

Кравченко Игорь Игоревич
Кравченко Ивета Николаевна

Физика для всех

*Электронный иллюстрированный справочник
по физике*

Оглавление

I	Механика	6
1	Кинематика	7
1	Векторы	8
2	Числа и приставки	9
3	Механическое движение	10
4	Основные понятия кинематики	11
5	Виды механического движения	12
6	Формулы для прямолинейного движения	13
7	Сложение и относительность скоростей	14
8	Средняя скорость	15
9	Графики механического движения	16
10	Свободное падение	17
11	Движение по окружности	18
12	Основы механических передач	19
2	Динамика	20
13	Система отсчета. Действие	21
14	Первый закон Ньютона	22
15	Инертность и масса	23
16	Взаимодействие и сила	24
17	Второй и третий законы Ньютона	25
18	Силы тяготения и реакции	26
19	Сила упругости	27
20	Сила трения	28
21	Давление	29
3	Статика	30
22	Момент силы	31
23	Равновесие твердого тела	32
24	Центр масс	33
25	Закон Паскаля	34
26	Гидравлический пресс	35
27	Давление в жидкости	36
28	Закон Архимеда	37
29	Закон Архимеда	38

4	Законы сохранения	39
30	Импульс	40
31	КПД механизма	41
32	Энергия	42
33	Сохранение и изменение энергии	43
5	Механические колебания и волны	44
34	Механические колебания	45
35	Маятники	46
36	Механическая волна	47
II	Молекулярная физика. Термодинамика	48
6	Молекулярная физика	49
37	Основные понятия молекулярной физики	50
38	Диффузия. Броуновское движение	51
39	Основные формулы молекулярной физики	52
40	Формулы для идеального газа	53
41	Закон Дальтона	54
42	Изопроцессы	55
43	Пар	56
44	Влажность воздуха	57
7	Термодинамика	58
45	Внутренняя энергия	59
46	Теплопередача	60
47	Количество теплоты	61
48	Изменения агрегатных состояний вещества	62
49	Графики тепловых процессов	63
50	Работа газа	64
51	Законы термодинамики	65
52	Тепловые машины	66
III	Электродинамика	67
8	Электростатика	68
53	Заряженные частицы и тела	69
54	Заряд	70
55	Электризация	71
56	Электроскоп. Закон сохранения заряда	72
57	Закон Кулона. Электрическое поле	73
58	Напряженность электрического поля	74
59	Линии электрического поля	75
60	Потенциал	76
61	Эквипотенциальные поверхности	77
62	Сложение электрических полей	78
63	Проводник	79

64	Проводник в электрическом поле	80
65	Электрическое поле проводящего шара	81
66	Диэлектрик	82
67	Конденсатор	83
68	Соединения конденсаторов	84
9	Постоянный ток	85
69	Электрический ток	86
70	Сопротивление	87
71	Закон Ома	88
72	Соединения проводников	89
73	Работа тока. Закон Джоуля—Ленца	90
74	Источник тока	91
75	Закон Ома для полной цепи	92
76	Полупроводник	93
77	Полупроводники <i>p</i> - и <i>n</i> -типа	94
78	<i>p</i> – <i>n</i> -Переход	95
10	Магнитное поле	96
79	Магнит. Магнитное поле	97
80	Магнитная стрелка	98
81	Индукция и линии магнитного поля	99
82	Сложение магнитных полей	100
83	Опыт Эрстеда	101
84	Магнитное поле прямого провода с током	102
85	Магнитное поле кольца с током	103
86	Магнитное поле катушки с током	104
87	Сила Ампера	105
88	Сила Лоренца	106
11	Электромагнитная индукция	107
89	Магнитный поток	108
90	Закон электромагнитной индукции Фарадея	109
91	ЭДС индукции в движущемся проводе	110
92	Правило Ленца	111
93	Катушка. Самоиндукция	112
12	Электромагнитные колебания и волны	113
94	Электромагнитные колебания	114
95	Свободные колебания в контуре	115
96	Вынужденные колебания в контуре	116
97	Электроэнергия	117
98	Электромагнитная волна	118
IV	Оптика	119
13	Геометрическая оптика	120
99	Свет. Луч света	121

100	Отражение света. Зеркало	122
101	Преломление света	123
102	Полное внутреннее отражение	124
103	Линза	125
104	Ход лучей в тонкой линзе	126
105	Построение изображения в линзе	127
106	Глаз	128
14	Волновая оптика	129
107	Сложение световых волн	130
108	Интерференция света	131
109	Дифракция света	132
110	Дисперсия света	133
15	Основы специальной теории относительности (СТО)	134
111	Принципы СТО	135
112	Основные формулы СТО	136
V	Квантовая физика	137
16	Фотоны	138
113	Фотоэффект	139
114	Формулы для фотоэффекта	140
115	Давление света	141
116	Постулаты Бора	142
117	Спектры	143
118	Атомное ядро	144
119	Радиоактивность. Ядерные реакции	145
VI	Приложение	146
17	Как решать задачи по физике	147
120	Как найти ответ к задаче	148
121	Специальные записи	149

Часть I

Механика

Глава 1

Кинематика

1 Векторы

Вектор — это стрелка на чертеже для описания направления физической характеристики. На рис. 1 вектор имеет синий цвет.



Рис. 1. Вектор и масштаб

Красный элемент на рис. 1 есть *масштаб*, по которому определяется длина вектора в указанных единицах — то есть **величина** или **модуль вектора**. Видно, что величина данного вектора $v = 6$ м/с. Используются также и другие единицы измерения (буквы после числа) — например, «м», «м/с²» и т. д.

Проекция вектора — это «тень» вектора на ось координат при освещении перпендикулярно на эту ось. На рис. 2 показаны проекции v_x и v_y .

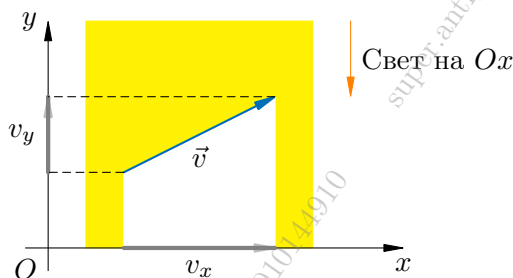


Рис. 2. Проекция вектора

В общем случае проекция вектора равна длине «тени» со знаком

- +, если «теневая» стрелка стоит по оси;
- −, если «теневая» стрелка стоит против оси.

На рис. 2 по обозначениям возле «теней» видно, что проекция не является вектором. Если приписать «крыши» над v_x и v_y и лучше выделить их «теневые наконечники», то окажется, что вектор $\vec{v}$ разложен на **составляющие** векторы $\vec{v}_x$ и $\vec{v}_y$. Треугольник из этих векторов дает: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Сложить векторы — это значит найти вектор, который совмещает в себе как бы «действия» этих векторов. Два сонаправленных вектора «дают» вектор в ту же сторону (длины складываются). Также ясно, что два противоположно направленных вектора «дают» вектор в сторону большего вектора (длины вычитаются). На рис. 3 показано, как сложить два произвольных вектора.

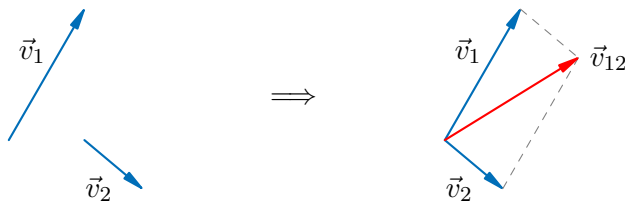


Рис. 3. Правило параллелограмма

2 Числа и приставки

При решении задач с вычислениями могут получаться «неудобные» числа двух типов. Иллюстрируют сказанное следующие примеры:

- 12000000;
- 0,0000034.

Оказывается, вид этих длинных чисел можно исправить, используя компактную запись — так называемую **стандартную запись**:

$$\text{«Длинное число»} = A \cdot 10^n,$$

где $1 < A < 10$; $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Таким образом, числа из примеров выше можно записать так:

- $1,2 \cdot 10^7$;
- $3,4 \cdot 10^{-6}$.

Как видно, 10^7 «переносит» запятую вправо на 7 знаков, увеличивая число; 10^{-6} «переносит» запятую влево на 6 знаков, уменьшая число.

Далее, множители вида 10^n называют **десятичными приставками**. Такие приставки вместе с буквенными вариантами представлены в табл. 1.

Табл. 1. Десятичные приставки

Имя	Обозначение	Множитель	Имя	Обозначение	Множитель
гига	Г	10^9	санти	с	10^{-2}
мега	М	10^6	милли	м	10^{-3}
кило	к	10^3	микро	мк	10^{-6}
гекто	г	10^2	нано	н	10^{-9}
деци	д	10^{-1}	пико	п	10^{-12}

Часто требуется перевести численные значения из одних единиц измерения в другие. Главное — научиться делать простые «переводы» двух видов.

1. Из «приставочных» единиц в «бесприставочные».

Например, нужно перевести 5 км в значение в метрах. Лишнее тут — буква «к»; ее можно расшифровать по табл. 1:

$$5 \text{ км} = 5 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

2. Из «бесприставочных» единиц в «приставочные».

Например, нужно перевести 6 г в значение в килограммах. Сначала следует вписать нужную букву и оставить место перед единицами:

$$6 \text{ г} = 6 \quad \text{кг.}$$

Теперь нужно дописать «противоположный» множитель из табл. 1. Вписывалась буква «к», которой соответствует 10^3 . Тогда дописывается 10^{-3} :

$$6 \text{ г} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Такой перевод, как «км → мм», делают по двум этим правилам поочередно.

3 Механическое движение

Механическое движение — это изменение положения одного тела относительно другого тела. На рис. 4 показан опыт с движением.

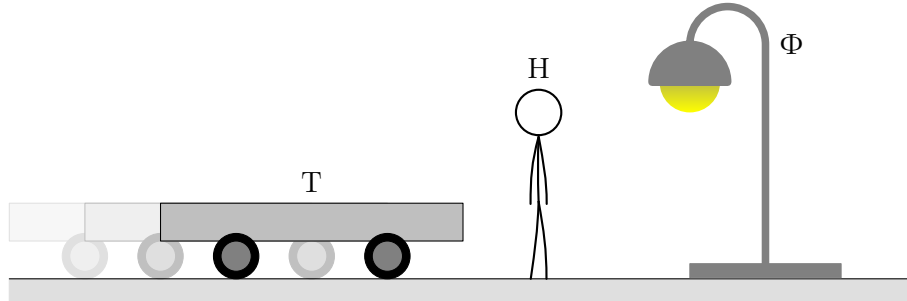


Рис. 4. К определению механического движения

Наблюдатель Н, прикрепленный к планете, сообщает, что движется тележка Т, но не фонарь Ф (его объяснение: тележка располагается все ближе и ближе). Затем наблюдатель прикрепляется к тележке, взяв с собой часы Ч и систему координат xOy (так сказать, «инструменты»); опыт повторяют (рис. 5).

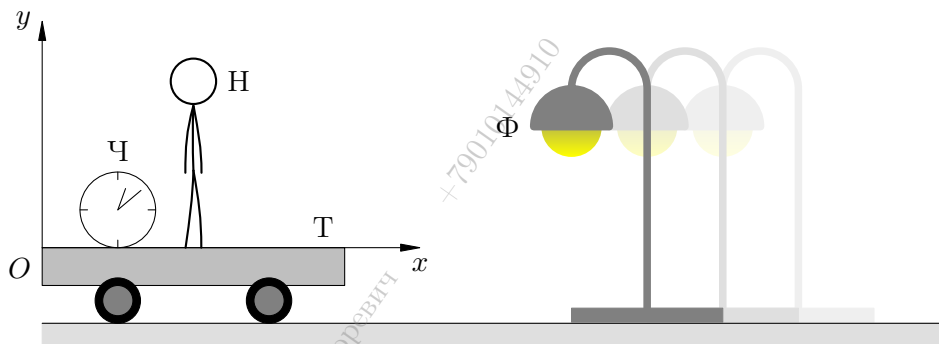


Рис. 5. Наблюдатель на тележке

Теперь наблюдатель, прикрепленный к тележке, сообщает, что движется фонарь, а не тележка (его объяснение: фонарь располагается все ближе и ближе).

Итак, всякое **движение относительно**: необходимо выбирать дополнительное тело, относительно которого проверяется, двигается ли какое-то тело, за которым следят.

Тело отсчета — это и есть то дополнительное тело, к которому прикрепляется наблюдатель, чтобы следить за «главным» телом в задаче. Например, на рис. 4 телом отсчета является планета, а на рис. 5 — тележка. Полезно *мысленно превращать себя в наблюдателя* и представлять, как двигается то или иное тело в данной ситуации.

Система отсчета — это набор «инструментов» к описанию движения тела:

- тело отсчета;
- система координат (припаянная к телу отсчета);
- часы.

На первых порах под системой отсчета можно понимать тело отсчета.

4 Основные понятия кинематики

Материальная точка — это тело, размеры которого можно не учитывать. Все остальные значимые физические свойства у таких тел присутствуют.

Так, описывая движение муравья, удаляющегося на расстояние в несколько метров от начальной точки, можно представлять себе просто движущуюся точку. Такой случай (вид сверху) показан на рис. 6.

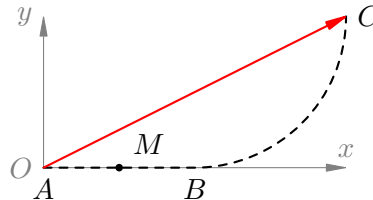


Рис. 6. Движение материальной точки

На рис. 6 муравей M (тело) двигался из точки A в точку C , пройдя точку B , вдоль штриховой линии — **траектории**.

Координаты $(x, y \text{ [м]})$ тела показывают местонахождение тела. Например, точке A соответствуют $x_A = 0 \text{ м}$ и $y_A = 0 \text{ м}$; точке B — $x_B > 0 \text{ м}$ и $y_B = 0 \text{ м}$.

Путь $(S \text{ [м]})$ — это длина траектории (следа), по которой двигалось тело. В предыдущем примере путь есть длина кривой ABC .

Перемещение $(\vec{r} \text{ [м]})$ ¹ — это вектор, соединяющий начальное и конечное положения тела. Красный вектор на рис. 6 есть перемещение муравья.

Время $(t \text{ [с]})$ — это длительность процесса. Можно сказать, что время — это неотъемлемая форма мышления наблюдателя.

Теперь нужно сказать о двух важных характеристиках движения.

- **Скорость** $(\vec{v} \text{ [м/с]})$ — это характеристика движения, показывающая перемещение тела за одну секунду. Этот вектор всегда направлен по касательной к соответствующей траектории. Скорость $\vec{v}$ как бы указывает, куда сдвинется тело через малый промежуток времени.
- **Ускорение** $(\vec{a} \text{ [м/с}^2\text{]})$ — это характеристика движения, показывающая, на сколько изменяется скорость тела за одну секунду. Ускорение $\vec{a}$ как бы указывает, куда стремится конец вектора $\vec{v}$.

Тот же муравей снова двигается по той же самой траектории, причем на прямом участке разгоняется, а на закругленном — движется в одном темпе. На рис. 7 показаны векторы $\vec{v}$ и $\vec{a}$ в различных положениях тела M_1 и M_2 .

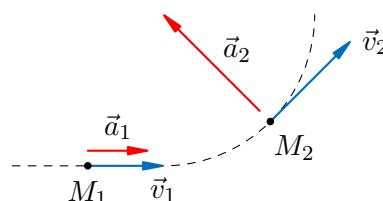


Рис. 7. Скорости и ускорения точки

¹Строго говоря, $\Delta \vec{r}$.

5 Виды механического движения

В задачах чаще всего встречаются следующие виды механического движения *материальной точки*. (Положения тел на первых двух рисунках фиксируют *ежесекундно*².)

1. При **равномерном прямолинейном** движении тело за каждую секунду совершает одинаковое перемещение (рис. 8).

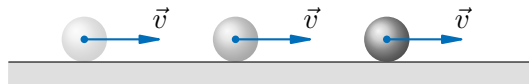


Рис. 8. $\vec{v} = \text{const} \Leftrightarrow \vec{a} = 0$

2. При **равнопеременном прямолинейном** движении за каждую секунду скорость тела изменяется одинаково (рис. 9).



Рис. 9. $\vec{v} = \text{var} (\vec{a} = \text{const})$

3. При **неравномерном** (произвольном) движении скорость и ускорение тела в общем случае меняются во времени (рис. 10; тело скатывается внутри трубы).

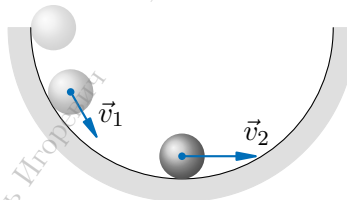


Рис. 10. $\vec{v} = \text{var} (\vec{a} = \text{var})$

Для тела, размерами которого *нельзя* пренебречь, выделяют следующие возможные виды движения.

- При **поступательном** движении прямая, «впаянная» в тело, перемещается *параллельно* своему первоначальному направлению. Такой случай изображен на рис. 11, слева (скольжение параллелепипеда).
- При **непоступательном** движении «впаянная» в тело прямая движется *непараллельно* своему первоначальному направлению. Такая ситуация изображена на рис. 11, справа (качение шара).



Рис. 11. Поступательное и непоступательное движения

²Для наглядности на первых трех рисунках — шары (подразумевать материальные точки).

6 Формулы для прямолинейного движения

Для решения задач, где тело движется по прямой³ (с ускорением и без), во многих случаях достаточно знания трех формул⁴.

- **Перемещение:**

$$S_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (1)$$

где v_{0x} — проекция начальной скорости.

- **Координата:**

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (2)$$

где x_0 — начальная координата.

- **Ускорение:**

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где v_x — проекция конечной скорости, Δt — промежуток времени.

Все «удобные» формулы кинематики прямолинейного движения получают из формул (1)–(3), выражая необходимую букву в подходящем уравнении. Если необходимо, формулы комбинируют, подставляя выражение для какой-то буквы из одного уравнения в другое.

Если есть умение брать производные в математике, то можно пользоваться «быстрыми» вариантами формул для нахождения скоростей и ускорений.

- **Скорость:**

$$v_x = x'. \quad (4)$$

- **Ускорение:**

$$a_x = v'_x = x''. \quad (5)$$

Штрих означает производная. В данном случае в физике производная берется по времени t (в математике обычно — по x). Таким образом, буквы под штрихами в формулах (4) и (5) следует заменять на выражения с буквами t и применять далее правила вычисления производных. Далее пример для ясности.

Пример. Пусть координата тела зависит от времени по такому закону:

$$x = 1 + 2t.$$

Тогда с помощью производных получается:

$$\begin{aligned} v_x = x' &= (1 + 2t)' = (1)' + (2t)' = 0 + (2' \cdot t + 2 \cdot t') = (0 \cdot t + 2 \cdot 1) = 2 \text{ м/с}, \\ a_x = v'_x &= (2)' = 0 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

Такие вещи, как, например, $(1 + 2t)' = (1)' + (2t)'$ и $(1)' = 0$, есть применения на практике правил взятия производной (отрабатываются отдельно).

³Иногда также и по кривой (в том числе по параболе).

⁴Приводятся формулы в проекции на ось Ox . Для других осей аналогично.

7 Сложение и относительность скоростей

Движение тела, разумеется, можно рассматривать не только относительно планеты. На рис. 12 показан опыт с катящимся шаром по неподвижной тележке.

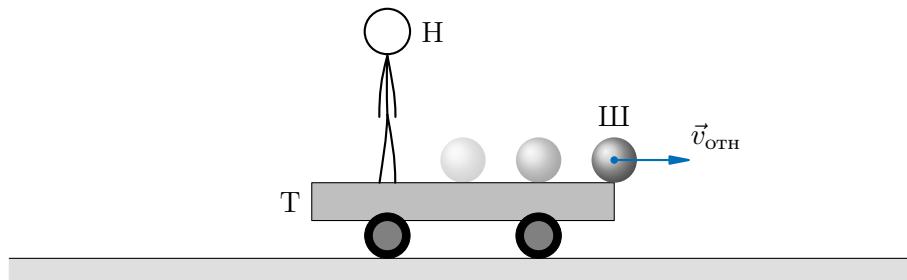


Рис. 12. Тележка покоится

Наблюдатель Н толкает шар Ш вправо и измеряет скорость шара $\vec{v}_{отн}$ относительно тележки Т. Такой толчок дал бы ту же скорость, даже если бы тележка катилась равномерно прямолинейно: ведь наблюдатель стоит на ней.

Ясно, что если шар толкают так же, а тележка движется, то расстояние пройденное шаром за то же время относительно планеты будет другим (рис. 13).

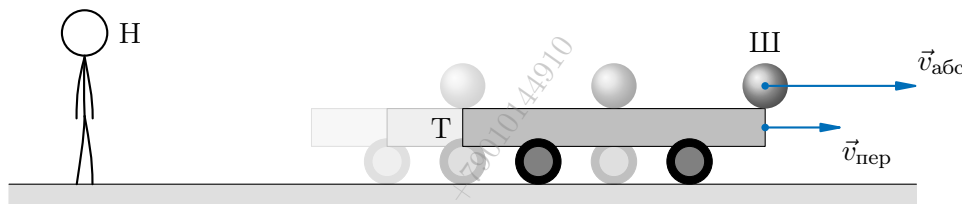


Рис. 13. Тележка движется

Шар снова толкают вправо и его скорость в системе отсчета тележки опять равна $\vec{v}_{отн}$ (на рис. 13 не показана). В этот раз тележка имеет скорость $\vec{v}_{пер}$ и как бы переносит тело. В системе отсчета планеты шар теперь движется с некоторой скоростью $\vec{v}_{абс}$, называемой *абсолютной скоростью*. Связь трех ключевых скоростей, упомянутых ранее, дает **закон сложения скоростей**:

$$\vec{v}_{абс} = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_{пер}, \quad (6)$$

где $\vec{v}_{отн}$ — *относительная скорость*, $\vec{v}_{пер}$ — *переносная скорость*.

Иногда решение задачи становится проще, если рассматривать движение одного тела, прикрепившись к другому. На рис. 14 красное тело догоняет синее.

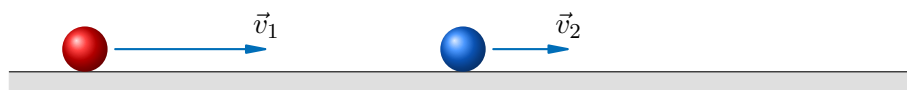


Рис. 14. Красный шар настигает синий шар

Если стоять на синем (правом) шаре, скользящем, например, без вращения, можно измерять скорость сближения — то есть **относительную скорость**:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2, \quad (7)$$

где $\vec{v}_{12}$ — скорость первого тела относительно второго тела.

8 Средняя скорость

При неравномерном движении скорость⁵ в общем случае может меняться. Это имеет место, например, при непредсказуемом движении муравья (рис. 15).

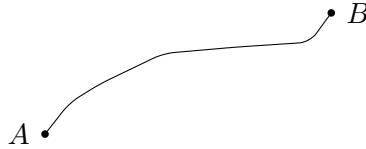


Рис. 15. Траектория муравья

Муравей двигался по кривой траектории из пункта A в пункт B со случайно изменяющейся скоростью во времени, пройдя путь $S_{\text{общ}}$ за время $\Delta t_{\text{общ}}$. Если неинтересно, как тело двигалось в малые промежутки времени, то быстроту движения можно оценить по **средней скорости**:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{общ}}}{\Delta t_{\text{общ}}}. \quad (8)$$

Когда что-то известно о «частях» траектории (например, сколько участков выделяют в движении), то формулу (8) можно записать так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_1 + S_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots},$$

где S_1, S_2 — пути; t_1, t_2 — промежутки времени соответствующих участков.

