\ \beta = \frac{\upsilon}{c}$$

Импульс тела

$$p = m\upsilon = \frac{m_0\upsilon}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Релятивистский закон сложения скоростей

$$\upsilon = \frac{\upsilon' + V}{1 + \frac{\upsilon' V}{c^2}}$$

Масса в движущейся системе отсчета

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},\ \beta = \frac{\upsilon}{c}$$

Полная энергия

$$W = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Кинетическая энергия

$$E = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) = \Delta mc^2,\ \beta = \frac{\upsilon}{c}$$

Связь между энергией и импульсом

$$W = \frac{p}{\upsilon}c^2;\ p = \sqrt{\frac{W^2 - m_0^2c^4}{c^2}} = \frac{\sqrt{W^2 - E_0^2}}{c}$$

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Импульс фотона

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Масса движущегося фотона

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m\upsilon^2}{2}$$

Красная граница фотоэффекта

$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A_{вых}},\ \nu_{кр} = \frac{A_{вых}}{h}$$

Энергия фотоэлектронов

$$\frac{m\upsilon_{max}^2}{2} = eU,$$

I постулат Бора (условие квантования)

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}$$

Радиусы стационарных орбит

$$r_n = \frac{n^2 \cdot h^2}{k \cdot Z \cdot e^2 \cdot m},\ k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

II постулат Бора

$$h\nu_{ik} = E_k - E_i$$

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_P + (A - Z)m_n - m_я,$$

Энергия ядерной реакции

$$\Delta E = \Delta m\ 931{,}5\ \text{МэВ}$$

Правило смещения при α-распаде

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{A-4}_{Z-2}Y$$

Правило смещения при β-распаде

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y$$

Энергия связи атомного ядра

$$\Delta E_{св} = \Delta mc^2$$

Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}},\ N = N_0 e^{-\lambda t},\ \lambda = 2{,}71828$$

Область ответов тестов

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	3	1	4	3	3	1	2	4	5	2	3

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	5	4	3	5	2	4	3	2	5

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	3	5	2	5	4	2	3	3	2	1	5

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	2	5	3	1	2	4	2	1	4	2

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	4	1	2	1	3	2	5	2

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	2	2	4	2	3	1	1	4	1	3

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	2	5	5	1	1	1	3	2	3	4	2

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	4	3	3	3	2	3	3	3	2	5	4

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	3	1	1	2	4	1	1	3	2	3	4

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	2	2	5	2	1	4	1	2	4	4	2

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4	3	4	2	2	5	3	1	3	3	2

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	2	2	2	5	2	4	3	4	1	5	3

ОБЛАСТЬ ОТВЕТОВ ТЕСТА № 13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	1	5	2	4	1	4	2	3	3	1	4

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хорошавина С.Г.* Экспресс-курс физики для школьников, абитуриентов, студентов. — Ростов н/Д: Феникс, 2010. — 479 с.

2. *Хорошавина С.Г.* Экспресс-курс физики для школьников, абитуриентов, студентов. — Ростов н/Д: Феникс, 2008. — 474 с.

3. *Хорошавина С.Г.* Экспресс-курс физики для школьников, абитуриентов, студентов. — Ростов н/Д: Феникс, 2005. — 474 с.

4. *Хорошавина С.Г.* Справочник по физике. — Ростов н/Д: Феникс, 2002. — 384 с.

5. *Хорошавина С.Г.* Физика для поступающих в ДГТУ. Краткая теория, методические указания, примеры решения задач и контрольные работы. — Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2001. — 207 с.

6. *Хорошавина С.Г.* Шпаргалка по физике. Ростов н/Д: Феникс, 2002. — 64 с.

7. *Кабардин О.Ф.* Физика. Справочные материалы. Учебное пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1985. — 319 с.

8. *Гурский И.П.* Элементарная физика с примерами решения задач. — М.: Наука, 1984. — 447 с.

9. *Кухлинг Х.* Справочник по физике. — М.: Мир, 1985. — 520 с.

10. *Яворский Б.М., Селезнев Ю.А.* Справочное руководство по физике. — М.: Наука, 1975. — 624 с.

11. *Гофман Ю.В.* Законы, формулы, задачи физики. — Киев: Наукова думка, 1977. — 573 с.

12. *Жданов Л.С.* Учебник по физике для средних специальных учебных заведений. — М.: Наука, 1975. — 590 с.

13. *Хорошавина С.Г.* Методическое пособие к решению задач по ядерной физике. — Ростов н/Д: МО СССР, 1986. — 90 с.

14. Программа по физике для поступающих в вузы // Абитуриент (журнал для поступающих в вузы). 2001. № 8.

15. Тесты. Физика. 11 класс. Варианты и ответы государственного тестирования. Пособие для подготовки к тестированию. — М.: Прометей, 1996–2010.

16. Единый государственный экзамен. Физика. Варианты контрольных измерительных материалов. МО РФ — М.: Центр тестирования Минобразования России, 2002–2010.

ОГЛАВЛЕНИЕ