Можно сказать, что средняя скорость — это такая скорость, которую нужно поддерживать телу, чтобы тот же путь был пройден за то же время, что и при действительном движении.

Среднюю скорость, о которой говорилось выше, называют также *путевой*. Этим подчеркивается, что во внимание принимается именно *путь* — то есть длина какой-либо траектории. Теперь следует разобрать одну простую задачу.

Задача. Санки, двигаясь по горе, прошли в течение первой секунды движения 2 м, второй секунды — 6 м, третьей секунды — 10 м и четвертой секунды — 14 м. Найдите среднюю скорость за первые две секунды, за последние две секунды и за все время.

Решение. Движение «разбито» на 4 участка. Для первых двух можно найти:

$$v_{\text{ср}1,2} = \frac{S_1 + S_2}{t_1 + t_2} = \frac{2 + 6}{1 + 1} = 4 \text{ м/с}.$$

Для вторых двух и всех четырех аналогично:

$$v_{\text{ср}3,4} = \frac{S_3 + S_4}{t_3 + t_4} = \frac{10 + 14}{1 + 1} = 12 \text{ м/с},$$

$$v_{\text{ср}1-4} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = \frac{2 + 6 + 10 + 14}{1 + 1 + 1 + 1} = 8 \text{ м/с}.$$

⁵И ускорение тоже.

9 Графики механического движения

Информация о движении часто дается в виде *графиков движения*. Все основные кинематические характеристики (перемещение, скорость и т. д.) обычно зависят от времени, что можно представить графически (то есть графиками).

Первый опыт. Две тележки красного и синего цвета с моторами устанавливают друг за другом на некотором расстоянии.

Моторы запускают, и тележки набирают скорости «мгновенно». На рис. 16 показаны графики пути, координаты и скорости тел в соответствующих цветах.

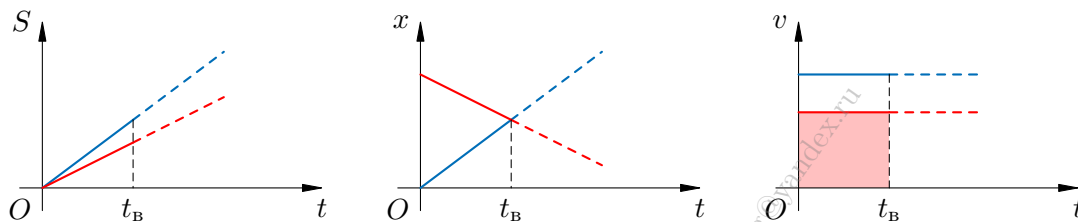


Рис. 16. Графики к первому опыту

Комментарии к рис. 16. Из графиков $S(t)$ можно видеть, что скорость синей тележки больше скорости красной — ведь синий график всегда выше. Время встречи t_B определяется точкой пересечения графиков $x(t)$, из которых следует, что тела двигались навстречу друг другу. Постоянство скоростей и их различие ясно отражены на графиках $v(t)$ (о выделенной фигуре будет сказано ниже).

Второй опыт. Условия такие же, как и в первом опыте. Моторы запускают так, что *только одна* тележка набирает некоторую скорость практически мгновенно. На рис. 17 показаны графики проекции перемещения, координаты и проекции скорости тел в соответствующих цветах.

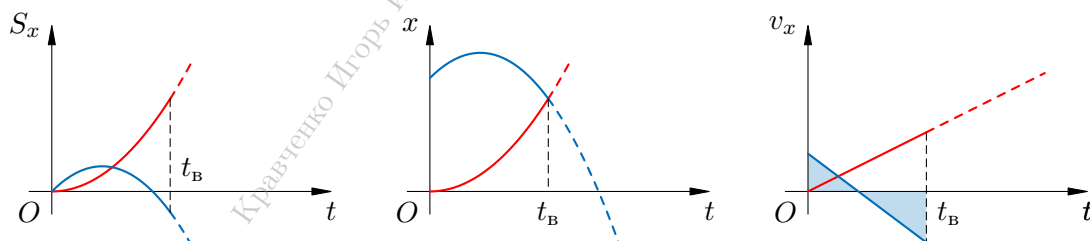


Рис. 17. Графики ко второму опыту

Комментарии к рис. 17. Из графиков $S_x(t)$ видно, что движения неравномерны; считая, что кривые являются параболами, можно заключить, что оба тела движутся равноускоренно. Время встречи t_B дается точкой пересечения графиков $x(t)$, точки пересечения которых с осью Ot показывают, когда тела находились в точке O системы координат на местности. Сравнивая наклоны графиков $v_x(t)$, можно заметить, что ускорение синей тележки больше, чем красной.

Площадь фигуры между графиком и осью Ot на диаграмме $v(t)$ или $v_x(t)$ (рис. 16, рис. 17; выделено) равна *пути*, пройденному телом за соответствующий промежуток времени.

10 Свободное падение

Свободным падением называют движение, происходящее под влиянием только планеты. Влияние планеты выражается, так сказать, в стремлении всех тел падать вниз. Происходит такое движение обычно вблизи земной поверхности — то есть поверхность считается плоской.

Опыт с падением тяжелого шара на поверхность планеты показан на рис. 18 (положение тела фиксируют каждую секунду).

Из рис. 18 видно, что за каждую секунду движения скорость тела меняется на одну и ту же величину, то есть движение является равноускоренным. **Ускорение свободного падения** обозначается $\vec{g}$, оно направлено вертикально вниз (или к центру планеты).

В большинстве задач вблизи поверхности планеты ускорение $\vec{g}$ для любого тела полагают одинаковым независимо от, например, его размеров, массы и т. д.

Теперь можно рассмотреть полет тела, пущенного с начальной скоростью под некоторым углом к горизонту (рис. 19).

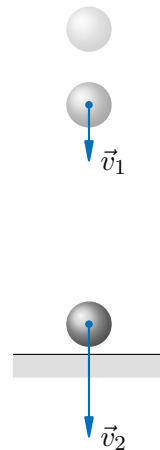


Рис. 18.
Падение шара

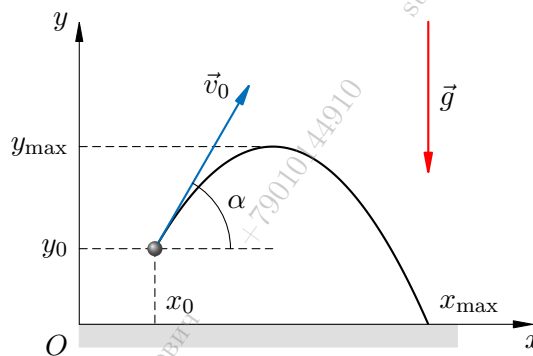


Рис. 19. Полет тела

В начальный момент времени тело находилось над поверхностью планеты в точке с координатами x_0 и y_0 и имело скорость $\vec{v}_0$, направленную под углом α к горизонту. Ускорение свободного падения $\vec{g}$ есть красный вектор на рис. 19. Можно показать, что траекторией тела в системе координат xOy является парабола (черная жирная линия на рис. 19). Конечной точкой падения будет точка пересечения траектории с планетной поверхностью — то есть с осью Ox . Полезно замечать характерные точки «следа» тела: так, точка наивысшего подъема характеризуется координатой $y_{\max}$; а точка наибольшего удаления по горизонтали — координатой $x_{\max}$.

Вот опорные уравнения для построения решений многих задач этой темы.

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2}, \\ y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}. \end{cases} \quad \begin{cases} v_x = v_{0x} + g_x t, \\ v_y = v_{0y} + g_y t. \end{cases}$$

11 Движение по окружности

Для начала следует рассмотреть движение по окружности или ее части — дуге, происходящее с *постоянной величиной скорости*.

Пусть имеется колесо от тележки (шину сняли), ось которого закрепили горизонтально. В некоторой точке на краю колеса оказался муравей (тело); колесо привели в равномерное вращение. На рис. 20 показан опыт с движением этого муравья (положения тела фиксируют каждую секунду).

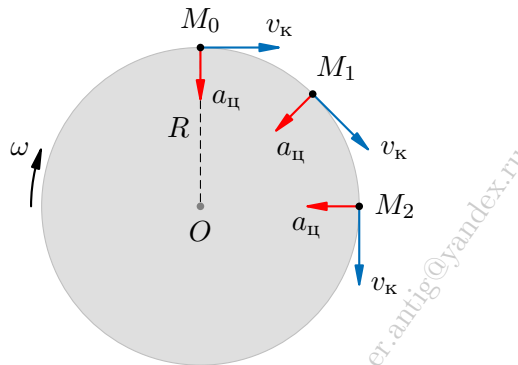


Рис. 20. Движение по окружности

Муравей (не перемещаясь относительно колеса) последовательно проходит точки M_0 , M_1 и M_2 , лежащие на окружности радиусом R . Тело имеет скорость v_k , называемую **касательной скоростью** (или *линейной скоростью*). В данном движении модуль этой скорости сохраняется.

Вращение обычно происходит *по или против часовой стрелки*. Такое движение, после которого точка оказывается в начальном положении, есть **оборот**.

Период (T [с]) — это время, за которое тело совершает 1 *оборот*. Можно видеть, что тело на рис. 20 вернется в точку M_0 через время $T = 8$ с. Вот связи периода со скоростью и числом оборотов N :

$$T = \frac{2\pi R}{v_k} = \frac{\Delta t}{N}. \quad (9)$$

Частота (ν [Гц]) — это характеристика вращения, показывающая сколько оборотов совершает точка за одну секунду:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (10)$$

Угловая скорость (ω [$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$]) — это характеристика вращения, показывающая на какой угол «поворачивается» точка за одну секунду. Скорость ω как бы указывает направление вращения точки в виде изогнутой стрелки (на рис. 20 изображена черным цветом). Формула угловой скорости:

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta t} = 2\pi\nu, \quad (11)$$

где φ — угол, на который «повернулась» точка.

Тело на рис. 20 имеет ускорение $a_{\text{ц}}$, называемое **центростремительным ускорением** (всегда направлено к центру окружности):

$$a_{\text{ц}} = \frac{v_k^2}{R}. \quad (12)$$

12 Основы механических передач

Механической передачей можно назвать приспособление для передачи движения от одного тела к другому.

Удобнее всего передавать вращения. Поэтому общим элементом для многих механизмов является *блок* — твердый диск, способный вращаться вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно его плоскости (рис. 21).



Рис. 21.
Блок

Вот основные виды механических передач.

1. **Ременная передача.** Можно считать, что движение передается от одного блока к другому посредством невесомой нерастяжимой *нити* (рис. 22).

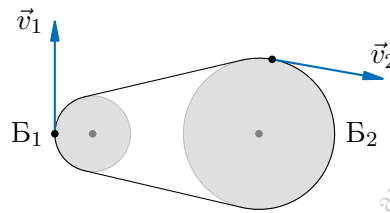


Рис. 22. Ременная передача

При отсутствии скольжения нити относительно блоков B_1 и B_2 соответствующие скорости их крайних точек v_1 и v_2 одинаковы: $v_1 = v_2$.

2. **Зубчатая передача.** Движение передается от одного блока к другому при помощи зацепления крайних точек (рис. 23).

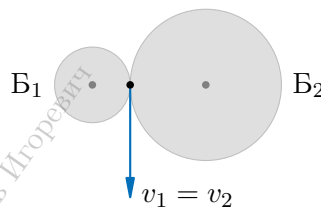


Рис. 23. Зубчатая передача

Отсутствие проскальзывания между блоками B_1 и B_2 для соответствующих скоростей их крайних точек дает: $v_1 = v_2$.

3. **Двойной блок.** Движение передается от одного блока к другому из-за того, что блоки жестко скреплены и насажены на общую ось (рис. 24).

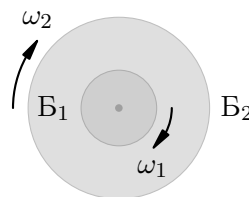


Рис. 24. Двойной блок

Блоки B_1 и B_2 образуют *твердое тело*, поэтому справедливо равенство их угловых скоростей ω_1 и ω_2 соответственно: $\omega_1 = \omega_2$.

Глава 2

Динамика

13 Система отсчета. Действие

Прежде всего стоит вспомнить, что *системой отсчета* (СО), попросту говоря, называется тело, к которому прикреплен *наблюдатель*. Так, на рис. 25 показаны наблюдатели, связанные с разными СО; рядом с ними происходит падение тяжелого шара (положение шара фиксируют каждую секунду).

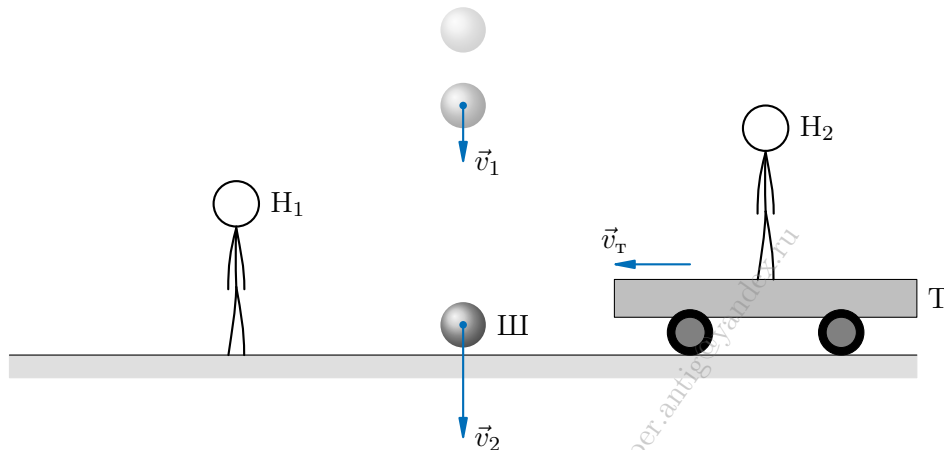


Рис. 25. Наблюдатели и падающий шар

Наблюдатель H_1 стоит на поверхности планеты, а наблюдатель H_2 стоит на тележке Т, движущейся с постоянной скоростью $\vec{v}_T$ относительно этой планеты. Тогда можно считать, что имеются две СО: СО «планета» и СО «тележка»¹.

Действие — это влияние одного тела, приводящее к *изменению скорости* другого тела. Можно согласиться, что шар Ш на рис. 25 главным образом подвергается влиянию планеты, поэтому его скорость и меняется.

Те же наблюдатели рассматривают уже приземлившийся шар (рис. 26).

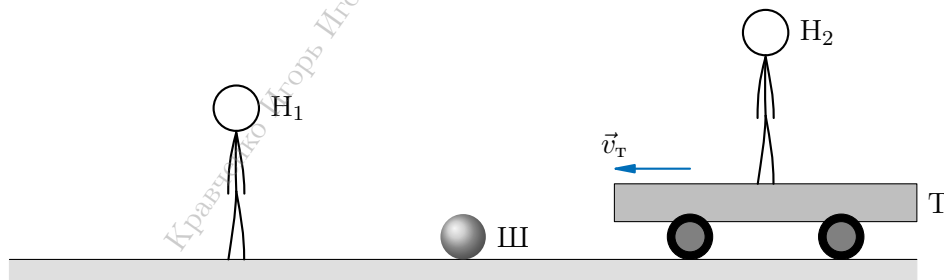


Рис. 26. Наблюдатели и неподвижный шар

На рис. 26 наблюдатель H_1 фиксирует постоянную (равную нулю) скорость шара Ш, а наблюдатель H_2 — постоянную ненулевую. Скорость шара неизменна, хотя и тут *воздействие планеты* на шар нельзя отрицать. Ясно, что имеется еще некоторое действие на шар со стороны *поверхности*.

Итак, тело может также одновременно испытывать влияния со стороны сразу нескольких других тел. Если же при наличии нескольких действий на тело оно *покоится* или движется *равномерно прямолинейно*, то в этом случае говорят, что эти **действия скомпенсированы**.

¹Это «правильные» СО. Дальнейшие рассуждения справедливы для таких СО.

14 Первый закон Ньютона

Первый закон Ньютона. Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело движется равномерно прямолинейно или покоится, если действия других тел скомпенсированы или отсутствуют.

На рис. 27 показаны наблюдатели и шар, лежащий на поверхности планеты.

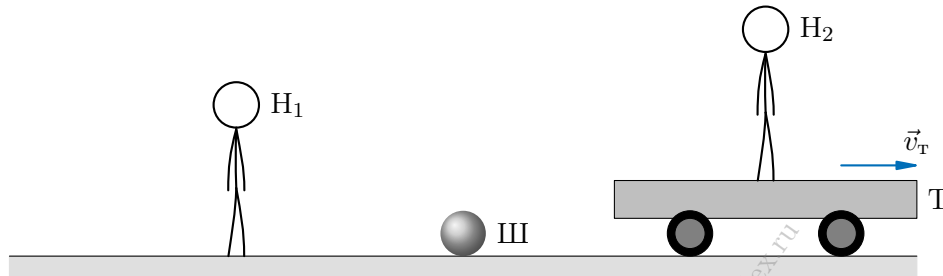


Рис. 27. Наблюдатели и неподвижный шар

Наблюдатель H_1 на рис. 27 стоит на поверхности планеты; наблюдатель H_2 — на тележке T , движущейся с постоянной скоростью $\vec{v}_T$ относительно планеты.

Для наблюдателя H_1 в системе отсчета (СО) «планета» на рис. 27 шар Ш покоится, а для наблюдателя H_2 в СО «тележка» — движется равномерно прямолинейно. Ускорение шара в обеих СО равно нулю, и действия на шар скомпенсированы: планета притягивает вниз, поверхность отталкивает вверх. Таким образом, в обеих упомянутых СО первый закон Ньютона подтверждается; эти СО можно назвать «правильными»².

В физике выделяют два вида СО.

- В **инерциальной** СО первый закон Ньютона *подтверждается*.

Пример. Планета и любая СО, двигающаяся без ускорения относительно инерциальной СО (ИСО), являются ИСО. Так, на рис. 27 наблюдатели располагаются в ИСО.

- В **неинерциальной** СО первый закон Ньютона *не подтверждается*.

Пример. СО, двигающаяся с ускорением относительно ИСО. Например, если бы тележка на рис. 27 двигалась с ускорением $\vec{a} \neq 0$, то СО «тележка» считалась бы неинерциальной (НСО).

Инерция — это свойство тела сохранять скорость неизменной при скомпенсированных действиях или отсутствии действий со стороны других тел. Если бы в опыте на рис. 27 шар лежал на движущейся тележке, то при резком торможении тележки он бы в СО «планета» продолжил двигаться со скоростью $\vec{v}_T$, как говорят, *по инерции*.

Принцип относительности Галилея. Всякое движение при одних и тех же начальных условиях происходит одинаково в любой ИСО.

Иллюстрацией указанного принципа является следующий опыт. Если бы в ситуации, изображенной на рис. 27, наблюдатели рассматривали свободное падение шара из собственных рук, то при одинаковых «подбрасываниях» движения шара в их СО были бы неотличимы друг от друга.

²Такие СО называют *инерциальными*.

15 Инертность и масса

Инертность — это свойство тела оказывать сопротивление при попытках изменить его скорость. Например, среди сплошных шаров из одного материала,двигающихся с одинаковой скоростью, сложнее всего остановить самый крупный шар (рис. 28).

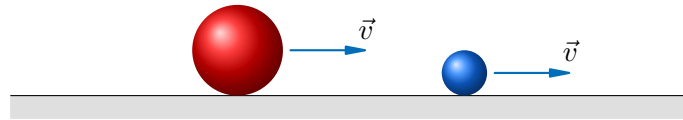


Рис. 28. Инертность красного шара больше инертности синего

Масса (m [кг]):

- 1) характеристика тела, показывающая количество вещества в теле;
- 2) характеристика тела, показывающая, как велика инертность тела.

Согласно обоим определениям массы можно заключить, что на рис. 28 масса красного шара больше, чем синего.

Плотность (ρ [$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$]) — это характеристика вещества однородного тела, показывающая массу в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (13)$$

Пусть два сплошных однородных шара, прикрепленные к легкому жесткому стержню, уравнивают друг друга (рис. 29).

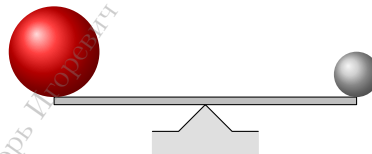


Рис. 29. Уравновешенные шары

Из рис. 29 ясно, что массы шаров одинаковы (они как бы на весах). Видно также, что объем красного шара больше, чем серого. Можно сказать, что одна и та же масса в сером шаре сосредоточена «плотнее», чем в красном — плотность серого шара больше, чем красного. (Плотности различных веществ приводятся в справочных таблицах.)

Теперь следует рассмотреть простую задачу.

Задача. Во сколько раз железный шарик тяжелее шарика такого же размера из алюминия?

Решение. Названия веществ указаны, тогда считаются известными следующие табличные величины³: $\rho_{\text{ж}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{а}} = 2700 \text{ кг/м}^3$. Одинаковость размеров означает равенство объемов: $V_{\text{ж}} = V_{\text{а}}$. Тогда с учетом формулы (13)

$$\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{а}}} = \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}}{\rho_{\text{а}} V_{\text{а}}} = \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{а}}} = \frac{7800}{2700} \approx 2,9.$$

³Данные в таблицах из разных источников могут отличаться.

16 Взаимодействие и сила

Взаимодействие — это взаимное действие двух тел друг на друга, приводящее к *изменению их скоростей* (рис. 30).

Из рис. 30 видно, что рука наблюдателя Н действует на шар Ш, иначе шар бы падал. С другой стороны, шар действует на руку, так как мышцы руки напряжены. Итак, в паре тел «рука-шар» происходит взаимодействие. (Однако изменения скоростей не наблюдаются из-за того, что каждое действие на данное тело компенсируется другим действием: действие руки на шар уравнивается действием планеты, а действие шара на руку — действием мышц.)

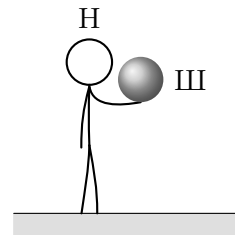


Рис. 30.
Наблюдатель
и шар

Известны четыре типа взаимодействия в природе.

1. **Гравитационное:** массивные тела взаимно притягивают друг друга.

Пример: планета и ее спутник.

2. **Электромагнитное:** влияния между зарядами и/или магнитами.

Пример: два магнита.

3. **Сильное:** влияния, «удерживающие» части атомного ядра.

Пример: протон и нейтрон.

4. **Слабое:** влияния между любыми⁴ элементарными частицами.

Пример: нейтрон и электрон.

Сила ($\vec{F}$ [Н]) — это характеристика действия, показывающая, как велико воздействие на тело.

На рис. 31 показан легкий шар в состоянии падения.

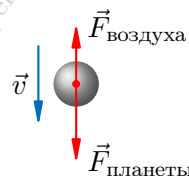


Рис. 31. Падение легкого шара

Силы, действующие на шар со стороны воздуха и планеты, обозначены красными векторами $\vec{F}_{\text{воздуха}}$ и $\vec{F}_{\text{планеты}}$ соответственно.

Принцип суперпозиции сил. Если на тело действуют силы $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots$, то их можно заменить одной силой

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots \quad (14)$$

Силу $\vec{R}$ называют **резльтирующей** силой или *равнодействующей* сил. Так, для шара на рис. 31 результирующая сила равна: $\vec{R}_{\text{ш}} = \vec{F}_{\text{воздуха}} + \vec{F}_{\text{планеты}}$. Из рис. 31 также можно видеть, что $F_{\text{воздуха}} < F_{\text{планеты}}$, значит — эта «суммарная» сила $\vec{R}_{\text{ш}}$ направлена вниз.

⁴Кроме фотонов.

17 Второй и третий законы Ньютона

Если результирующая сила, действующая на тело, *не равна нулю*, то в ИСО⁵ тело движется с ускорением. На рис. 32 показан опыт с толканием тележки.

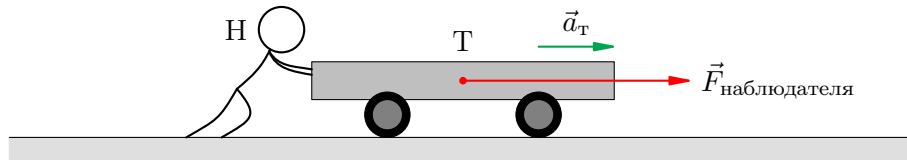


Рис. 32. Наблюдатель толкает тележку

Наблюдатель Н действует на тележку Т вправо силой $\vec{F}_{\text{наблюдателя}}$. Кроме того тележка притягивается к планете вниз силой $\vec{F}_{\text{планеты}}$ и отталкивается от поверхности вверх силой $\vec{F}_{\text{поверхности}}$; при этом $\vec{F}_{\text{планеты}} + \vec{F}_{\text{поверхности}} = 0$.

В этом случае⁶ на тележку действует результирующая сила, равная $\vec{R}_T = \vec{F}_{\text{планеты}} + \vec{F}_{\text{поверхности}} + \vec{F}_{\text{наблюдателя}} = \vec{F}_{\text{наблюдателя}} \neq 0$, и тележка приобретает ускорение $\vec{a}_T$. Также наблюдатель заметил, что чем больше результирующая сила $\vec{R}_T$ — тем больше ускорение $\vec{a}_T$, причем $\vec{R}_T$ и $\vec{a}_T$ сонаправлены.

Связь *результатирующей силы* с ускорением дает второй закон Ньютона.

Второй закон Ньютона. Результирующая сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на его ускорение:

$$\vec{R} = m\vec{a}. \quad (15)$$

С другой стороны, наблюдатель ощущает действие на себя со стороны тележки, которая как бы «мешает» ему двигаться вправо (рис. 33).

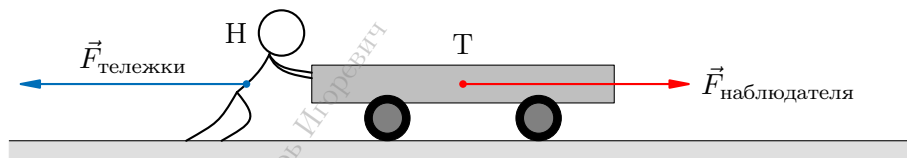


Рис. 33. Взаимодействие наблюдателя и тележки

Действительно, и тележка в рассматриваемом опыте действует на наблюдателя (сила $\vec{F}_{\text{тележки}}$) — ведь если резко «убрать» тележку, то наблюдатель устремится туда, куда происходит толкание, то есть вправо. (Вообще любые силы носят *взаимный* характер: если тело А действует на тело Б, то и тело Б действует на тело А.)

Третий закон Ньютона. Два тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению (при этом обе силы лежат на одной прямой):

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}, \quad (16)$$

где $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ — сила, действующая на второе тело со стороны первого; $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ — сила, действующая на первое тело со стороны второго.

Так, согласно третьему закону Ньютона: $F_{\text{наблюдателя}} = F_{\text{тележки}}$ (рис. 33).

⁵Инерциальная система отсчета.

⁶Под колесами гладкая поверхность.

18 Силы тяготения и реакции

Закон всемирного тяготения. Два тела массами m_1 и m_2 , расположенные на расстоянии r , притягиваются друг к другу с **силой тяготения**

$$F_T = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (17)$$

где G — *гравитационная постоянная* (см. справочные таблицы).

На рис. 34 условно изображены планета и космический корабль.

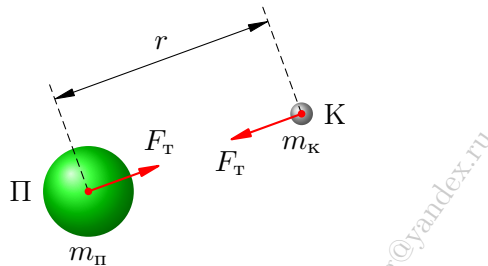


Рис. 34. Притяжение планеты и космического корабля

Планета П массой $m_П$ и корабль К массой $m_К$ расположены на некотором расстоянии r друг от друга⁷. Как и любые два тела, обладающих массой, планета и корабль *взаимодействуют* друг с другом так, что планета притягивает корабль с силой F_T , а корабль — планету с такой же силой F_T .

При свободном падении у поверхности планеты все тела движутся с одинаковым ускорением g . Тогда по второму закону Ньютона сила, действующая на тело массы m со стороны планеты и называемая **силой тяжести**, равна:

$$F_T = mg. \quad (18)$$

Вообще, сила тяжести и сила тяготения — это взаимозаменяемые термины, обозначающие одну и ту же силу *гравитационного взаимодействия*. Так, силу тяжести, действующую на тело, можно называть и силой тяготения: численное значение этой силы гравитационного притяжения от этого не поменяется⁸.

Пусть теперь массивный шар покоится на поверхности планеты — то есть, как говорят, на опоре (рис. 35).

Вес ($\vec{P}$ [Н]) — это сила, действующая на опору или подвес со стороны тела (синий вектор на рис. 35). *Вес приложен к опоре (подвесу), а не к телу.*

Сила реакции ($\vec{N}$ [Н]) — это сила, приложенная к телу со стороны опоры или подвеса (красный вектор на рис. 35).

В рассматриваемой паре тел (шар и опора) силы P и N связаны третьим законом Ньютона:

$$P = N. \quad (19)$$

Следует отметить, что сила реакции и вес служат проявлением *электромагнитного взаимодействия* тел.

⁷Для однородных шарообразных тел расстояние r есть расстояние между их центрами.

⁸Приравняв правые части формул (17) и (18), можно получить формулу для ускорения свободного падения: $g = G \frac{m_{\text{планеты}}}{r^2}$.

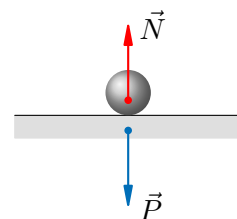


Рис. 35. Шар на опоре

19 Сила упругости

Деформация — это изменение формы или размеров тела. На рис. 36 изображены деформированные резиновый шар и пластилиновый брусок.

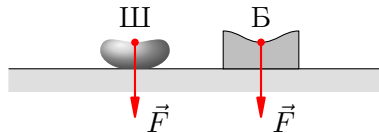


Рис. 36. Деформированные тела

Резиновый шар Ш и пластилиновый брусок Б испытывают деформации под действием некоторой внешней силы $\vec{F}$, приложенной к телам сверху.

Теперь внешние силы, деформирующие тела, сняли (рис. 37).

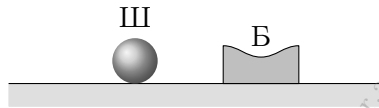


Рис. 37. Тела после снятия деформирующих сил

Как видно из рис. 37, деформации тел можно разделить на два вида.

- **Упругая** деформация исчезает после снятия деформирующего действия.
- **Неупругая** деформация сохраняется (возможно, частично) после снятия деформирующей нагрузки.

Таким образом, в рассмотренном примере в шаре возникали упругие деформации, а в бруске — неупругие.

Сила упругости ($\vec{F}_{\text{упр}}$ [Н]) — это сила, с которой упруго деформированное тело действует на соприкасающееся с ним тело, вызывающее деформацию.

Пусть на пружину положили массивный шар (рис. 38). Под действием веса шара пружина деформируется (верхняя часть пружины смещается вниз), и возникает направленная вверх сила $\vec{F}_{\text{упр}}$, удерживающая шар (остальные силы не показаны).

Сила упругости:

- направлена в сторону, *противоположную смещению частей* тела в процессе деформации;
- действует также *между соседними слоями* деформированного тела и приложена к каждому слою.

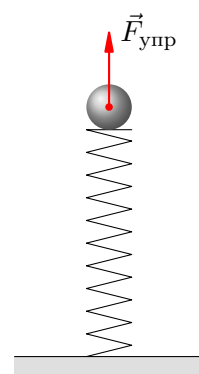


Рис. 38. Шар на пружине

Закон Гука. Сила упругости прямо пропорциональна величине деформации. Так, пружина, сжатая или растянутая на величину x , действует с силой

$$F_{\text{упр}} = kx, \quad (20)$$

где k — жёсткость пружины.

Стоит отметить, что сила реакции и вес представляют собой силы упругости, которые служат проявлением *электромагнитного взаимодействия* тел.

20 Сила трения

Трение — это взаимодействие соприкасающихся тел, препятствующее их относительному движению.

Возникновение трения можно объяснить следующим образом. Соприкасающиеся поверхности тел являются шероховатыми, они усеяны микроскопическими, незаметными глазу бугорками⁹ разных форм и размеров. Эти бугорки зацепляются друг за друга и мешают телам двигаться друг относительно друга.

Пусть тело покоится на шероховатой *наклонной плоскости* (рис. 39).

Во-первых, тело притягивается вниз к планете силой тяжести $\vec{F}_T$; во-вторых, на тело со стороны опоры действует сила $\vec{N}$, перпендикулярная плоскости (независимо от того, шероховатая поверхность или гладкая). Из рис. 39 видно, что в данном случае сумма сил $\vec{F}_T + \vec{N}$ не может быть равна нулю; и под воздействием только этих сил тело получило бы возможность соскальзывать вниз по наклонной плоскости. Однако шероховатость опоры обуславливает еще одну силу — **силу трения** $\vec{F}_{тр}$, направленную против возможного движения тела (тело «пытается» начать скользить, но трение удерживает его на месте). Сила трения всегда направлена вдоль поверхностей соприкасающихся тел и служит проявлением *электромагнитного взаимодействия* тел.

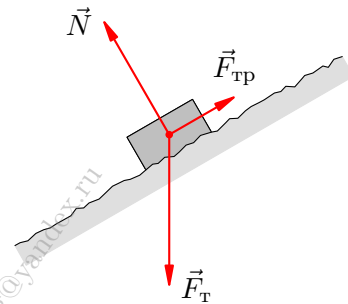


Рис. 39. Тело на наклонной плоскости

Трение между телами, происходящее без жидкой или газообразной прослойки между ними, называется **сухим трением**. Принято выделять три основных вида сил такого трения¹⁰.

1. **Сила трения покоя** препятствует возникновению относительного движения тел:

$$F_{тр.п} \leq \mu N, \quad (21)$$

где μ — *коэффициент трения*, характеризующий шероховатость тел.

Пример: тело покоится на шероховатой наклонной плоскости.

2. **Сила трения скольжения** препятствует проскальзыванию поверхностей тел:

$$F_{тр.с} = \mu N. \quad (22)$$

Пример: тело скользит по шероховатой поверхности.

3. **Сила трения качения** препятствует перекачиванию одного тела по другому.

Пример: тело катится по нетвердой опоре.

Можно условно считать, что между телом, движущимся в жидкости или газе, и средой, окружающей тело, также происходит трение, которое называют *сопротивлением среды*. Соответственно, против скорости тела направлена и *сила сопротивления среды*, действующая на это тело.

⁹Для наглядности на рисунке далее бугорки сильно преувеличены.

¹⁰Эти силы, будучи приложенными к телу со стороны шероховатой поверхности, направлены против движения (или возможного движения) тела относительно этой поверхности.

21 Давление

В ряде случаев существенно то, что силы, действующие на тела, распределены по некоторой части поверхности этих тел. На рис. 40 изображены два одинаковых бруска, покоящихся на горизонтальной поверхности.

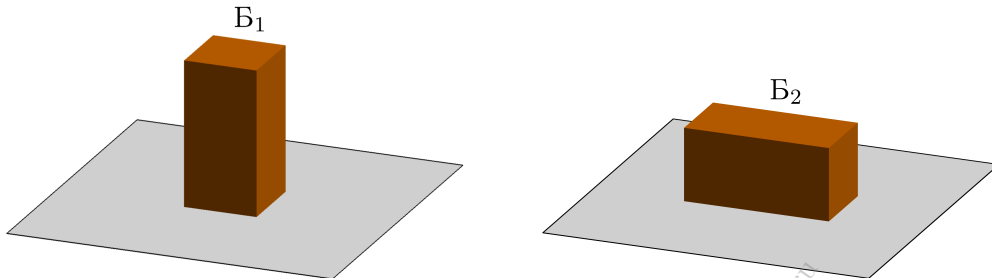


Рис. 40. Бруски на поверхности

Бруски B_1 и B_2 соприкасаются с опорой поверхностями площадями S_1 и S_2 соответственно ($S_2 > S_1$). При этом, так как массы брусков одинаковы, возникают одинаковые приложенные к опоре силы (вес), обозначаемые $\vec{F}$ для общего случая (рис. 41).

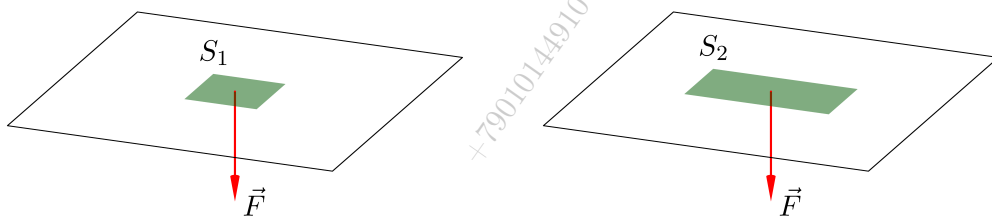


Рис. 41. Силы и соответствующие площади

Если поверхности опор достаточно мягкие, то на практике тела оставляют довольно заметные вмятины под собой. При тонких измерения «погружения» в опору брусков на рис. 40 оказывается, что глубина, на которую «вошел» брусок B_1 , больше соответствующей глубины для бруска B_2 (несмотря на то, что силы, приложенные к опоре со стороны каждого из брусков, одинаковы, что проиллюстрировано на рис. 41!).

Давление (P_d [Па])¹¹ — это характеристика «продавливающего» действия силы:

$$P_d = \frac{F_{\perp}}{S}, \quad (23)$$

где $F_{\perp}$ — перпендикулярная составляющая силы, действующей на поверхность площади S .

Также можно сказать, что давление — это *поверхностная плотность силы*, то есть эта величина показывает, какая сила приходится на единицу площади.

Возвращаясь теперь к рис. 41, можно видеть, что согласно формуле (23) давления P_1 и P_2 , создаваемые брусками B_1 и B_2 соответственно, связаны следующим соотношением: $P_1 > P_2$.

¹¹Подпись «д» необязательна и введена для того, чтобы не путать с весом, обозначаемым $\vec{P}$.

Глава 3

Статика

22 Момент силы

Твердое тело — это тело, размеры и форма которого не изменяются при любых воздействиях на тело. (Далее предполагается, что речь идет о твердых телах, размерами которых пренебречь нельзя.)

Вращение — это движение тела, при котором все точки этого тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной неподвижной прямой, называемой *осью вращения*. Так, если толкают дверь, то происходит ее вращение.

Пусть имеются два одинаковых массивных колеса от тележки (шины сняли), оси которых закреплены горизонтально и неподвижны; колеса приводят во вращение одинаковые силы, приложенные в разных точках этих колес (рис. 42).

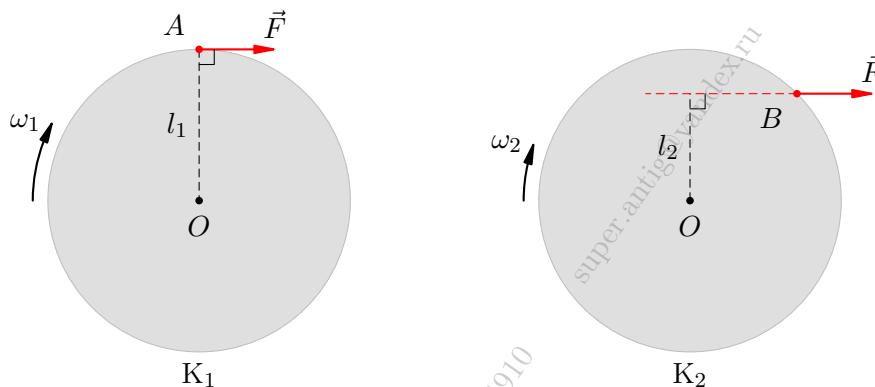


Рис. 42. Колеса приводятся во вращение

Если длительность действия сил $\vec{F}$ в точках A и B достаточно мала, то колеса K_1 и K_2 поворачиваются на незначительный угол вокруг осей вращения, проходящих через точку O . В таком случае оказывается, что угловые скорости, приобретаемые этими колесами и обозначаемые соответственно ω_1 и ω_2 , различны: $\omega_1 > \omega_2$. То есть колесо K_1 раскручивается быстрее, чем колесо K_2 (хотя величины сил и расстояния от осей вращения до точек приложения силы в обоих случаях одинаковы, как видно из рис. 42!).

Следующие понятия помогают лучше разобраться с вводимой далее величиной, характеризующей раскручивающее действие силы.

- *Линия действия* силы — это прямая линия, проходящая через точку приложения силы и направленная вдоль этой силы. Часть такой линии изображена красной штриховой линией на рис. 42 (справа).
- *Плечо силы* — это длина общего перпендикуляра, проведенного от оси вращения к линии действия силы. Плечи сил, раскручивающих колеса, изображены черными штриховыми линиями и обозначены l_1 и l_2 на рис. 42.

Момент силы (M [Н·м]) — это характеристика раскручивающего действия силы:

$$M = Fl, \quad (24)$$

где l — плечо силы.

Так, с учетом формулы (24) моменты M_1 и M_2 сил, приложенных к колесам K_1 и K_2 соответственно, связаны следующим соотношением: $M_1 > M_2$.

23 Равновесие твердого тела

Равновесие — это состояние тела¹, при котором каждая его точка остается неподвижной в некоторой инерциальной системе отсчета. На рис. 43 изображена в равновесии горизонтальная длинная легкая доска, к которой приложены силы со стороны бруска, шара и опоры.

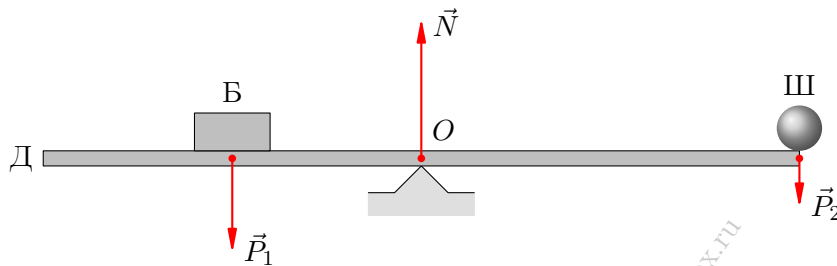


Рис. 43. Равновесие доски

Доска Д гладкая и не закреплена ни в какой точке, но установлена так, что не совершает ни поступательное, ни вращательное движение. Покоящиеся на доске брусок Б и шар Ш действуют на доску силами $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_2$ соответственно (масса бруска больше массы шара). Со стороны опоры в точке О к доске приложена сила $\vec{N}$ (перпендикулярная одной из соприкасающихся поверхностей).

Вот **условия равновесия тела** под действием приложенных к нему сил.

1. Сумма всех составляющих («частей») сил, взятых со знаком плюс или минус, вдоль любой оси равна нулю²:

$$\pm F_1 \pm F_2 \pm \dots = 0. \quad (25)$$

Знак «+» приписывают составляющей, если она сонаправлена с выбранной осью; знак «−» приписывают составляющей в противном случае.

2. Сумма всех моментов сил, взятых со знаком плюс или минус, относительно выбранной оси вращения равна нулю:

$$\pm M_1 \pm M_2 \pm \dots = 0. \quad (26)$$

Знак «+» приписывают моменту, если его сила стремится повернуть тело, например, по часовой стрелке; в противном случае моменту приписывают знак «−». (Можно выбирать свое положительное направление вращения.)

Для удобства соотношение (25) можно называть *уравнением сил*, а соотношение (26) — *уравнением моментов*.

Условия равновесия в примере с доской на рис. 43 работают следующим образом. Так как горизонтальных сил нет, уравнение сил записывается только для вертикального направления (ось направлена, например, вверх): $N - P_1 - P_2 = 0$. Уравнение моментов относительно оси, проходящей, например, через точку О, выглядит так: $M_{P_2} - M_{P_1} = 0$ (момент силы N равен нулю).

¹Далее все тела считаются твердыми — то есть недеформируемыми.

²Предполагается, что силы раскладывают по взаимно перпендикулярным направлениям.

24 Центр масс

В отличие от материальной точки, одно лишь равенство нулю векторной суммы всех сил, приложенных к твердому телу, не является единственным необходимым условием равновесия тела. Этот факт иллюстрируется примером, в котором длинный жесткий стержень лежит на горизонтальной гладкой поверхности и находится под действием нескольких сил (рис. 44, вид сверху).

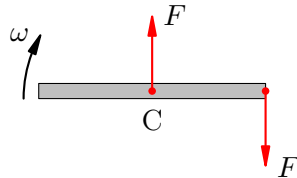


Рис. 44. Стержень не остается в покое

К стержню С приложены две равные по величине противоположно направленные силы F , лежащие в плоскости рисунка, причем линии действия сил не совпадают (*пара сил*). Силы тяжести и реакций опоры компенсируют друг друга (на рисунке не показаны).

Опыт показывает, что под действием указанных сил стержень на рис. 44 покоиться не будет — он начнет вращаться, хотя равнодействующая всех сил равна нулю. За достаточно малый промежуток времени, повернувшись на незначительный угол, тело приобретает угловую скорость ω . Однако одна точка остается неподвижной в данном случае (как будто только для этой точки результирующая сила равна нулю); именно вокруг нее и происходит вращение. Эта точка называется центром масс.

Центр масс — это точка, характеризующая распределение масс в теле. (Ведь твердое тело можно рассматривать как систему материальных точек, расстояния между которыми не меняются со временем.)

Пусть тело состоит из материальных точек массами $m_1, m_2, \dots$, имеющих координаты $x_1, x_2, \dots$ (по другим осям аналогично). Координаты центра масс тогда определяются по формулам:

$$x_{\text{цм}} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}, \quad (27)$$

аналогично для координат $y_{\text{цм}}$ и $z_{\text{цм}}$.

У тела простой формы центр масс совпадает с центром симметрии. Так, считая стержень на рис. 44 тонким и однородным, можно утверждать, что центр масс стержня находится в его середине (тело на рис. 44 вращается как раз вокруг этой точки).

Теорема о движении центра масс. Центр масс тела движется так же, как двигалась бы точка с массой, равной массе тела, под действием внешних сил, приложенных к телу³.

В однородном поле тяжести ($\vec{g} = \text{const}$) центр масс тела совпадает с его **центром тяжести** — то есть точкой, к которой приложена результирующая сил тяжести, действующих на каждый элемент тела.

³Внешние силы — это силы, действующие на части тела со стороны других объектов, с которыми взаимодействует это тело.

25 Закон Паскаля

Твердые тела передают производимое на них давление только в направлении действия силы. Жидкости и газы (их называют средами) ведут себя иначе; в них справедлив закон Паскаля.

Закон Паскаля. Давление, оказываемое на жидкость или газ, передается в любую точку этой среды без изменения по всем направлениям.

Хорошей иллюстрацией этого закона служит опыт с прибором, называемым шаром Паскаля (рис. 45, слева).

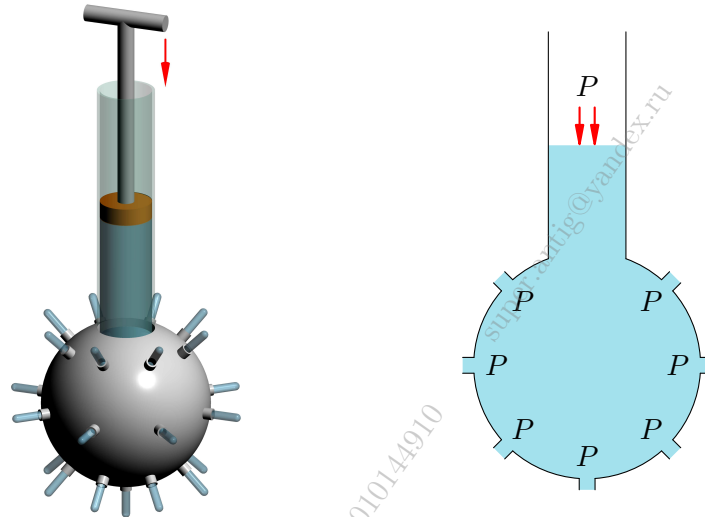


Рис. 45. Шар Паскаля

Этот прибор состоит из полого шара с отверстиями, сообщенного с цилиндрическим сосудом, в котором может перемещаться поршень с рукояткой. Если в условиях невесомости⁴ наполнить прибор водой и надавить на поршень, то жидкость будет выходить из всех отверстий одинаковыми струями.

На рис. 45 (справа) показано распределение давлений в жидкости у отверстий шара Паскаля при надавливании на жидкость сверху: внешнее давление P как бы «добавляется» в каждой точке среды. Так, давление атмосферы — огромного слоя воздуха — передается во все точки на любую глубину, например, открытого водоема (нормальное атмосферное давление приблизительно равно 10^5 Па).

Задача. В закрытом сосуде в воде плавает пузырек так, как показано справа на рис. 46. Пузырек заполнен водой и воздухом. Будет ли увеличиваться масса воды в пузырьке, если увеличить давление воздуха P_v в сосуде? Почему?

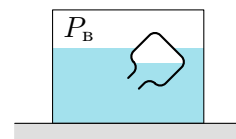


Рис. 46.
К задаче

Решение. Масса воды в пузырьке может меняться за счет изменения объема воздуха в нем. Давление P_v приходится сверху на сухую поверхность пузырька. Это же давление передается во все точки жидкости по закону Паскаля. Таким образом, воздух в пузырьке «обжат» со всех сторон давлением P_v , увеличение которого приведет к сжатию этого воздуха и увеличению количества воды в пузырьке.

⁴Закон Паскаля, однако, выполняется в любых условиях.

26 Гидравлический пресс

Гидравлический пресс — это устройство, состоящее из двух сосудов, закрытых поршнями и соединенных трубкой. В сосудах между поршнями находится жидкость (рис. 47).

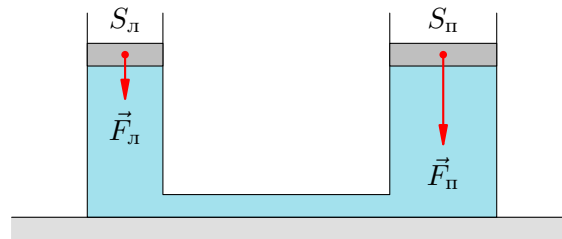


Рис. 47. Гидравлический пресс

Пусть гидравлический пресс установлен на горизонтальной опоре, а высоты столбов жидкости в сосудах одинаковы. Если, например, к левому поршню площадью $S_л$ приложена некоторая сила $\vec{F}_л$, направленная вниз, то под ним в жидкости возникнет давление $P_л$. Это давление будет передано согласно закону Паскаля в любую точку жидкости, в том числе — под правый поршень (давление $P_п$). Для равновесия всей системы необходимо, чтобы и на правый поршень площадью $S_п$ действовала некоторая сила $\vec{F}_п$, направленная так же вниз. Вот связь давлений в гидравлическом прессе:

$$P_л = P_п, \quad (28)$$

где $P_л$ и $P_п$ — давления под левым и правым поршнем соответственно.

Так, в примере на рис. 47, если считать площади поршней неодинаковыми ($S_п > S_л$), с учетом определения давления и формулы (28) силы $F_л$ и $F_п$ связаны следующим соотношением: $F_п > F_л$.

Формулу (28) используют при решении многих обычных задач этой темы.

Задача. Два сообщающихся сосуда с различными поперечными сечениями (рис. 48) наполнены водой. Площадь поперечного сечения у узкого сосуда в 100 раз меньше, чем у широкого. На поршень A поставили гирию весом 10 Н. Какой груз надо положить на поршень B , чтобы оба груза находились в равновесии? (Весом поршней и трением пренебречь.)

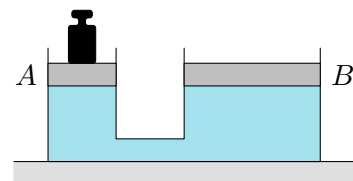


Рис. 48. К задаче

Решение. Удобно (на первых порах — обязательно) начать с «уравнения гидравлического пресса» (28): в данном случае $P_A = P_B$. Далее можно опираться на

это уравнение: с учетом определения давления $\frac{F_A}{S_A} = \frac{F_B}{S_B}$. Ясно, что в последнем

равенстве известна сила $F_A = 10$ Н, известно и соотношение площадей $\frac{S_B}{S_A} = 100$

(поршень A узкий). Значит из этого уравнения можно выражать и вычислять силу F_B , требуемую для покоя жидкости: $F_B = \frac{S_B}{S_A} \cdot F_A = 100 \cdot 10 = 1000$ Н.

Теперь осталось вычислить массу на поршне B (интуитивно понимая, что сила обусловлена тяжестью груза): $m_B = \frac{F_B}{g} = \frac{1000}{10} = 100$ кг.

27 Давление в жидкости

Действие силы тяжести на жидкость приводит к тому, что внутри этой среды создается так называемое *гидростатическое давление*⁵. Это давление действует на любое тело или его часть, находящиеся внутри данной среды.

Пусть имеется ряд сосудов разной формы, в которые налита жидкость. Сосуды одинаково приподняты над горизонтальной опорой (рис. 49).

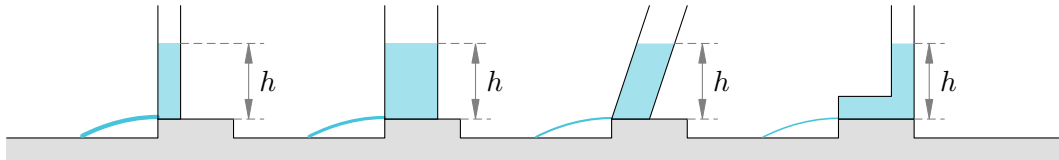


Рис. 49. Сосуды с жидкостью

Каждый сосуд на рис. 49 заполнен разным количеством жидкости плотностью ρ_c (плотность среды) до высоты h . В вертикальной стенке у дна в этих сосудах проделаны достаточно малые отверстия разного диаметра. Жидкости вытекают из сосудов тонкими струями.

Оказывается, что в ситуации, показанной на рис. 49, дальности полета всех струй равны между собой. В данном случае этот факт косвенно указывает на то, что давления в жидкости у отверстий во всех сосудах одинаковы. Опыт показывает, что гидростатическое давление прямо пропорционально плотности среды ρ_c , ускорению свободного падения g и глубине h .

Давление в жидкости, находящейся в покое, рассчитывают по формуле:

$$P_{\text{ж}} = \rho_c g h + P_{\text{атм}}, \quad (29)$$

где $\rho_c g h$ — гидростатическое давление, $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление.

К примеру, если заткнуть отверстия в сосудах на рис. 49, то давления в любых точках жидкости в сосудах можно вычислять по формуле (29).

Сообщающиеся сосуды — это сосуды, соединенные между собой в нижней части трубкой.

Пусть в открытые сообщающиеся сосуды, изображенные на рис. 50, налиты вода и бензин, обозначенные светло-голубым и бледно-желтым цветом соответственно.

Можно сказать, что вода и бензин плотностей ρ_v и ρ_b устанавливаются в виде двух изогнутых столбов Л и П, примыкающих друг к другу в точке О, относительно которой можно записать связь давлений в сообщающихся сосудах:

$$P_{\text{л}} = P_{\text{п}}, \quad (30)$$

где $P_{\text{л}}$ и $P_{\text{п}}$ — давления со стороны левого Л и правого П столба.

Так, в примере на рис. 50 «формула сообщающихся сосудов» (30) дает: $\rho_v g h_{\text{вл}} + P_{\text{атм}} = \rho_v g h_{\text{вл}} + \rho_b g h_{\text{бп}} + P_{\text{атм}}$; где $h_{\text{вл}}$ и $h_{\text{вл}}$ — «высоты» воды в левом и правом столбе, $h_{\text{бп}}$ — «высота» бензина в правом столбе (как видно, давление $P_{\text{атм}}$ можно исключать из этого равенства, если сообщающиеся сосуды открытые).

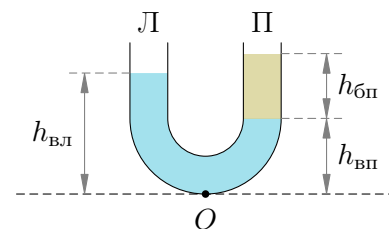


Рис. 50.

Сообщающиеся сосуды

⁵ Аналогично в газах создается аэростатическое давление.

28 Закон Архимеда

Некоторые тела, помещенные в жидкость⁶, не тонут. В таких случаях сила тяжести уравновешивается какой-то другой силой, действующей на тело со стороны жидкости. Эта сила называется *выталкивающей* или *архимедовой* силой и действует на любое тело, погруженное в жидкость или газ целиком или частично.

На рис. 53 изображен деревянный куб, покоящийся на поверхности воды; сила тяжести равна так называемой силе Архимеда: $F_T = F_A$.

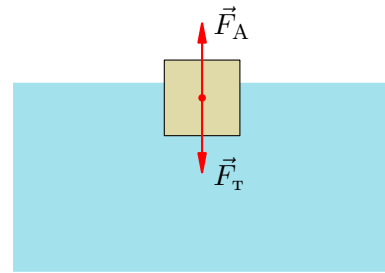


Рис. 51. Куб на плаву

Закон Архимеда. На погружённое (возможно, частично) в жидкость или газ тело действует выталкивающая сила, равная весу среды, объём которой вытеснило тело:

$$F_A = P_{\text{выт. с}}, \quad (31)$$

где $P_{\text{выт. с}}$ — вес вытесненной среды. (Силы связаны третьим законом Ньютона.)

Можно заметить, что вес вытесненной среды в рассматриваемых условиях есть $P_{\text{выт. с}} = \rho_c g V_{\text{выт.}}$; где ρ_c — плотность среды, $V_{\text{выт.}}$ — вытесненный объём. Тогда сила Архимеда равна:

$$F_A = \rho_c g V_{\text{выт.}} \quad (32)$$

Плавание — это состояние тела, при котором оно не тонет в жидкости (или газе), будучи погруженным в нее. На рис. 54 показаны три погруженных в воду шара одинакового размера, сделанных из разных материалов.

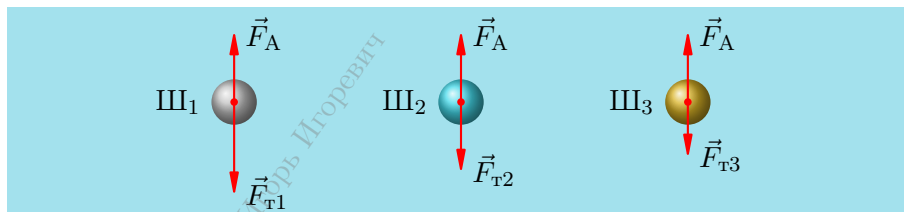


Рис. 52. Шары в воде

На примере с шарами Ш₁, Ш₂ и Ш₃ плотностей ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 соответственно, которые вначале покоятся в жидкости плотности ρ_c , можно проиллюстрировать три возможных движения тела после погружения в некоторую среду.

1. Шар Ш₁ сделан из бетона: $F_{T1} > F_A$ или $\rho_1 > \rho_c$. Этот шар тонет.
2. В шаре Ш₂ вода, обурнутая легкой тонкой пленкой: $F_{T2} = F_A$ или $\rho_2 = \rho_c$. Этот шар остается в покое.
3. Шар Ш₃ деревянный: $F_{T3} < F_A$ или $\rho_3 < \rho_c$. Этот шар всплывает. Он придет в равновесие у поверхности жидкости, частично погрузившись в нее.

Условие плавания тела можно записать в виде неравенства: $\rho \leq \rho_c$, где ρ — плотность тела.

⁶Далее считается, что среда (жидкость или газ) покоится у поверхности планеты.

29 Закон Архимеда

Некоторые тела, помещенные в жидкость⁷, не тонут. В таких случаях сила тяжести уравновешивается какой-то другой силой, действующей на тело со стороны жидкости. Эта сила называется *выталкивающей* или *архимедовой* силой и действует на любое тело, погруженное в жидкость или газ целиком или частично.

На рис. 53 изображен деревянный куб, покоящийся на поверхности воды; сила тяжести равна так называемой силе Архимеда: $F_T = F_A$.

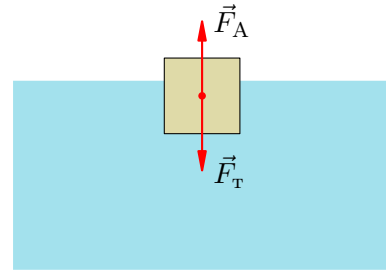


Рис. 53. Куб на плаву

Закон Архимеда. На погружённое (возможно, частично) в жидкость или газ тело действует выталкивающая сила, равная весу среды, объём которой вытеснило тело:

$$F_A = P_{\text{выт. с}}, \quad (33)$$

где $P_{\text{выт. с}}$ — вес вытесненной среды. (Силы связаны третьим законом Ньютона.)

Можно заметить, что вес вытесненной среды в рассматриваемых условиях есть $P_{\text{выт. с}} = \rho_c g V_{\text{выт.}}$; где ρ_c — плотность среды, $V_{\text{выт.}}$ — вытесненный объём. Тогда сила Архимеда равна:

$$F_A = \rho_c g V_{\text{выт.}} \quad (34)$$

Плавание — это состояние тела, при котором оно не тонет в жидкости (или газе), будучи погруженным в нее. На рис. 54 показаны три погруженных в воду шара одинакового размера, сделанных из разных материалов.

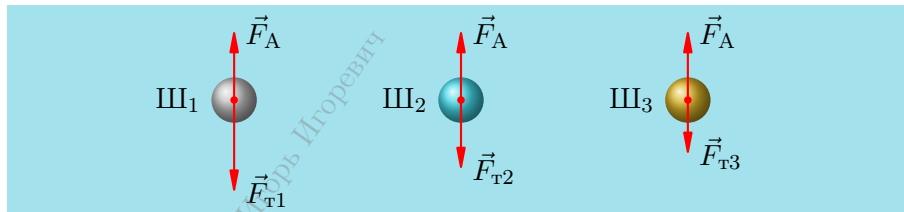


Рис. 54. Шары в воде

На примере с шарами Ш₁, Ш₂ и Ш₃ плотностей ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 соответственно, которые вначале покоятся в жидкости плотности ρ_c , можно проиллюстрировать три возможных движения тела после погружения в некоторую среду.

1. Шар Ш₁ сделан из бетона: $F_{T1} > F_A$ или $\rho_1 > \rho_c$. Этот шар тонет.
2. В шаре Ш₂ вода, обурнутая легкой тонкой пленкой: $F_{T2} = F_A$ или $\rho_2 = \rho_c$. Этот шар остается в покое.
3. Шар Ш₃ деревянный: $F_{T3} < F_A$ или $\rho_3 < \rho_c$. Этот шар всплывает. Он придет в равновесие у поверхности жидкости, частично погрузившись в нее.

Условие плавания тела можно записать в виде неравенства: $\rho \leq \rho_c$, где ρ — плотность тела.

⁷Далее считается, что среда (жидкость или газ) покоится у поверхности планеты.

Глава 4

Законы сохранения

30 Импульс

Импульс ($\vec{p} \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right]$) — это величина, характеризующая «толкающую» способность движущегося тела:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (35)$$

Рассматривая сразу несколько тел, можно говорить об импульсе *системы тел*:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots, \quad (36)$$

где $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots$ — импульсы первого, второго и так далее тел.

Пусть два крепких упругих шара быстро сталкиваются и разлетаются над поверхностью планеты так, как показано на рис. 55.

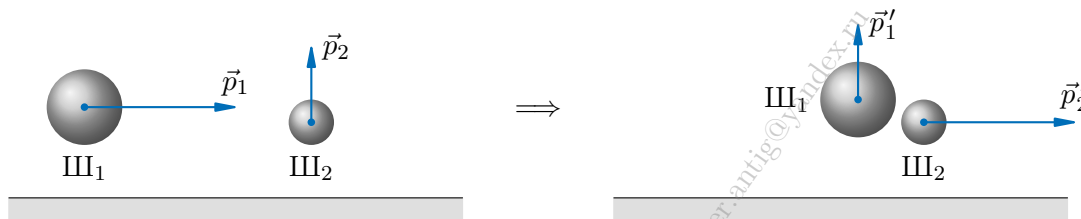


Рис. 55. Столкновение шаров

Система тел состоит из шаров Ш₁ и Ш₂. До столкновения (рис. 55, слева) импульс системы равен $\vec{p}_1 + \vec{p}_2$, после соударения (рис. 55, справа) импульс системы равен $\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$. В этом опыте выполняется следующий закон.

Закон сохранения импульса. Импульс системы тел остается постоянным при любых воздействиях на эту систему в двух случаях:

- 1) результирующая сил, действующих на систему, равна нулю;
- 2) импульс системы тел не меняется значительно за время воздействия¹.

$$\vec{p}_{\text{до}} = \vec{p}_{\text{после}}, \quad (37)$$

где $\vec{p}_{\text{до}}$ и $\vec{p}_{\text{после}}$ — импульсы системы тел до и после взаимодействия тел.

Удар шаров на рис. 55 быстрый, поэтому для них закон сохранения импульса с учетом формулы (36) дает уравнения с составляющими импульса по горизонтали и по вертикали соответственно: $p_1 = p'_1$, $p_2 = p'_2$.

В случаях 1 и 2, удовлетворяющих закону сохранения импульса, систему тел можно называть *замкнутой*.

Если система тел *не замкнута*, то использовать указанный закон можно только для составляющих импульсов той оси, вдоль которой выполняются условия 1 и 2. (Предполагается, что силы и импульсы раскладывают по одним и тем же взаимно перпендикулярным направлениям.)

Изменение импульса можно вычислить по следующей формуле:

$$\Delta \vec{p} = \vec{R} \cdot \Delta t, \quad (38)$$

где $\vec{R}$ — результирующая сила, приложенная к телу или системе ($\vec{R} = \text{const}$).

¹Это следует обычно из условия задачи. Время взаимодействия полагают достаточно малым, так чтобы *внешние силы* не успели изменить импульс системы. Однако некоторые силы (чаще всего это *силы реакции*) способны изменить импульс системы за сколь угодно малый промежуток времени: тогда пользоваться этой общей формулировкой закона нельзя.

31 КПД механизма

Механизмы применяют для совершения так называемого *полезного действия* — то есть процесса, ведущего к желаемому результату. Так, полезными действиями считают подъем строительной плиты или разгон автомобиля.

Реальные, например, простые механизмы имеют вес, а их соприкасающиеся части не являются гладкими. Из-за этого приходится затрачивать определенные усилия на подъем самих механизмов и преодоления трения в них. Об эффективности механизма принято говорить в терминах работы.

Пусть необходимо поднять груз (тело) на заданную высоту. Предлагается использовать для этого *шероховатую* наклонную плоскость (рис. 56, слева).

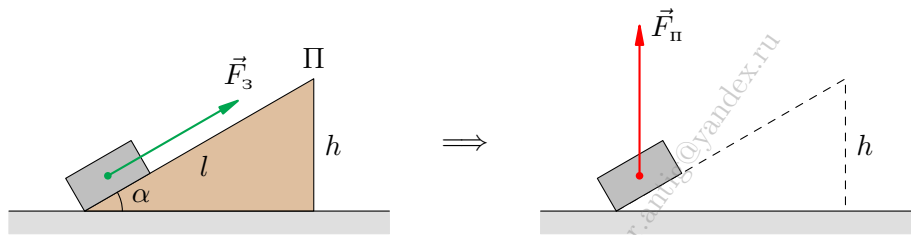


Рис. 56. Подъем груза с помощью наклонной плоскости и без нее

Для анализа механизма проводят два опыта: совершают полезное действие посредством механизма и без него². Так, в рассматриваемом примере сначала тело равномерно передвигают вдоль наклонной плоскости с углом α на расстояние l , и груз оказывается таким образом на высоте h (рис. 56, слева). Затем тело равномерно поднимают на высоту h без механизма (рис. 56, справа).

Удобно выделить две расчетные силы (зеленый и красный вектор на рис. 56). Сила F_3 — это *затраченная сила*, то есть та сила, которую необходимо приложить к механизму (к телу на механизме) для совершения полезного действия. Сила F_{Π} — это *полезная сила*, то есть та сила, которую необходимо приложить к телу без использования механизма для совершения полезного действия.

Соответственно можно различать работы указанных сил.

- **Затраченная работа** A_3 есть работа затраченной силы при совершении полезного действия.
- **Полезная работа** A_{Π} есть работа полезной силы при совершении полезного действия.

Коэффициент полезного действия (КПД) (η) — это характеристика эффективности устройства:

$$\eta = \frac{A_{\Pi}}{A_3}. \quad (39)$$

Так, в примере на рис. 56 тело под действием силы F_3 перемещается на расстояние l , а под действием силы F_{Π} — на расстояние h . Тогда с учетом формулы работы для рассматриваемого случая КПД плоскости равен: $\eta = \frac{F_{\Pi}h}{F_3l}$; где с учетом уравнений сил: $F_3 = mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha$, $F_{\Pi} = mg$.

КПД любого реального устройства всегда меньше 1.

²Процессы проводят мысленно. Важно также исключить, так сказать, «лишнее действие»: например, на разгон строительной плиты при подъеме идет бесполезная трата силы и т. п.

32 Энергия

Энергия (E [Дж]) — это величина, характеризующая способность тела совершить работу.

Например, движущееся тело А способно привести в движение некоторое покоящееся тело Б: при столкновении сила, действующая со стороны тела А на тело Б, совершает работу по разгону тела Б. Тогда говорят, что тело А до столкновения обладает **кинетической энергией** — то есть энергией движения:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (40)$$

Теперь пусть имеются, к примеру, неподвижные шар на горке и сжатая пружина, изображенные на рис. 57.



Рис. 57. Шар на горке и сжатая пружина

Шар на рис. 57 (слева), находящийся на гладкой горке, после небольшого отклонения может набрать скорость, соскользнув с возвышенности высоты h , и совершить работу по разгону другого тела. Тогда говорят, что шар массы m на высоте h обладает **потенциальной энергией** тяжести — то есть энергией, обусловленной притяжением тела и планеты³:

$$E_{\pi} = mgh. \quad (41)$$

Сжатая на величину x легкая пружина на рис. 57 (справа), разжимаясь, также может совершить работу по разгону другого тела. Тогда считают, что пружина жесткости k с деформацией x обладает **потенциальной энергией** упругости — то есть энергией, обусловленной упругим взаимодействием частей пружины:

$$E_{\pi} = \frac{kx^2}{2}. \quad (42)$$

Работа силы тяжести, как и силы упругости, не зависит от формы траектории, по которой перемещается точка приложения силы — это так называемые *потенциальные силы*.

Теорема о кинетической энергии. Работа, совершенная результирующей силой, действующей на тело, равна изменению кинетической энергии тела:

$$A_R = \Delta E_k.$$

Теорема о потенциальной энергии. Работа потенциальной силы равна изменению соответствующей потенциальной энергии со знаком минус:

$$A_{\pi} = -\Delta E_{\pi}.$$

³Формула справедлива в том случае, когда тело находится вблизи поверхности планеты (то есть высота h много меньше радиуса планеты).

33 Сохранение и изменение энергии

Полная механическая энергия (E [Дж]) — это сумма кинетической и потенциальной энергии тела⁴:

$$E = E_k + E_{\text{п}}. \quad (43)$$

Закон сохранения полной механической энергии. Если на тело (в системе тел) не действуют силы трения и внешние силы, то полная механическая энергия тела (системы) сохраняется⁵:

$$E_1 = E_2 = \dots, \quad (44)$$

где E_1 и E_2 — полные механические энергии в первом и втором состояниях.

Пусть, например, вначале шар покоится на горке, и сжатая пружина с приложенным к ней бруском неподвижна (рис. 58).



Рис. 58. Начальные положения шара и сжатой пружины с бруском

Покоящийся шар (рис. 58, слева) массы $m_{\text{ш}}$ на высоте h обладает в начальном положении полной механической энергией $E_{\text{ш1}} = m_{\text{ш}}gh$. Неподвижная система тел «пружина-брусок» (рис. 58, справа) с деформацией x легкой пружины жесткости k обладает вначале полной механической энергией $E_{\text{пб1}} = \frac{kx^2}{2}$.

Пусть рассматриваемые тела изменили свое положение. Соскользнув без трения с горки на горизонтальную поверхность, шар приобрел скорость $v_{\text{ш}}$, и его полная механическая энергия стала равна $E_{\text{ш2}} = \frac{m_{\text{ш}}v_{\text{ш}}^2}{2}$. Пружина возвращаясь в недеформированное состояние, привела в движение соприкасающийся с ней на гладкой поверхности брусок массы $m_{\text{б}}$, который приобрел скорость $v_{\text{б}}$; тогда полная механическая энергия этой системы равна $E_{\text{пб2}} = \frac{m_{\text{б}}v_{\text{б}}^2}{2}$.

Так, для рассмотренного процесса с шаром соотношение (44) дает: $E_{\text{ш1}} = E_{\text{ш2}}$ или $m_{\text{ш}}gh = \frac{m_{\text{ш}}v_{\text{ш}}^2}{2}$ (аналогично для системы «пружина-брусок»).

Если же на тело (в системе тел) действуют силы трения и/или внешние силы, то справедлив следующий закон.

Закон изменения полной механической энергии. Работа *непотенциальных сил*⁶, действующих на тело (в системе тел), равна изменению полной механической энергии тела (системы):

$$A_{\text{н.с}} = \Delta E. \quad (45)$$

⁴Для системы тел — сумма кинетических и потенциальных энергий тел системы.

⁵Вообще говоря, этот закон справедлив в случае равенства нулю суммы работ сил трения и внешних сил: $A_{\text{тр}} + A_{\text{внеш}} = 0$.

⁶Под непотенциальными силами здесь можно понимать силы трения и внешние силы, тогда работа непотенциальных сил равна $A_{\text{н.с}} = A_{\text{тр}} + A_{\text{внеш}}$.

Глава 5

Механические колебания и волны

34 Механические колебания

Механические колебания — это движение тела, повторяющееся во времени около положения равновесия (далее для краткости — *колебания*).

Одно полное колебание — это такое движение, после которого тело первый раз оказывается в начальном положении, имея в нем те же скорость и ускорение (рассматриваются *незатухающие* колебания). *Период* (T [с]) есть время одного полного колебания¹.

На рис. 59 показаны несколько положений колеблющегося на пружине шара и график его движения (положение тела фиксируют каждую секунду).

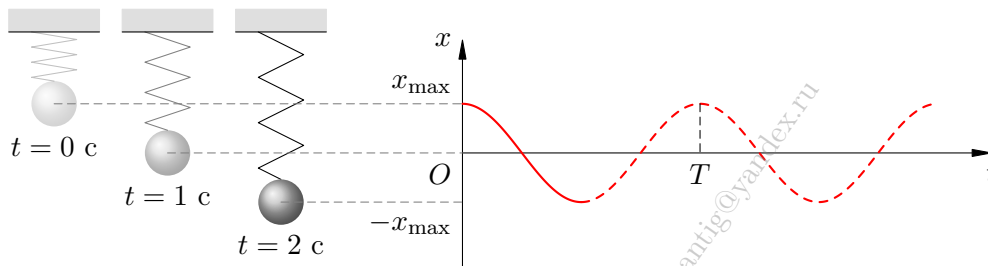


Рис. 59. Колебания шара

Система тел (рис. 59, слева) находится вблизи планеты, трения нет. Покоящийся массивный шар, смещенный вверх от положения равновесия на величину $x_{\max}$, при $t = 0$ с начинает разгон вниз из координаты $x_{\max}$. К моменту времени $t = 1$ с разгон окончен, и шар оказывается в положении равновесия $x = 0$; с этого момента начинается торможение движущегося вниз шара. В момент $t = 2$ с шар останавливается в координате $-x_{\max}$; далее характер движения шара подобен уже рассмотренному процессу, но перемещается шар теперь вверх.

На диаграмме $x(t)$ (рис. 59, справа) сплошной линией показан график изменения координаты тела в рассмотренном промежутке времени; штриховая линия описывает зависимость $x(t)$ при больших значениях t . На графике отмечено время T , при котором тело возвращается в начальное положение: *за время T (период) тело проходит путь в четыре $x_{\max}$ (четыре амплитуды)*.

При точных построениях (и малых деформациях пружины) форма графика на рис. 59 (справа) указывает, что шар совершает гармонические колебания.

Гармонические колебания — это колебания, при которых координата тела меняется во времени по закону *косинуса* (или *синуса*):

$$x = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi), \quad (46)$$

где $x_{\max}$ — *амплитуда колебаний*, то есть наибольшее отклонение от положения равновесия (наибольшее значение координаты); $(\omega t + \varphi)$ — *фаза* колебания; ω — *циклическая частота* (или *круговая частота*); φ — *начальная фаза*².

К проекциям скорости и ускорения тела при колебаниях можно перейти через производные по времени (пример для проекций на ось Ox):

$$v_x = x', \quad a_x = v'_x. \quad (47)$$

¹Связи величин в колебаниях аналогичны связям одноименных величин, описывающих движение по окружности: например, $\nu = \frac{1}{T}$ или $\omega = 2\pi\nu$.

²Циклическая частота есть скорость изменения фазы. Фаза и циклическая частота измеряются в рад и рад/с соответственно (рад или радиан — единица измерения угла: $180^\circ = \pi$ рад).

35 Маятники

Маятник — это тело, способное колебаться около неподвижной точки. На рис. 60 изображены шарик и брусок, выведенные из положения равновесия.

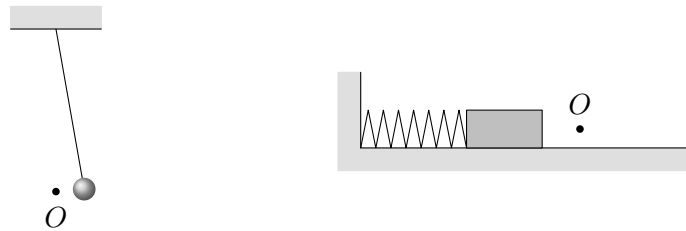


Рис. 60. Маятники

Математическим маятником (или *нитяным маятником*) называют подвешенное на легкой нерастяжимой нити небольшое тело (рис. 60, слева). В изображенной ситуации этот маятник может совершать колебания около точки O — то есть около положения его равновесия. При малых колебаниях, когда отклонения маятника от положения равновесия малы по сравнению с длиной нити, период колебаний математического маятника равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (48)$$

где l — длина нити, g — ускорение свободного падения.

Пружинным маятником называют закрепленное на пружине тело (рис. 60, справа). В проиллюстрированной ситуации этот маятник также способен колебаться около положения равновесия (точка O). Если величина деформации пружины много меньше ее размеров, то колебания малы; тогда период колебаний пружинного маятника равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (49)$$

где m — масса тела, k — жесткость пружины.

Колебания шара на нити и бруска на пружине, рассмотренные выше, предполагались *свободными*; это значит, что в этих системах тел (*колебательных системах*) отсутствовали периодические внешние воздействия и внутренние источники энергии, поддерживающие колебания. Частота³ свободных колебаний системы называется *собственной частотой* и обозначается ν_c . Следует отметить, что наличие трения в реальных колебательных системах приводит к тому, что свободные колебания постепенно *затухают* — колебания прекращаются.

Колебания называют *вынужденными*, если они происходят под воздействием внешней силы, периодически изменяющейся во времени (эту силу называют *вынуждающей силой*). При этом частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, обозначаемой ν .

Резонанс — это явление *возрастания амплитуды вынужденных колебаний*, когда частота вынуждающей силы равна (возможно, приблизительно) собственной частоте системы:

$$\nu = \nu_c. \quad (50)$$

³ Частота (ν [Гц]) есть число полных колебаний тела за одну секунду: $\nu = 1/T$.

36 Механическая волна

Механическая волна — это распространение колебаний частиц в упругой среде (твёрдой, жидкой или газообразной). Выделяют два вида волн.

1. **Поперечная:** частицы среды колеблются *перпендикулярно* направлению распространения волны (распространяется только в *твёрдых средах*). Такая волна показана на рис. 61; направление колебаний слоев (вертикальных рядов частиц) перпендикулярно *скорости волны* $\vec{v}$.

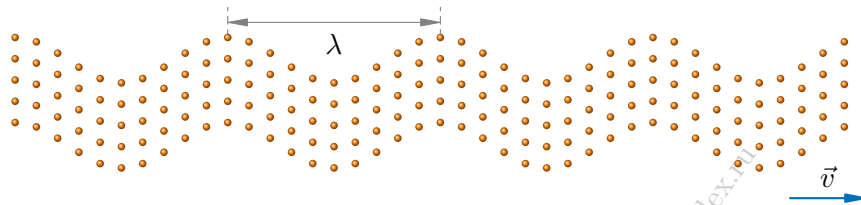


Рис. 61. Поперечная волна

2. **Продольная:** частицы среды колеблются *параллельно* направлению распространения волны. Такая волна показана на рис. 62; направление колебаний слоев (вертикальных рядов частиц) параллельно скорости волны $\vec{v}$.

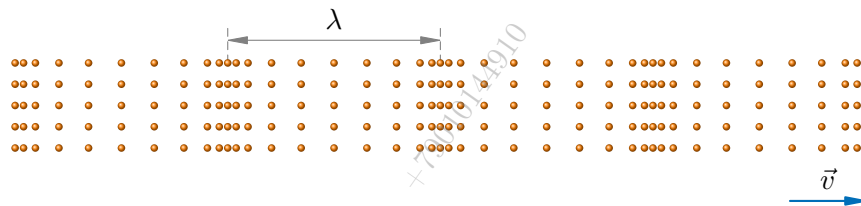


Рис. 62. Продольная волна

Длина волны (λ [м]) — это расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний:

$$\lambda = vT. \quad (51)$$

Длина волны λ в поперечной волне равна расстоянию между *соседними* горбами или впадинами (рис. 61). В продольной волне λ есть расстояние также между *соседними* сжатиями или разрежениями (рис. 62).

Звук — это механическая волна в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. Ниже этого диапазона лежит область *инфразвука*, выше — область *ультразвука*.

Вот основные характеристики звука.

- **Громкость** звука определяется *амплитудой* колебаний. Так, при колебаниях струн (рис. 63) громкость струны Б больше, чем громкость струны А (что видно по «размаху»).
- **Высота** звука определяется *частотой* колебаний. Например, в опыте на рис. 63 при различии только в длинах струн звук струны Б кажется выше, чем звук струны А.

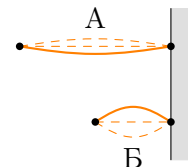


Рис. 63.
Струны

Скорость звука в твердых телах больше, чем в жидкостях, а в жидкостях — больше, чем в газах. Следует отметить, что *частота* звука при переходе из одной среды в другую не меняется и определяется частотой источника звука. Сказанное относится к любым механическим волнам.

Часть II

Молекулярная физика. Термодинамика

Глава 6

Молекулярная физика

37 Основные понятия молекулярной физики

Молекула — это наименьшая частица вещества. Например, капля воды состоит соответственно из определенных молекул — то есть частиц, сохраняющих химические свойства воды. Иначе, одна молекула воды — это наименьшее количество воды, которое можно взять. С помощью *химических реакций* молекулу разлагают на еще меньшие частицы, называемые атомами. Так, молекула воды H_2O состоит из трех атомов (рис. 64; атомы изображены в виде шаров).

Атом — это наименьшая *химически неделимая* частица вещества. Так, молекулу можно разделить на атомы, из которых посредством *химических превращений* можно «собрать» вещество. Но если делить сам атом, то получившиеся части не годятся для построения какого-либо вещества с точки зрения *химии*.

Разновидностей атомов (то есть *химических элементов*) сравнительно немного — все они сведены в таблицу Менделеева. Например, молекула воды H_2O состоит из двух атомов водорода Н и одного атома кислорода О (рис. 64).

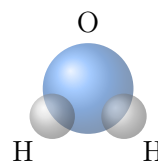


Рис. 64.
Молекула
 H_2O

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) строения вещества основывается на трех утверждениях.

1. Вещество состоит из частиц — молекул¹. Они расположены на расстояниях друг от друга.
2. Молекулы постоянно беспорядочно движутся (*тепловое движение*).
3. Молекулы взаимодействуют друг с другом, так что они притягиваются или отталкиваются.

На рис. 65 изображены модели трех тел, «собранных» из молекул.

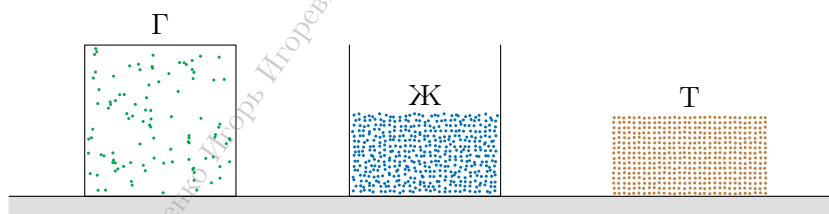


Рис. 65. Модели трех тел

Вещества тел Г, Ж и Т находятся в разных *агрегатных состояниях*. Речь идет о следующих трех состояниях вещества.

1. **Газообразное** тело Г не имеет собственные объем и форму.
2. **Жидкое** тело Ж сохраняет объем, но не форму.
3. **Твердое** тело Т характеризуется собственными объемом и формой.

Твердые тела подразделяют на *кристаллические* и *аморфные*. В кристаллических телах частицы вещества упорядочены в пространстве (тело Т на рис. 65). В аморфных телах частицы не располагаются в определенном порядке (внутренняя структура аналогична структуре тела Ж на рис. 65).

¹Или из атомов, что далее подразумевается.

38 Диффузия. Броуновское движение

Диффузия — это взаимное проникновение контактирующих веществ друг в друга. На рис. 66 (слева) изображена красная капля, помещенная на поверхность воды (тела представлены как набор молекул).

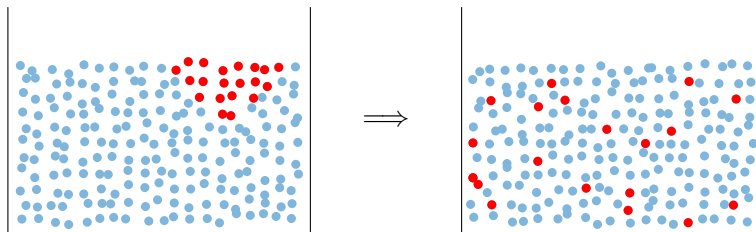


Рис. 66. Диффузия в жидкости

Вначале жидкая растворимая капля располагается в верхней правой части воды (рис. 66, слева). Вследствие непрерывного хаотического движения (теплового движения) молекулы жидкостей в стакане перемешиваются друг с другом и равномерно распределяются по всему объему смеси (рис. 66, справа). При диффузии вещество стремится распространяться во все стороны, поэтому в рассмотренном опыте начальное положение капли в воде не имеет значения.

Диффузия наблюдается в телах с любым агрегатным состоянием вещества: в жидкостях она происходит медленнее, чем в газах, но быстрее, чем в твердых телах.

Броуновским движением называют непрерывное беспорядочное движение *крупинки*, взвешенных в жидкости или газе². На рис. 67 изображена траектория такого движения в воде некоторой крупинки, наблюдаемой в микроскоп.

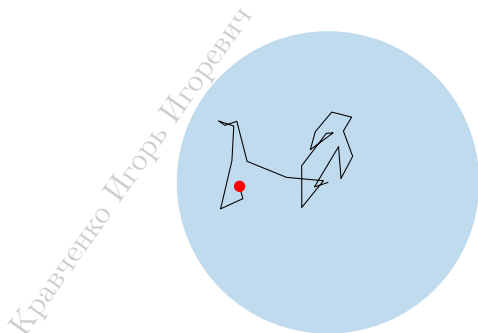


Рис. 67. Броуновское движение

Красная крупинка (броуновская частица) на рис. 67 в начале наблюдения находилась в центре голубой области. С течением времени броуновская частица описывает сложную зигзагообразную траекторию. Такое движение вызвано толчками окружающих молекул жидкости (или газа), которые в силу хаотичности движения молекул приводят к непредсказуемым результирующим воздействиям на крупинку.

Диффузия и броуновское движение являются опытными подтверждениями непрерывающегося беспорядочного движения молекул (атомов) вещества.

²Под крупинкой здесь понимают тело очень малого размера (около 10^{-6} м). Это так называемая *броуновская частица*. Для сравнения: средний диаметр молекулы порядка 10^{-10} м.

39 Основные формулы молекулярной физики

В молекулярной физике рассматриваются *макроскопические* тела — то есть тела, состоящие из огромного числа частиц³: например, даже в одном грамме воды содержится порядка 10^{22} молекул. Для удобства описания таких тел с учетом их внутреннего строения вводят следующие величины.

- **Число Авогадро** $\left(N_A \left[\frac{1}{\text{моль}} \right] \right)$ — это число частиц, содержащееся в такой порции вещества, которой удобно пользоваться на практике (эта порция носит название «моль»). Моль любого вещества содержит одно и то же число частиц, которое в настоящее время принимают приближенно равным $N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.
- **Количество вещества** (ν [моль]) — это количество порций по N_A частиц, образующих данное тело.
- **Молярная масса** $\left(M \left[\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right] \right)$ — это масса порции из N_A частиц данного вещества (или, как говорят, масса одного моля этого вещества). Молярные массы химических элементов можно узнать из таблицы Менделеева: следует взять атомную массу (число возле номера элемента) из ячейки данного элемента и умножить на 10^{-3} — получится значение в кг/моль. Например, в ячейке железа у его порядкового номера стоит число 56 (округленно); это значит, что молярная масса железа (одноатомное вещество) равна $56 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Для определения молярной массы вещества, молекулы которого состоят из нескольких атомов, нужно суммировать молярные массы. Например, молярная масса воды H_2O равна $1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 + 16 \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Число частиц в теле с учетом определения количества вещества можно вычислять по формуле:

$$N = \nu N_A. \quad (52)$$

Масса вещества с учетом определения молярной массы рассчитывается так:

$$m = \nu M, \quad (53)$$

или, обозначая массу частицы через m_0 :

$$m = N m_0. \quad (54)$$

Плотность, как известно из механики, находится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (55)$$

Концентрация $\left(n \left[\frac{1}{\text{м}^3} \right] \right)$ — это характеристика тела, показывающая число частиц в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}. \quad (56)$$

³Обычно речь идет о молекулах или атомах, что предполагается далее.

40 Формулы для идеального газа

Состояние любого макроскопического тела⁴ можно описать так называемыми *макроскопическими параметрами* (*макропараметрами*) — величинами, относящимися ко всему телу, а не к его частицам. Важнейшими макропараметрами являются давление, объем и температура.

Температура (T [K]) — это мера подвижности частиц тела (обусловленной их тепловым движением). Более точно, температура есть мера *средней кинетической энергии* частиц тела.

Для практических задач удобно говорить об **абсолютной температуре** в *кельвинах* (K), ноль которой соответствует прекращению теплового движения частиц вещества. Вот связь абсолютной температуры T и температуры t в *градусах Цельсия* ($^{\circ}\text{C}$):

$$T = t + 273. \quad (57)$$

Идеальный газ — это *физическая модель*⁵, используемая для описания разреженных газов, когда расстояния между их частицами намного больше размеров самих частиц. Данная модель предполагает следующие допущения: 1) частицы газа считаются материальными точками, 2) частицы не взаимодействуют друг с другом на расстоянии, 3) столкновения частиц считают абсолютно упругими. (Везде далее газ считается идеальным.)

Из законов механики выводится формула для давления газа — так называемое **основное уравнение МКТ**:

$$P = \frac{1}{3} m_0 n v^2, \quad (58)$$

где m_0 — масса одной частицы, n — концентрация газа, v — *средняя квадратичная скорость* частицы.

Также можно говорить о **средней кинетической энергии**, приходящейся на одну частицу, так как частицы газа движутся:

$$E_{\text{к0}} = \frac{m_0 v^2}{2}. \quad (59)$$

Связь **средней квадратичной скорости** и температуры дается формулой:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \quad (60)$$

где k — *постоянная Больцмана* (значение указано в справочных таблицах).

Давление газа связано с температурой так (подстановка (60) в (58)):

$$P = nkT. \quad (61)$$

Уравнение Менделеева—Клапейрона дает связь трех важнейших величин, характеризующих состояние газа, — давления, объема и температуры:

$$PV = \nu RT, \quad (62)$$

где $R = kN_A$ — *универсальная газовая постоянная* (см. справочные таблицы).

Уравнение Менделеева—Клапейрона называют *уравнением состояния газа*.

⁴Тело, состоящее из огромного числа частиц.

⁵Физическая модель — это упрощенный аналог физической системы (процесса), сохраняющий ее главные черты.

41 Закон Дальтона

В природе и в технике очень часто имеют дело со *смесью* нескольких газов⁶. Например, воздух — это смесь азота, кислорода, аргона, углекислого газа и других газов.

Пусть имеется смесь двух газов в сосуде (рис. 68).

Газы на рис. 68 имеют одинаковую температуру. Молекулы газов для наглядности окрашены — можно говорить как бы о зеленом и красном газах. Их смесь оказывает на стенки давление, обозначаемое $P_{\text{зк}}$. В любой смеси газов каждый из газов ведет себя независимо от других газов, то есть зеленый и красный газы в предложенном примере можно рассматривать по отдельности в данном сосуде (рис. 69).

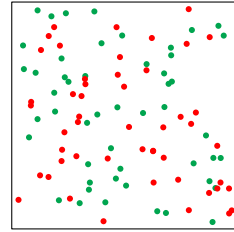


Рис. 68. Два газа в сосуде

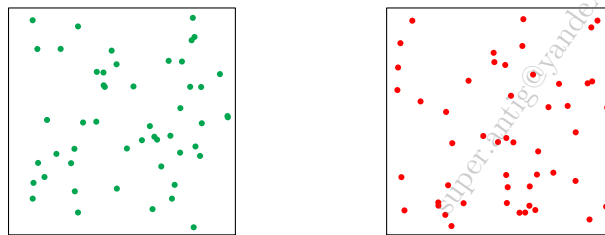


Рис. 69. Газы по отдельности

На рис. 69 (слева) из сосуда удалены все газы кроме зеленого; оставшийся газ производит давление, обозначаемое $P_{\text{з.см}}$ (подпись «см» напоминает, что у данного газа такое же состояние, какое он имеет в смеси). Аналогично, на рис. 69 (справа) в сосуде оставили только красный газ, производящий давление $P_{\text{к.см}}$.

Парциальное давление — это давление, которое производил бы выбранный газ, входящий в состав смеси, если удалить остальные газы из сосуда. Таким образом, в рассматриваемой ситуации с зеленым и красным газами их давления $P_{\text{з.см}}$ и $P_{\text{к.см}}$ — это парциальные давления.

Закон Дальтона. Давление смеси газов есть сумма их парциальных давлений:

$$P_{\text{см}} = P_{1\text{см}} + P_{2\text{см}} + \dots, \quad (63)$$

где $P_{1\text{см}}, P_{2\text{см}}, \dots$ — парциальные давления первого, второго и так далее газов.

Так, для ситуации, проиллюстрированной рисунками 68 и 69, уравнение (63) дает: $P_{\text{зк}} = P_{\text{з.см}} + P_{\text{к.см}}$.

Теперь можно разобрать стандартную задачу на смеси газов.

Задача. Соединенные краном сосуды с газами под давлением 100 и 600 кПа имеют объемы 2 л и 3 л соответственно. Какое установится давление, если кран открыть? Температура постоянна.

Решение. Парциальные давления дает уравнение Менделеева—Клапейрона: $P_{1\text{см}} = \frac{\nu_1 RT}{V_{\text{см}}} = \frac{P_1 V_1}{V_{\text{см}}} = 40 \text{ кПа}$ и $P_{2\text{см}} = \frac{\nu_2 RT}{V_{\text{см}}} = \frac{P_2 V_2}{V_{\text{см}}} = 360 \text{ кПа}$. Давление смеси по закону Дальтона равно: $P_{\text{см}} = P_{1\text{см}} + P_{2\text{см}} = 400 \text{ кПа}$.

⁶Везде далее газы считаются идеальными.

42 Изопроцессы

Процесс — это переход газа⁷ из одного состояния в другое. Состояние газа определяется его количеством вещества (ν), давлением (P), объёмом (V) и температурой (T); эти параметры связаны друг с другом уравнением Менделеева—Клапейрона. В дальнейшем подразумевается, что процессы проводят с одним и тем же газом (то есть $\nu = \text{const}$).

Изопроцесс — это процесс, в котором значение одного из макропараметров (P , V или T) остается неизменным. На рис. 70 изображены три сосуда с одинаковыми газами, у которых поддерживаются постоянными разные параметры.

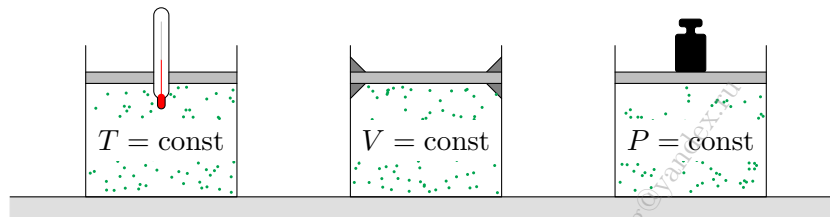


Рис. 70. Газы с разными фиксированными параметрами

Трем случаям, проиллюстрированным на рисунке, соответствуют три вида изопроцессов.

1. **Изотермический** процесс (рис. 70, слева) идет при постоянной температуре газа: $T = \text{const}$. График⁸ такого процесса называется *изотермой*. На рис. 71 (слева) изображены две изотермы газа с разными температурами на PV -диаграмме: чем выше температура, тем дальше от начала O системы лежит соответствующая изотерма.
2. **Изохорный** процесс (рис. 70, посередине) идет при постоянном объеме газа: $V = \text{const}$. График такого процесса — *изохора*. На рис. 71 (посередине) изображены две изохоры газа с разными объемами на PT -диаграмме: чем больше объем, тем ближе к оси T лежит соответствующая изохора.
3. **Изобарный** процесс (рис. 70, справа) идет при постоянном давлении газа: $P = \text{const}$. График такого процесса есть *изобара*. На рис. 71 (справа) изображены две изобары газа с разными давлениями на VT -диаграмме: чем больше давление, тем ближе к оси T лежит соответствующая изобара.

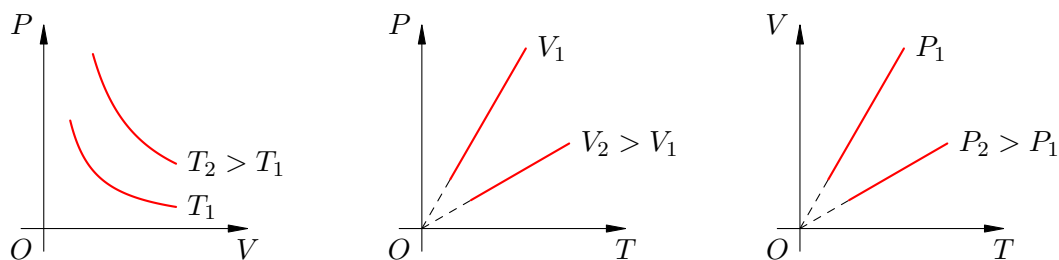


Рис. 71. Графики изопроцессов

⁷Более точно, макроскопического тела.

⁸Графики зависимости одного параметра от другого в изопроцессах получены с использованием уравнения Менделеева—Клапейрона.

43 Пар

Все жидкости⁹ имеют способность улетучиваться. Например, количество воды в открытом стакане с течением времени, как известно, уменьшается. Частицы жидкости не исчезают бесследно — они образуют невидимый пар.

Пар — это газ, образованный частицами жидкости, покинувшими ее. В примере с открытым стаканом с водой вылететь из жидкости с ее *свободной поверхности* могут некоторые частицы, имеющие достаточную скорость, чтобы преодолеть силы притяжения к соседним частицам (жидкость испаряется).

Испарение — это процесс превращения жидкости в пар, происходящий со свободной поверхности жидкости. *Испарение любой жидкости происходит постоянно при любой температуре.*

Частица пара через некоторое время может вернуться обратно в жидкость — пар конденсируется. **Конденсация** — это процесс превращения пара в жидкость. Конденсация пара есть процесс, обратный испарению жидкости.

Пусть имеются два закрытых сосуда с водой и ее паром (рис. 72).

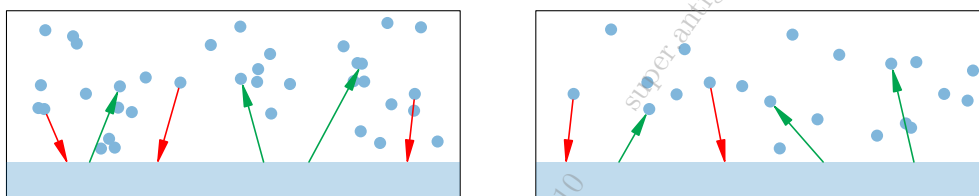


Рис. 72. Пары над жидкостью в сосудах

Зеленые стрелки показывают процессы покидания частицей жидкости; красные стрелки показывают обратные процессы. Соответственно примерам, проиллюстрированным рисунком, можно выделить два вида паров.

1. **Насыщенный** пар (рис. 72, слева) находится в *динамическом равновесии* со своей жидкостью: число частиц вылетающих из жидкости *равно* числу возвращающихся в нее за то же время. Пар *не может* вместить в себя больше частиц (как бы максимально «наполнен» ими).

Например, насыщенным будет пар над жидкостью, которая долгое время находится в закрытом сосуде.

2. В системе из **ненасыщенного** пара (рис. 72, справа) и его жидкости испарение преобладает над конденсацией: число частиц вылетающих из жидкости *превышает* числу возвращающихся в нее за то же время. Такой пар *может* вместить в себя еще больше частиц.

К примеру, ненасыщенным можно считать пар над жидкостью, которую только что налили в сухой сосуд и закрыли.

Давление ($P_{н.п}$) и плотность ($\rho_{н.п}$) насыщенного пара, например, воды — это максимальные давление и плотность, которые может иметь водяной пар при данной температуре. Эти параметры однозначно определяются *только* температурой; они сведены в справочные таблицы для насыщенных паров. Учитывая сказанное, состояние пара можно приближенно описывать уравнением Менделеева—Клапейрона.

⁹А также твердые тела.

44 Влажность воздуха

Воздух, в котором присутствует водяной пар, называют *влажным*. На рис. 73 изображены два закрытых сосуда с одинаковым количеством воды.

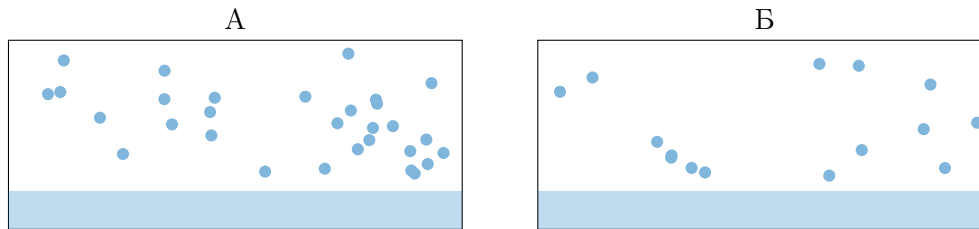


Рис. 73. Пары воды в сосудах

В сосуде А вода находится уже долгое время — в следствие испарения пар воды над ней успел стать насыщенным. Сосуд Б закрыли только что, налив перед этим воду, так что пар над ней можно считать еще ненасыщенным. Температуры и объемы паров в сосудах полагаются одинаковыми; разумеется, над жидкостью есть также и воздух (на рисунке не показан).

На примере двух сосудов с влажным воздухом (рис. 73) можно показать, как с помощью обычно двух величин характеризуют содержание водяного пара в воздухе, то есть его *влажность*.

1. **Абсолютная влажность** ($\rho_{\text{п}}$ [$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$]) — это *плотность* водяного пара в воздухе:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{V_{\text{п}}}, \quad (64)$$

где $m_{\text{п}}$ и $V_{\text{п}}$ — масса и объем пара.

Так, учитывая, что в ситуации на рис. 73 в сосуде А частиц пара больше, чем в сосуде Б, формула (64) дает: $\rho_{\text{пА}} > \rho_{\text{пБ}}$.

2. **Относительная влажность** (φ) — это характеристика воздуха, показывающая, на сколько близок пар в нем к *насыщению*:

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}(T)}{P_{\text{н.п}}(T)} = \frac{\rho_{\text{п}}(T)}{\rho_{\text{н.п}}(T)}, \quad (65)$$

где $P_{\text{п}}$ и $P_{\text{н.п}}$ — давления, а $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{н.п}}$ — плотности данного пара и насыщенного пара при температуре T (символ температуры T в скобках напоминает о согласовании значений величин по температуре и о правильном выборе значения из таблицы для насыщенного водяного пара).

С учетом определения относительные влажности в сосудах А и Б (рис. 73) связаны так: $\varphi_{\text{А}} > \varphi_{\text{Б}}$ (причем $\varphi_{\text{А}} = 1$, так как пар в сосуде А насыщен).

Относительная влажность воздуха не может быть больше единицы: $\varphi \leq 1$. Также стоит отметить, что под давлением пара в воздухе (*парциальным давлением пара*) понимают такое давление, которое он создавал бы, если бы все остальные газы отсутствовали (воздух — это смесь нескольких газов!).

Не следует считать, например, туман паром. Видимые «облака» над кипящей водой и прочие схожие объекты представляют собой множество мельчайших капель жидкости, в которые сконденсировался пар в воздухе при охлаждении ниже определенной температуры — *точки росы* ($\varphi = 1$).

Глава 7

Термодинамика

45 Внутренняя энергия

Любое тело состоит из частиц, которые постоянно беспорядочно движутся и взаимодействуют друг с другом. Сказанное иллюстрируется рисунком 74.



Рис. 74. Движение и взаимодействие частиц вещества

С одной стороны, вследствие теплового движения каждая частица тела обладает некоторой кинетической энергией (рис. 74, слева). С другой стороны, между частицами действуют *молекулярные силы*¹ (рис. 74, справа; для наглядности взаимодействия некоторые частицы соединены воображаемыми пружинами), так что любая пара частиц обладает потенциальной энергией.

Внутренняя энергия (U [Дж]) — это сумма кинетических энергий теплового движения всех частиц тела плюс сумма потенциальных энергий взаимодействия всех частиц друг с другом:

$$U = E_{\text{к. всех частиц}} + E_{\text{п. всех частиц}}. \quad (66)$$

В случае идеального газа взаимодействием между частицами вещества пренебрегают. Тогда внутренняя энергия зависит только от числа частиц и средней кинетической энергии одной частицы, пропорциональной температуре; можно показать, что **внутренняя энергия идеального газа** находится по формуле:

$$U = \frac{i}{2} \nu RT, \quad (67)$$

где i — число степеней свободы частицы ($i = 3$ для одноатомной частицы, $i = 5$ для двухатомной частицы, $i = 6$ для частицы с числом атомов больше двух).

Изменить внутреннюю энергию тела можно лишь двумя способами:

- механическая работа;
- теплопередача.

Проще говоря, нагреть тело получится только двумя принципиально разными способами: тереть его о что-нибудь (рис. 75, слева) или поставить на более горячее другое тело (рис. 75, справа).



Рис. 75. К способам изменения внутренней энергии

В общем случае изменение внутренней энергии может произойти как за счет совершения работы, так и за счет теплопередачи.

¹Эти силы сводятся к силам *электрических взаимодействий* между особыми *заряженными частицами*, находящимися в атомах или молекулах тела.

46 Теплопередача

Теплопередача — это процесс перехода внутренней энергии от более горячего тела к более холодному без совершения работы. Этот процесс также называют *теплообменом*. Например, если в холодный стакан налить горячую воду, то стакан нагреется — произошла теплопередача от воды к стакану.

Различают три вида теплопередачи.

1. **Теплопроводность** — это теплообмен между контактирующими телами (или частями тела). На рис. 76 изображен металлический стержень, помещенный одним концом в огонь. «Соприкасающиеся» с огнем частицы стержня (молекулы или атомы) начинают интенсивнее колебаться и сильнее «толкают» соседние частицы. Тепловое движение соседних частиц также увеличивается, и они в свою очередь «раскачивают» уже своих соседей по другую сторону. Так тепло постепенно распространяется от участка к участку.



Рис. 76. Теплопроводность

2. **Конвекция** — это теплообмен в жидкостях или газах за счет потоков вещества. На рис. 77 изображен сосуд с водой над огнем.

Жидкость вблизи дна сосуда нагревается и расширяется, так что ее плотность становится меньше по сравнению с холодной жидкостью сверху. Эта менее плотная теплая жидкость под действием силы Архимеда поднимается вверх (красные стрелки на рис. 77); напротив, более холодная жидкость «тонет», то есть опускается вниз (синие стрелки на рис. 77). Таким образом вещество в сосуде перемешивается, и вся жидкость с течением времени прогревается.

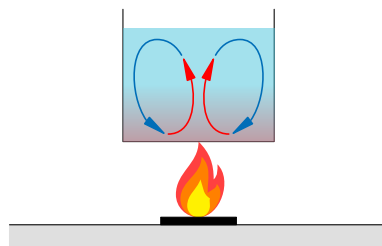


Рис. 77. Конвекция

3. **Излучение** — это теплообмен посредством электромагнитных волн. На рис. 78 — огонь.

Атомы любого тела при ненулевой температуре (в кельвинах) вследствие теплового движения испускают так называемые *электромагнитные волны*², то есть излучают энергию.

Видимый свет — это частный случай излучения (свечение огня на рис. 78 является примером видимого излучения).

Тела излучают энергию во все стороны; однако, не всякое излучение можно видеть — ведь большинство предметов при нормальных условиях не светятся, хотя эти предметы несомненно излучают (пример — горячая печь). Именно излучение «доставляет» энергию от Солнца к планетам — излучение может распространяться как в веществе, так и в *вакууме*.



Рис. 78. Излучение

²Электромагнитная волна — это распространение колебаний *электрического и магнитного полей* — особых форм материи, окружающей движущиеся *заряженные частицы*. Именно такие частицы, входящие в состав атома и совершающие вместе с ними хаотическое движение, и излучают электромагнитные волны, уносящие с собой часть внутренней энергии тела.

47 Количество теплоты

Количество теплоты (Q [Дж]) — это энергия, полученная телом (или отданная им) при теплопередаче. Для этой величины можно встретить также другие названия: *количество тепла*, *теплота* или *тепло*.

Если тело массы m получило (отдало) тепло Q , и при этом его температура увеличилась (уменьшилась), а агрегатное состояние не менялось, то соответствующую **теплоту нагревания/охлаждения** можно находить по формуле:

$$Q = cm\Delta T, \quad (68)$$

где c — *удельная теплоемкость* вещества (находят в справочных таблицах), ΔT — изменение температуры³. (Величина $C = cm$ есть *теплоемкость* тела.)

Пусть два тела с разными температурами привели в контакт (рис. 79, слева).

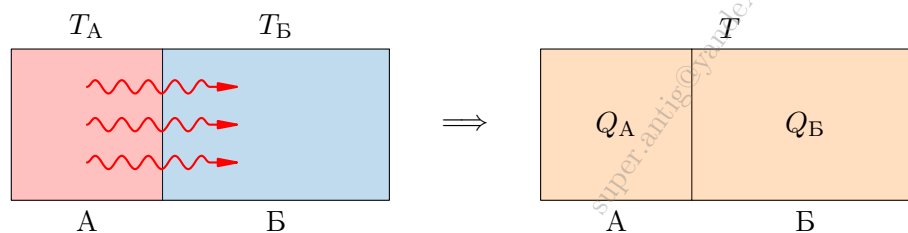


Рис. 79. Теплообмен между двумя телами

Сразу после соприкосновения теплопроводящих тел А и Б с соответствующими температурами T_A и T_B ($T_A > T_B$) начинается теплопередача от тела А к телу Б без изменения их агрегатных состояний (красные стрелки на рис. 79, слева). После установления теплового равновесия (рис. 79, справа) бруски имеют одинаковую температуру T — теплообмен с этого момента не происходит. В процессе теплопередачи температура тела А понизилась, то есть тело отдало тепло, обозначаемое Q_A ; наоборот, температура тела Б повысилась — оно получило тепло, обозначаемое Q_B . Для данной системы тел можно записать следующее уравнение.

Уравнение теплового баланса. В системе тел только при теплообмене между ними сумма количеств теплоты, принятых (или отданных) телами, равна нулю:

$$\pm Q_1 \pm Q_2 \pm \dots = 0, \quad (69)$$

где $Q_1, Q_2, \dots$ — теплоты, принятые/отданные первым, вторым и т. д. телом.

Знаки в формуле (69) выбирают по следующим правилам:

- теплоте нагревания/охлаждения всегда приписывают знак «+»;
- знак «+» приписывают теплу, если оно получено телом;
- знак «−» приписывают теплу, если оно отдано телом.

Так, в рассмотренном примере с двумя телами (рис. 79) формула (69) дает: $Q_A + Q_B = 0$; где с учетом формулы (68) $Q_A = c_A m_A (T - T_A)$, $Q_B = c_B m_B (T - T_B)$.

³Знак Δ означает, что нужно взять разность конечного и начального значений той величины, которая стоит после этого знака: например, изменение температуры есть $\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$. Это значение символ Δ сохраняет практически во всех ситуациях при решении задач.

48 Изменения агрегатных состояний вещества

Если внутреннюю энергию тела меняют, то может происходить *изменение агрегатного состояния* его вещества. Интерес представляют следующие процессы изменения агрегатных состояний.

- **Плавление** — это превращение твердого тела в жидкость. В случае кристаллического тела этот процесс происходит при определенной *температуре плавления*, зависящей от вещества тела. Наоборот, аморфные тела не имеют определенной температуры плавления!

Отвердевание (*кристаллизация*) — это превращение жидкости в твердое тело. Температура, при которой тело отвердевает, равна температуре плавления: при данной температуре в зависимости от внешних условий может происходить плавление или отвердевание. Кристаллические тела отвердевают при постоянной температуре, аморфные — нет.

Теплота плавления/отвердевания для полного превращения твердого тела массы m в жидкость (или наоборот) при температуре плавления находится по формуле:

$$Q = \lambda m, \quad (70)$$

где λ — *удельная теплота плавления* вещества (см. справочные таблицы).

- **Парообразование** — это превращение жидкости в газообразное состояние (в пар). Перевести жидкость в пар можно двумя способами.

- а) *Испарение* — это парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости при любой температуре.
- б) *Кипение* — это парообразование, происходящее по всему объему жидкости. Жидкость кипит при *температуре кипения*, когда *давление насыщенного пара в пузырьках* $P_{н.п}$ в жидкости равно давлению жидкости $P_{ж}$ на эти пузырьки: $P_{н.п} = P_{ж}$.

Конденсация — это превращение пара в жидкость.

Теплота парообразования/конденсации для полного превращения жидкости массы m в пар (или наоборот) при температуре кипения находится по формуле:

$$Q = Lm, \quad (71)$$

где L — *удельная теплота парообразования* вещества (см. таблицы).

Сгорание — это химическая реакция, сопровождающаяся выделением тепла. Примером такого процесса является горение *топлива* (например, дров).

Теплота сгорания топлива массы m равна:

$$Q = qm, \quad (72)$$

где q — *удельная теплота сгорания* вещества (см. справочные таблицы).

Для передачи тепла телу используют различные нагревательные устройства. Они характеризуются **тепловой мощностью** P и **КПД устройства** η :

$$P = \frac{Q}{t}, \quad \eta = \frac{Q_{п}}{Q_{з}}, \quad (73)$$

где $Q_{п}$ и $Q_{з}$ — полезное и затраченное количество теплоты устройства.

49 Графики тепловых процессов

Как известно, любое тело, получая (отдавая) тепло, может изменить свою температуру. Также при теплопередаче может меняться агрегатное состояние вещества тела. Описывать состояние тела в таких процессах удобно графиками.

Пусть твердое тело поместили в специальную камеру, где ему каждую секунду передают (или забирают) одно и то же количество теплоты. На рис. 80 представлена графически качественная зависимость температуры тела от времени.

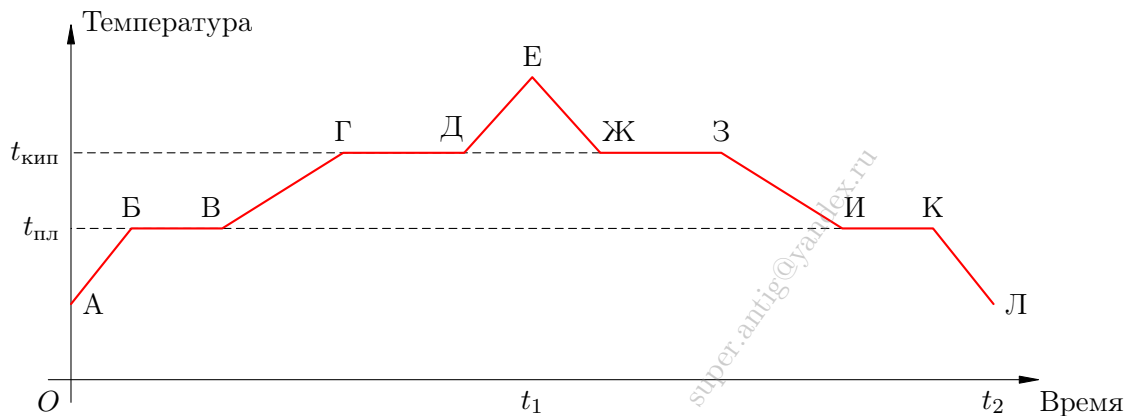


Рис. 80. Зависимость (качественная) температуры тела от времени

На промежутке времени от 0 до t_1 тепло *подводится* к телу, на промежутке от t_1 до t_2 — *отводится*. Можно сказать, что на рис. 80 представлен набор графиков — каждый прямолинейный участок описывает отдельный процесс, характеризующийся своей направленностью и агрегатным состоянием вещества (или видом его изменения).

Участок АБ соответствует *нагреванию* твердого тела — его температура увеличивается. При достижении температуры плавления $t_{пл}$ рост температуры прекращается, и на участке БВ происходит *плавление* тела при постоянной температуре: твердое состояние постепенно сменяется жидким (чем ближе к точке В, тем меньше остается твердого вещества). Далее на участке ВГ получившаяся жидкость (*расплав*) нагревается до температуры кипения $t_{кип}$. В точке Г начинается *кипение*: на участке ГД жидкое тело превращается в пар, и в точке Д тело уже полностью является газообразным. При дальнейшем подведении тепла на участке ДЕ происходит нагревание образовавшегося пара до некоторой температуры.

В точке Е подвод тепла сменяется отводом, и наблюдается *остывание* пара (участок ЕЖ) до температуры $t_{кип}$. С этого момента температура тела перестает меняться — на участке ЖЗ идет *конденсация* пара, который полностью превращается в жидкость в точке З. Следующий участок ЗИ соответствует дальнейшему остыванию этой жидкости. При температуре $t_{пл}$ начинается переход тела из жидкого состояния в твердое — *отвердевание* (участок ИК). В точке К уже все тело является твердым; оно и остывает далее на участке КЛ.

При постоянной мощности теплопередачи наклон графика точной зависимости температуры тела от времени характеризует *теплоемкость* тела — чем *круче* идет (вверх или вниз) график температуры, тем *меньше* теплоемкость тела (оно как бы легко меняет свою температуру).

50 Работа газа

Пусть сосуд с газом, находящимся под неподвижным гладким массивным поршнем, поставили на огонь (рис. 81, слева).

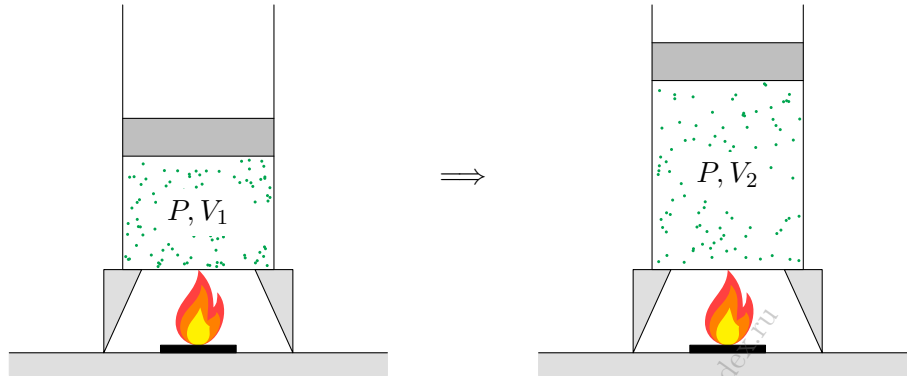


Рис. 81. Распирение газа

Газ начального объема V_1 медленно получает тепло от огня, так что давление P газа не меняется — оно равно давлению почти покоящегося поршня на газ (рис. 81, слева). При постоянном давлении температура газа медленно повышается, то есть его молекулы начинают двигаться быстрее — они сильнее толкают поршень, и он постепенно поднимается (рис. 81, справа). За время наблюдения газ расширяется до объема V_2 , совершая работу.

Работа газа (A [Дж]) — это работа сил давления газа. При *постоянном давлении* газа ее находят по формуле:

$$A = P\Delta V, \quad (74)$$

где P — давление, а ΔV — изменение объема газа.

При расширении газ совершает положительную работу ($A > 0$), при сжатии — отрицательную ($A < 0$). Так, в рассмотренном примере (рис. 81) газ совершает положительную работу $A = P(V_2 - V_1)$.

Описанный выше процесс с газом можно изобразить на PV -диаграмме (рис. 82).

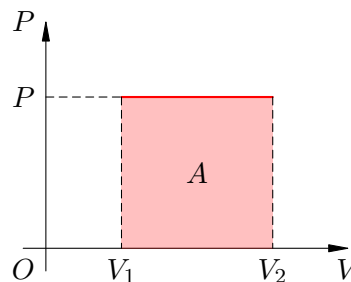


Рис. 82. Работа газа как площадь

Как видно, *работа газа* равна *площади фигуры* (взятой с соответствующим знаком) между графиком и осью V на PV -диаграмме для соответствующего изменения объема.

Работа внешних сил A' над газом связана с работой газа A так:

$$A' = -A. \quad (75)$$

51 Законы термодинамики

Если сосуд со сравнительно холодным газом под поршнем поставить на огонь, то начнется теплопередача от огня к газу (рис. 83, слева).

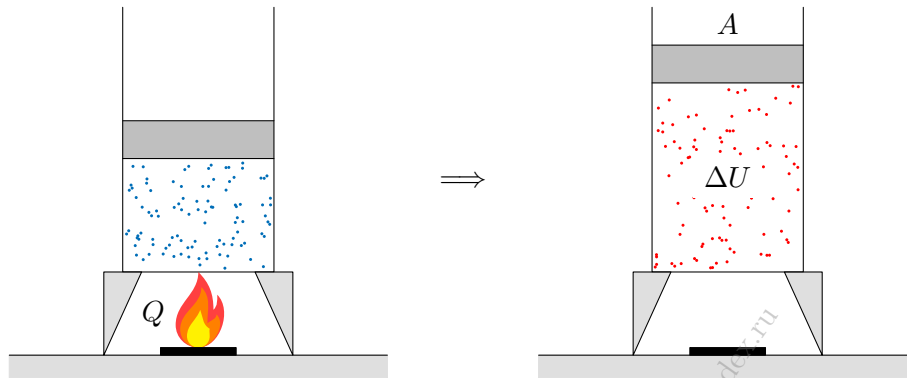


Рис. 83. Газ «на огне»

Огонь передает газу тепло Q (рис. 83, слева), вследствие чего внутренняя энергия газа увеличивается на величину ΔU , и газ совершает работу A по медленному поднятию гладкого массивного поршня (рис. 83, справа). В данном случае справедлив следующий закон.

Первый закон термодинамики. Количество теплоты, переданное телу, идет на изменение его внутренней энергии и на совершение телом работы:

$$Q = \Delta U + A. \quad (76)$$

Особый интерес представляет **адиабатный процесс** — процесс без теплообмена с окружающими телами ($Q = 0$). Если сосуд теплоизолирован, то газ в нем совершает адиабатный процесс. Также адиабатным считается всякий быстропротекающий процесс. График такого процесса называется *адиабатой*. В адиабатном процессе давление убывает с увеличением объема быстрее, чем в изотермическом процессе (рис. 84).

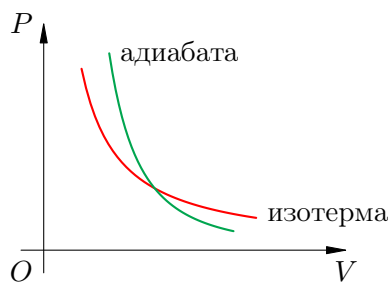


Рис. 84. Адиабата убывает быстрее изотермы

Второй закон термодинамики. Невозможен процесс, единственным итогом которого является теплопередача от менее нагретого тела к более нагретому.

Этот закон отмечает опытный факт: *тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным*. Передать энергию от холодного тела к горячему можно только за счет работы внешнего источника (это происходит в холодильных машинах).

52 Тепловые машины

Тепловая машина — это устройство, преобразующее теплоту в работу (или наоборот). Тепловые машины бывают двух видов.

1. *Тепловой двигатель* преобразует теплоту, полученную от внешнего источника, в работу.
2. *Холодильная машина* передает тепло от более горячего тела к более холодному за счет работы внешнего источника.

Для начала более подробно следует рассмотреть принцип действия теплового двигателя, схема которого изображена на рис. 85.

Нагреватель — это сгорающее топливо. Часть энергии, выделившейся при сгорании, передается *рабочему телу* — газу — в виде теплоты Q_H (*теплота нагревателя*). В результате газ нагревается и расширяется, двигая поршень и совершая полезную работу A (*работа газа*). При возвращении двигателя в исходное состояние часть энергии передается другому телу с меньшей температурой — *холодильнику*⁴ — в виде тепла Q_X (*теплота холодильника*). Таким образом, часть теплоты нагревателя идет на полезную работу, часть — отдается холодильнику:

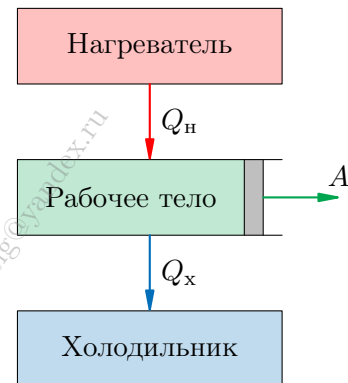


Рис. 85. Тепловой двигатель

$$Q_H = A + Q_X. \quad (77)$$

Эффективность превращения энергии сгорающего топлива в работу характеризует **коэффициент полезного действия (КПД)** теплового двигателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_H}. \quad (78)$$

КПД реального теплового двигателя всегда меньше 1. Паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания имеют КПД около 0,4.

Максимально возможный КПД любого теплового двигателя можно найти по *формуле Карно*:

$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_X}{T_H}, \quad (79)$$

где T_H — температура нагревателя, T_X — температура холодильника.

Для вывода этой формулы Карно придумал *идеальную тепловую машину*, рабочим телом которой является идеальный газ.

Эта машина работает по *циклу Карно* — циклу, состоящему из двух изотерм (с температурами T_H и T_X) и двух адиабат (рис. 86). Рассчитать КПД двигателя, работающего по циклу Карно, можно как по формуле (78), так и по формуле (79).

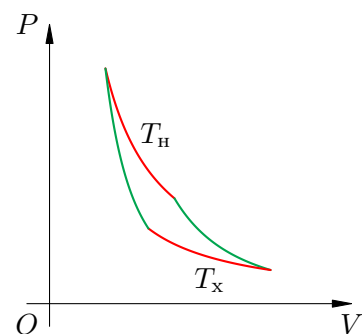


Рис. 86. Цикл Карно

⁴Холодильником чаще всего является атмосфера.

Часть III

Электродинамика

Глава 8

Электростатика

53 Заряженные частицы и тела

Некоторые явления можно объяснить только взаимодействием особого типа — *электромагнитным взаимодействием*. Один из примеров — «прилипание» мелкого листка бумаги к пластиковому предмету, натертому до этого о шерсть.

Стали считать, что подобные явления (*электрические явления*) возможны благодаря наличию в телах так называемых *заряженных частиц* — частиц, обладающих способностью к электромагнитному взаимодействию (вводят два вида таких частиц: *положительные* и *отрицательные*). Частицы, не имеющие такую способность, называют незаряженными или нейтральными.

Ключевую роль при объяснении электрических явлений играет строение *атома*. На рис. 87 показана *планетарная модель атома*.

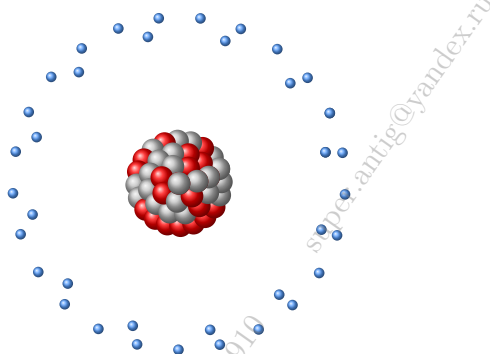


Рис. 87. Модель атома

Любой атом состоит из следующих частиц.

1. **Ядро** — это сложная частица, находящаяся в центре атома¹ и несущая почти всю его массу (группа из красных и серых шаров на рис. 87). В общем случае ядро является образованием из нескольких частиц — протонов и нейтронов. **Протоны** (p) — это *положительно заряженные* частицы (красные шары на рис. 87); **нейтроны** (n) — это нейтральные частицы (серые шары на рис. 87).

Наличие протонов в ядре делает его положительно заряженной частицей.

2. **Электроны** (e) — это *отрицательно заряженные* частицы (синие шары на рис. 87). Они движутся вокруг ядра.

Таким образом, любое тело несет в себе положительно (протоны) и отрицательно (электроны) заряженные частицы. Протоны, нейтроны и электроны называют *элементарными частицами*. Атом в целом электронейтрален: в нем количество положительно заряженных протонов *равно* количеству отрицательно заряженных электронов.

Электрические явления вызываются, как говорят, заряженными телами. **Заряженное тело** — это тело, в котором количество протонов *не равно* количеству электронов. Например, если в теле протонов больше, чем электронов, то тело считается положительно заряженным: знак «заряженности» тела определяется знаком тех частиц, которые преобладают в нем.

¹На рисунке размер ядра преувеличен: ядро занимает чрезвычайно малую часть атома.

54 Заряд

Заряженные тела могут как притягиваться друг к другу, так и отталкиваться. В общем случае характер взаимодействия таких тел определяется их зарядами.

Заряд (q [Кл]) — это характеристика способности заряженного тела взаимодействовать с другим заряженным телом. Чем больше заряд данного тела, тем с большей силой это тело притягивается (или отталкивается) к другому заряженному телу при прочих равных условиях. Положительно заряженное тело имеет положительный заряд, отрицательно заряженное — отрицательный заряд. Для краткости всякое заряженное тело или частицу называют просто зарядом.

На рис. 88 показаны два заряженных тела.

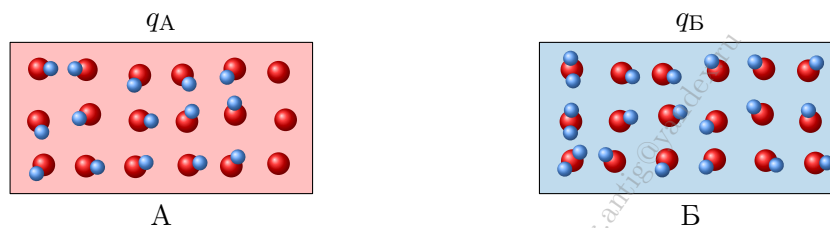


Рис. 88. Заряженные тела

Каждое тело на рис. 88 упрощенно составлено из протонов (красные шары) и электронов (синие шары)². Тело А имеет положительный заряд $q_A > 0$: в нем протоны преобладают над электронами. Наоборот, тело Б несет отрицательный заряд $q_B < 0$: в нем уже электроны преобладают над протонами.

Заряды (заряженные тела) разных знаков притягиваются друг к другу, а заряды одного знака друг от друга отталкиваются. Сказанное иллюстрируется рисунком 89 (красным шарам на нитях сообщены положительные заряды, синим — отрицательные).

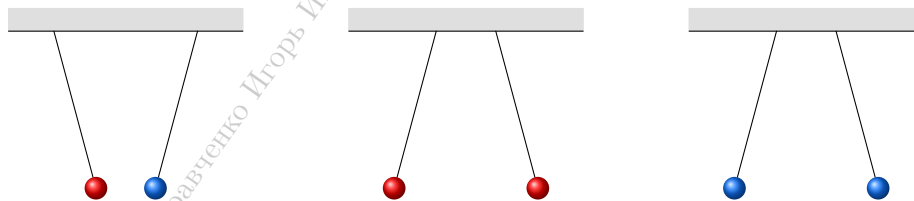


Рис. 89. Притяжение и отталкивание зарядов

Элементарный электрический заряд (e [Кл]) — это величина наименьшего заряда, существующего в природе ($e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Протон и электрон являются частицами с минимальной возможной величиной заряда. Заряд протона равен $q_p \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; заряд электрона равен $q_e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то есть его заряд равен заряду протона со знаком минус.

Заряд тела обусловлен преобладанием в нем протонов или электронов. Если заряд тела $q > 0$, то $q = Nq_p$ (где N — количество избыточных протонов). Если заряд тела $q < 0$, то $q = Nq_e$ (где N — количество избыточных электронов).

²Внимание уделено именно заряженным частицам, находящимся в атомах тела. Разница в размерах шаров на рисунке 88 подчеркивает различие масс соответствующих частиц: масса протона почти в 2000 раз больше массы электрона.

55 Электризация

Электризация — это процесс, в результате которого тело (часть тела) переходит из незаряженного состояния в заряженное. Можно выделить два вида электризации.

1. При электризации **трением** тела приобретают заряды вследствие их трения друг о друга.

Пусть имеется два тела — незаряженные куски пластика П и шерсти Ш (рис. 90, слева).

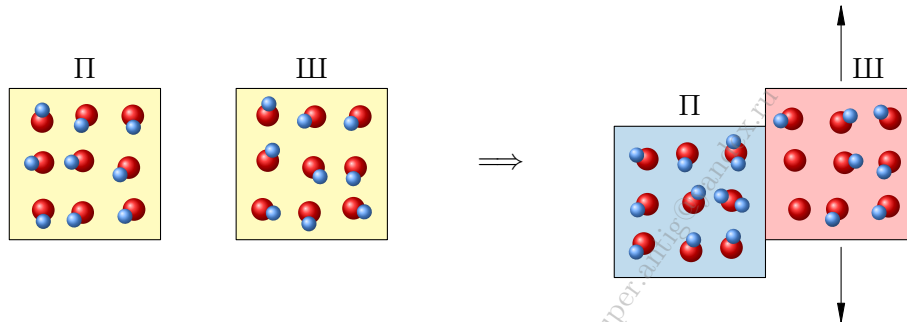


Рис. 90. Электризация трением

Тела П и Ш трут друг о друга (рис. 90, справа). В этом случае некоторые *электроны* (синие шары), находящиеся в контактирующих слоях атомов и сравнительно слабо связанные с ядрами (красные шары) «своего» тела, переходят к ядрам другого тела — электроны стремятся к тем ядрам, с которыми они сильнее связаны. После разведения тела оказываются заряженными: тело П, получившее электроны от тела Ш, несет отрицательный заряд; тело Ш, соответственно, имеет положительный заряд.

2. При электризации **влиянием** части тела заряжаются вследствие перераспределения заряженных частиц внутри тела под действием другого тела. Пусть имеется одно незаряженное металлическое тело М (рис. 91, слева).

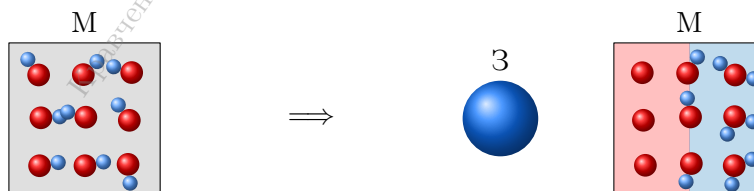


Рис. 91. Электризация влиянием

К телу М подносят слева (не касаясь!), к примеру, отрицательно заряженный шар З и устанавливают его некотором расстоянии от тела М (рис. 91, справа). Шар З отталкивает от себя *свободные* электроны (синие шары) тела М (часть электронов в металле являются свободными — то есть передвигающимися по всему объему тела подобно частицам газа в сосуде). В результате в левой части тела М протоны преобладают над электронами — левая часть тела заряжена положительно. Соответственно, правая часть этого тела от избытка электронов заряжена отрицательно.

56 Электроскоп. Закон сохранения заряда

Электроскоп — это прибор для обнаружения электрических зарядов (рис. 92). Он состоит из металлического *стержня*, пропущенного через пластиковую крышку, закрывающую прозрачный сосуд. К стержню в верхней части обычно припаян металлический *шар*; к нижней части стержня подвешены две подвижные тонкие *пластины* (так называемые листки или лепестки; их делают из металла или бумаги).

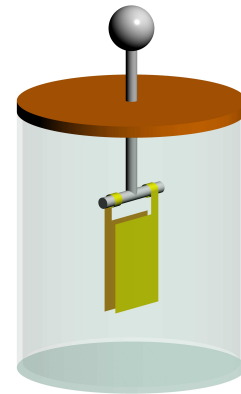


Рис. 92.
Электроскоп

Если к незаряженному электроскопу поднести (не касаясь!), например, положительно заряженную палочку (рис. 93, слева), то в следствие электризации *влиянием* в шаре электроны будут преобладать над протонами — верхняя часть прибора заряжена отрицательно. В пластинах тогда будет избыток протонов — нижняя часть прибора заряжена положительно. Так как оба листка поэтому заряжены положительно, то они, отталкиваясь, расходятся в разные стороны. Аналогично, при поднесении без касания отрицательного заряда к электроскопу (рис. 93, справа) его листки тоже расходятся — листки тогда несут отрицательные заряды.

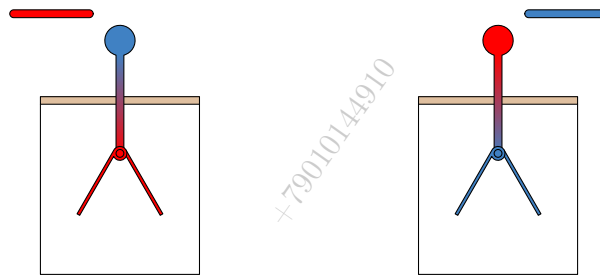


Рис. 93. Опыты с электроскопом

Пусть теперь имеются два заряженных металлических шара (рис. 94, слева).

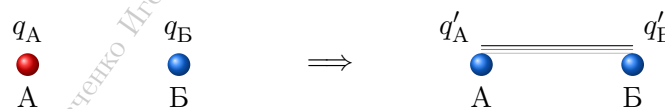


Рис. 94. Опыт с заряженными шарами

Одинаковые шары А и Б (*замкнутая* система тел³) с зарядами q_A и q_B соединяют тонким железным стержнем, который затем убирают (рис. 94, справа). Теперь шары несут заряды q'_A и q'_B . Здесь выполняется следующий закон.

Закон сохранения заряда. Заряд замкнутой системы тел (сумма зарядов тел системы) остается постоянным при любых процессах, происходящих в системе:

$$q_{\text{до}} = q_{\text{после}}, \quad (80)$$

где $q_{\text{до}}$ и $q_{\text{после}}$ — заряды системы тел до и после рассматриваемого процесса.

Так, для опыта с шарами (рис. 94) формулу (80) можно переписать следующим образом: $q_A + q_B = q'_A + q'_B$ (причем $q'_A = q'_B$, так как шары одинаковые).

³В замкнутой системе тела могут обмениваться зарядами только между собой.

57 Закон Кулона. Электрическое поле

Закон Кулона. Два тела с зарядами q_1 и q_2 , расположенные в вакууме на расстоянии r , взаимодействуют друг с другом с **силой Кулона**

$$F_K = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (81)$$

где k — коэффициент пропорциональности (см. справочные таблицы).

На рис. 95 изображены два отрицательных заряда.

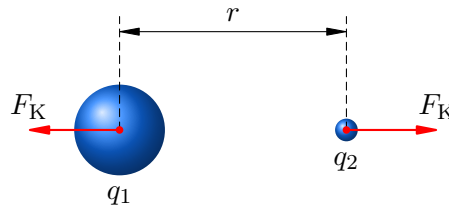


Рис. 95. Взаимодействие двух отрицательных зарядов

Заряды q_1 и q_2 расположены на некотором расстоянии r друг от друга⁴. Как и любые два заряженных тела, эти заряды *взаимодействуют* друг с другом. В данном случае заряд q_1 отталкивается от заряда q_2 с силой F_K , а заряд q_2 — от заряда q_1 с такой же силой F_K .

Сила Кулона зависит от среды, в которой находятся заряды. Часто заряды оказываются помещенными в так называемый *диэлектрик* — вещество, которое не проводит через себя электрические заряды (например, если соединить диэлектриком⁵ два металлических шара, несущих разноименные заряды, то перераспределения зарядов между шарами не будет). В диэлектрике формула (81) приобретает вид:

$$F_K = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2},$$

где ε — *диэлектрическая проницаемость* среды (см. справочные таблицы).

Считают, что взаимодействие неподвижных зарядов осуществляется посредством *электрического поля* — формы материи, окружающей заряженные тела (поле можно представлять себе как невидимое истечение из тела воображаемой жидкости и т. п.). Сказанное иллюстрируется рис. 96: поле положительного заряда А «отталкивает» положительный заряд Б от заряда А (и наоборот)⁶.

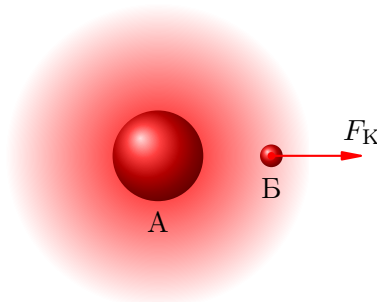


Рис. 96. Действие поля одного заряда на другой

⁴Для однородно заряженных шарообразных тел r есть расстояние между их центрами.

⁵Примерами диэлектриков являются пластик, стекло, масло и т. д.

⁶Скорость передачи взаимодействия между зарядами равна примерно $3 \cdot 10^8$ м/с.

58 Напряженность электрического поля

Любое заряженное тело порождает электрическое поле в пространстве вокруг себя. Во всякой точке этого пространства поле способно вызвать силу, действующую на точечный заряд⁷, помещенный в эту точку. (Далее заряды предполагаются точечными, если не оговорено иное.)

Напряженность $\left(\vec{E} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right]\right)$ — это характеристика силовой способности электрического поля в точке пространства:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_K}{q_{\text{внесен}}}, \quad (82)$$

где $q_{\text{внесен}}$ — заряд, *внесенный (помещенный)* в поле (на него действует поле).

В каждой точке пространства поле характеризуется вектором напряженности $\vec{E}$. Вектор $\vec{E}$ всегда указывает направление силы Кулона, которая бы действовала на *положительный* заряд, помещенный в соответствующую точку.

На рис. 97 показан вектор напряженности $\vec{E}$ поля, создаваемого положительным зарядом, в произвольной точке на расстоянии r от него.

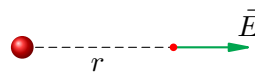


Рис. 97. Напряженность поля положительного заряда

Как видно из рисунка, напряженность поля положительного заряда направлена *от него*. Напряженность же поля, создаваемого отрицательным зарядом, в произвольной точке направлена *к нему*.

Напряженность поля точечного заряда в вакууме находят так (подстановка формулы закона Кулона в формулу (82)):

$$E = k \frac{q_{\text{источника}}}{r^2}, \quad (83)$$

где $q_{\text{источника}}$ — заряд тела, создающего поле.

Особый интерес представляет поле вблизи *заряженной пластины (заряженной плоскости)* с равномерным распределением заряда по ее поверхности. В этом случае пластина создает *однородное поле* — поле, *напряженность которого одинакова в каждой точке рассматриваемой области* ($\vec{E} = \text{const}$).

Заряженную пластину характеризуют *поверхностной плотностью заряда*:

$$\sigma = \frac{q}{S}, \quad (84)$$

где q — заряд участка пластины площадью S .

Напряженность поля пластины в вакууме тогда находят по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}, \quad (85)$$

где ε_0 — *электрическая постоянная* (см. справочные таблицы).

Для среды с диэлектрической проницаемостью ε формулы (82) и (85) переписываются так:

$$E = k \frac{q_{\text{источника}}}{\varepsilon r^2}, \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

⁷Точечный заряд — это заряженное тело, размерами которого можно пренебречь.

59 Линии электрического поля

Наглядно описывать электрическое поле в пространстве принято с помощью **линий электрического поля** — линий, идущих вдоль векторов напряженности поля в различных точках пространства⁸.

На рис. 98 показаны картины линий поля *точечного заряда* для двух случаев: положительный и отрицательный заряд.

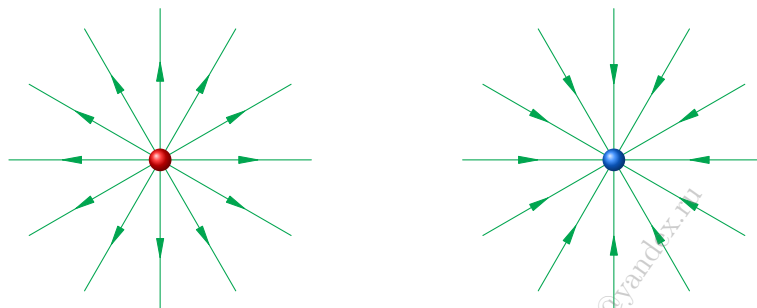


Рис. 98. Линии электрического поля точечного заряда

Линии поля положительного заряда *выходят из него* (рис. 98, слева); наоборот, линии поля отрицательного заряда *входят в него* (рис. 98, справа).

Линии поля указывают направления векторов напряженности в пространстве. Чем больше густота линий, тем больше напряженность в данной области пространства.

На рис. 99 показаны картины линий поля вблизи равномерно заряженной пластины в двух случаях: положительно и отрицательно заряженная пластина.



Рис. 99. Линии электрического поля заряженной пластины

Возле каждой из пластин на рис. 99 поле является *однородным*. Из этого рисунка видно, что *линии однородного поля являются параллельными прямыми одинаковой густоты*.

Линии поля не пересекаются, они всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

Задача. Как меняется напряженность поля с удалением от точечного заряда?

Решение. С увеличением расстояния от заряда, создающего поле, густота линий поля уменьшается (см. рис. 98); значит, с удалением от заряда напряженность уменьшается.

⁸Эти линии называют также *линиями напряженности* или *силовыми линиями*. Всякая линия поля изображается так, что в любой ее точке вектор напряженности направлен по касательной к линии поля.

60 Потенциал

В общем случае электрическое поле⁹ способно разгонять заряд, помещенный в него, — говорят, что заряд в таком поле имеет потенциальную энергию.

Пусть заряд находится в однородном поле (рис. 100).

Положительный заряд вначале покоится и взаимодействует только с электрическим полем. Ясно, что заряд будет «падать» под действием этого поля вдоль его линий на воображаемую поверхность Π (поле может быть направлено в любую сторону, поэтому «падать» заряд может также в любую сторону). Тогда говорят, что заряд q , находящийся в однородном электрическом поле E и способный «упасть» с высоты h под действием этого поля, обладает **потенциальной энергией** (обусловленной взаимодействием заряда с полем):

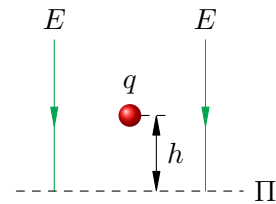


Рис. 100. Заряд в однородном поле

$$W = qEh. \quad (86)$$

Случай заряда в однородном электрическом поле напоминает ситуацию с телом, поднятым над поверхностью планеты. Как известно, потенциальная энергия тела, обусловленная притяжением тела и планеты, равна $E_{\text{п}} = mgh$. Таким образом, в формуле (86) заряд q является аналогом массы m , а напряженность E является аналогом ускорения свободного падения g .

Потенциал (φ [В]) — это энергетическая характеристика электрического поля в точке пространства:

$$\varphi = \frac{W}{q_{\text{внесен}}}, \quad (87)$$

где W — потенциальная энергия заряда $q_{\text{внесен}}$ в электрическом поле.

Потенциал поля точечного заряда в вакууме находят по формуле:

$$\varphi = k \frac{q_{\text{источника}}}{r}, \quad (88)$$

где r — расстояние от заряда $q_{\text{источника}}$ до рассматриваемой точки.

В диэлектрике формула (88) приобретает вид: $\varphi = k \frac{q_{\text{источника}}}{\varepsilon r}$.

Если заряд перемещается в поле из точки 1 в точку 2, то полезно ввести следующую величину. **Напряжение** (U [В]) — это *разность потенциалов*:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_{\text{внесен}}}, \quad (89)$$

где φ_1 и φ_2 — потенциалы поля в начальной и конечной точке траектории, A — работа силы поля, действующей на перемещающийся заряд $q_{\text{внесен}}$ ($A = -\Delta W$).

Важно подчеркнуть, что *разность потенциалов есть потенциал начальной точки минус потенциал конечной точки*.

Следует отметить, что *вектор напряженности поля указывает направление убывания потенциала*. Так, на рис. 100 в точке нахождения заряда q потенциал поля больше, чем потенциал точки поверхности Π под зарядом.

Напряжение в однородном поле равно:

$$U = Ed, \quad (90)$$

где d — расстояние между двумя точками *вдоль линии поля*.

⁹Электрическое поле далее предполагается *постоянным* — то есть *электростатическим*.

61 Эквипотенциальные поверхности

Характеризовать распределение поля в пространстве можно с помощью так называемых эквипотенциальных поверхностей.

Эквипотенциальная поверхность — это поверхность в пространстве, все точки которой имеют *одинаковый потенциал* ($\varphi = \text{const}$).

На рис. 101 изображены эквипотенциальные поверхности поля для двух случаев: точечный заряд и заряженная пластина.



Рис. 101. Эквипотенциальные поверхности поля заряженного тела

Эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются всевозможные сферы с центром в заряде (серые линии на рис. 101, слева). Поле же вблизи равномерно заряженной пластины описывается эквипотенциальными поверхностями, параллельными пластине (серые линии на рис. 101, справа).

Эквипотенциальные поверхности всегда перпендикулярны линиям поля. Этот факт иллюстрируется рисунком 102.

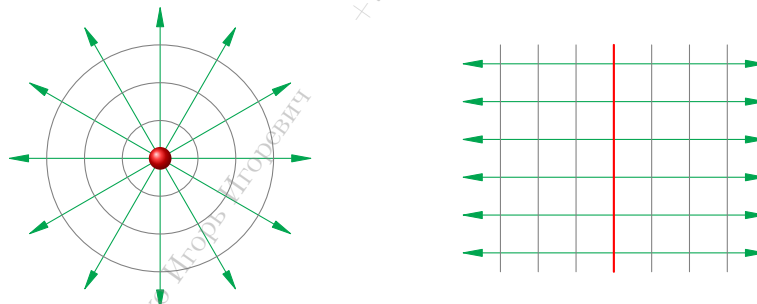


Рис. 102. Перпендикулярность эквипотенциальных поверхностей и линий поля

Задача. На рис. 103 показаны линии однородного электрического поля и две эквипотенциальные поверхности (А и Б). Какая поверхность, А или Б, характеризуется большим значением потенциала?

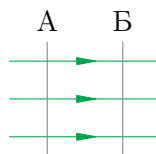


Рис. 103. К задаче

Решение. Как известно, в направлении линии поля потенциал поля убывает. Значит, потенциал поверхности А больше потенциала поверхности Б.

62 Сложение электрических полей

Электрическое поле, создаваемое несколькими зарядами, можно рассматривать как наложение полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности.

Принцип суперпозиции для напряженностей. Если заряды $q_1, q_2, \dots$ по отдельности создают в данной точке поля $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots$, то вместе они создают в данной точке поле

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (91)$$

Этот принцип можно проиллюстрировать для случая двух зарядов (рис. 104).

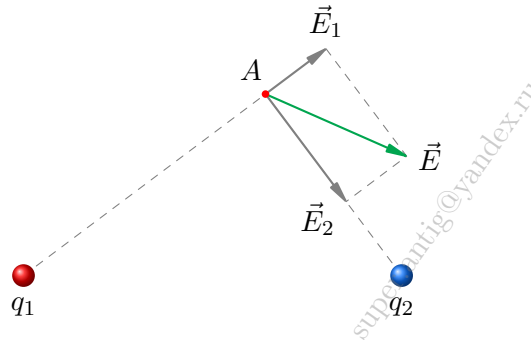


Рис. 104. Принцип суперпозиции для напряженностей

Положительный заряд q_1 создает в точке A поле $\vec{E}_1$, а отрицательный заряд q_2 в этой же точке создает поле $\vec{E}_2$. Согласно вышеуказанному принципу вместе они создают в точке A поле $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рис. 104).

Напряженности полей в общем случае складываются векторно.

Принцип суперпозиции для потенциалов. Если заряды $q_1, q_2, \dots$ по отдельности создают поля с потенциалами $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ в данной точке, то вместе они создают поле, потенциал которого в данной точке равен

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots \quad (92)$$

Пусть снова имеется система двух зарядов (рис. 105).

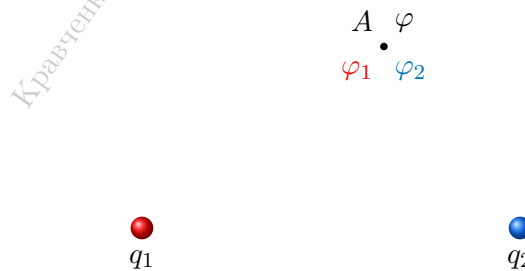


Рис. 105. Принцип суперпозиции для потенциалов

Положительный заряд q_1 создает поле с потенциалом φ_1 в точке A , а отрицательный заряд q_2 — поле с потенциалом φ_2 в этой же точке. Тогда вместе они создают поле, потенциал которого в точке A равен $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ (рис. 105).

Следует отметить, что *потенциалу поля положительного заряда приписывают знак плюс, потенциалу поля отрицательного заряда — знак минус*. Так, в ситуации на рис. 105 это правило дает: $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_2 < 0$.

63 Проводник

Проводник — это тело, способное проводить через себя электрические заряды. Например, если соединить проводником металлическое *заряженное* тело А и металлическое *незаряженное* тело Б, то заряд тела А перераспределится между этими двумя телами.

Проводники характеризуются наличием *свободных зарядов* — заряженных частиц, способных перемещаться по всему объему тела (эти частицы не имеют постоянного места пребывания в теле).

Выделяют два основных вида проводников.

1. В **металле** свободными зарядами являются *свободные электроны*. Эти электроны слабо связаны с атомами вещества и «путешествуют» по всему пространству металла (рис. 106).

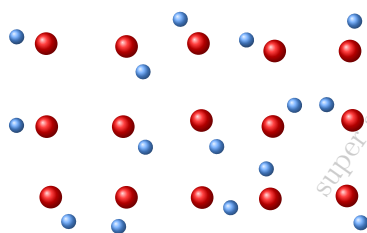


Рис. 106. Модель металла

Свободные электроны (синие шары), отделившиеся от своих атомов (красные шары), «летают» между ними по всему металлу. Говорят, что свободные электроны образуют *электронный газ*.

Строго говоря, свободные электроны в металле двигаются между ионами. *Ион* — это заряженная частица, в которую превратился атом (группа атомов), отдавший или получивший электрон (или несколько электронов). Ион, в котором протоны преобладают над электронами, называют *катионом* (он заряжен положительно); ион, в котором имеется избыточное количество электронов, называют *анионом* (он несет отрицательный заряд).

2. В **электролите** свободными зарядами являются ионы. Электролитами обычно называют растворы (или расплавы) солей, кислот и оснований. В таких растворах «свободно плавают» ионы (рис. 107).

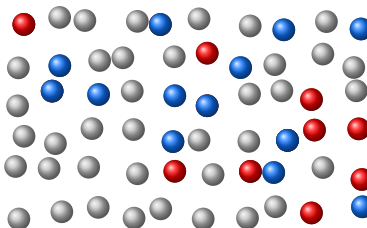


Рис. 107. Модель электролита (раствор)

Например, соль NaCl в воде распадается на положительные ионы Na^+ (красные шары) и отрицательные ионы Cl^- (синие шары), беспорядочно двигающиеся в растворе наряду с молекулами воды H_2O (серые шары).

64 Проводник в электрическом поле

Проводники (заряженные или незаряженные), помещенные в постоянное электрическое поле (электростатическое поле), обладают рядом общих свойств.

1. *Напряженность поля внутри проводника везде равна нулю.*

Пусть незаряженный железный куб помещен в однородное поле (рис. 108).

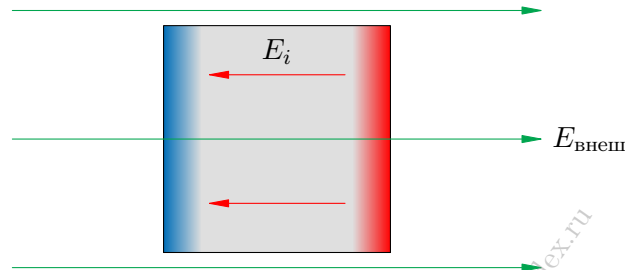


Рис. 108. Проводник в электрическом поле

Действие внешнего поля $E_{\text{внеш}}$ ведет к избытку свободных электронов в левой части куба. На левой поверхности куба *наводятся* (индуцируются) избыточные отрицательные заряды (синяя область); на правой поверхности куба тогда имеются избыточные положительные заряды (красная область). Наведенные на поверхностях проводника заряды создают собственное поле E_i , направленное *против* внешнего поля $E_{\text{внеш}}$ (рис. 108).

Во всей области внутри куба поле E_i полностью компенсирует внешнее поле $E_{\text{внеш}}$: результирующее (суммарное) поле E внутри проводника оказывается равным $E = E_{\text{внеш}} - E_i = 0$.

2. *Избыточные заряды проводника располагаются лишь на его поверхности. Заряд любой области внутри проводника равен нулю.*
3. *Линии электрического поля входят в проводник (или выходят из него) перпендикулярно его поверхности.*

На рис. 109 показана примерная картина линий результирующего поля для рассмотренного примера с проводящим кубом.

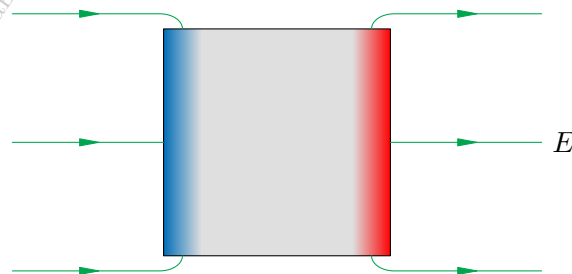


Рис. 109. Линии поля вокруг проводника

Из рисунка 109 видно, что любая линия поля вблизи куба направлена точно под прямым углом к его поверхности.

4. *Все точки проводника имеют одинаковый потенциал.*

Итак, между любыми двумя точками проводника напряжение равно нулю.

65 Электрическое поле проводящего шара

Пусть имеется металлический заряженный шар (сфера) в вакууме (рис. 110).

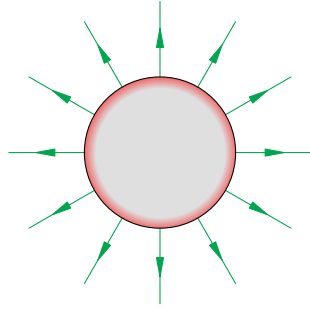


Рис. 110. Линии поля положительно заряженного шара

Шар радиуса R имеет заряд q . Интерес представляют напряженность и потенциал поля в любой точке пространства на расстоянии r от центра шара.

- **Напряженность.** Внутри шара напряженность поля равна нулю (линии поля в шаре отсутствуют — см. рис. 110):

$$E = 0, \quad \text{если } r < R. \quad (93)$$

Вне шара напряженность оказывается такой же, как если бы заряд шара был сосредоточен в его центре:

$$E = k \frac{q}{r^2}, \quad \text{если } r > R. \quad (94)$$

- **Потенциал.** Внутри шара потенциал везде одинаков и равен потенциалу точек поверхности шара:

$$\varphi = k \frac{q}{R}, \quad \text{если } r < R. \quad (95)$$

Потенциал поля вне шара равен потенциалу поля заряда шара, сосредоточенного в его центре:

$$\varphi = k \frac{q}{r}, \quad \text{если } r > R. \quad (96)$$

На рис. 111 показаны графики зависимостей напряженности и потенциала поля рассмотренного шара от расстояния до его центра.

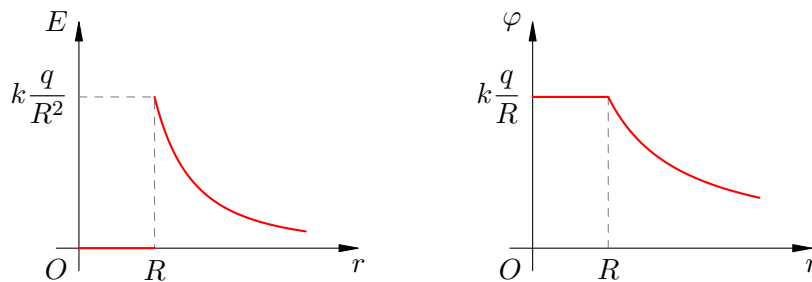


Рис. 111. Напряженность и потенциал поля заряженного шара

Если поле шара создается в диэлектрике, то в формулах (94)–(96) знаменатель домножается на величину ε (диэлектрическая проницаемость).

66 Диэлектрик

Диэлектрик — это тело, *не* способное проводить через себя электрические заряды. Например, если металлическое *заряженное* тело А соединить диэлектриком с металлическим *незаряженным* телом Б, то заряд тела А *не* перераспределится между этими двумя телами.

В диэлектрике (в отличие от проводника) *нет свободных зарядов*. Заряженные частицы (электроны и ядра) в диэлектрике являются *связанными* — электроны при этом могут перемещаться лишь внутри молекулы тела (рис. 112).

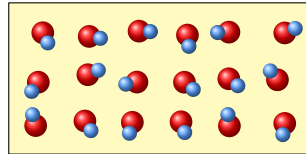


Рис. 112. Диэлектрик

Соответствующие электроны (синие шары) и ядра (красные шары) сцеплены друг с другом (если диэлектрик жидкий или газообразный, то его молекулы «носят с собой» свои ядра и электроны)¹⁰.

Пусть диэлектрик помещен в однородное электрическое поле (рис. 113).

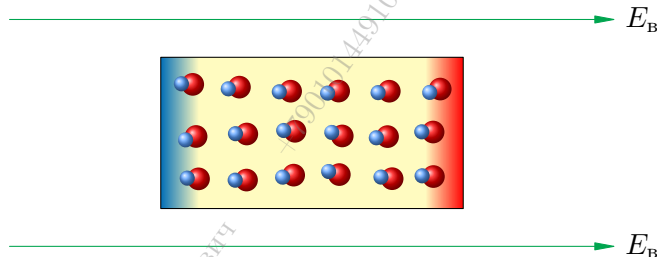


Рис. 113. Диэлектрик в электрическом поле

Внешнее поле E_v «разворачивает» молекулы диэлектрика так, что на одной поверхности тела (левая поверхность — синяя область) оказываются преимущественно отрицательные заряды — электроны, а на другой поверхности (правая поверхность — красная область) оказываются в основном положительные заряды — ядра. Это происходит вследствие действия силы Кулона на электроны со стороны поля: на рис. 113 эта сила «тянет» электроны влево.

Избыточные *наведенные* заряды на поверхностях диэлектрика (см. рис. 113) создают внутри тела собственное поле E_i , направленное *против* внешнего поля E_v . Поле E_i ослабляет поле E_v внутри диэлектрика (при этом $E_i < E_v$). Результирующее (суммарное) поле E внутри тела равно $E = E_v - E_i > 0$.

Диэлектрическая проницаемость (ε) — это характеристика тела, показывающая во сколько раз уменьшается поле в нем по сравнению с вакуумом:

$$\varepsilon = \frac{E_v}{E}, \quad (97)$$

где E_v — поле в вакууме, E — поле в данном теле ($E < E_v$).

¹⁰В особых случаях электрон может «оторваться» от своего ядра — так происходит, например, при электризации диэлектрика трением.

67 Конденсатор

Конденсатор — это устройство для накопления электрических зарядов. На рис. 114 показана конструкция *плоского конденсатора*.

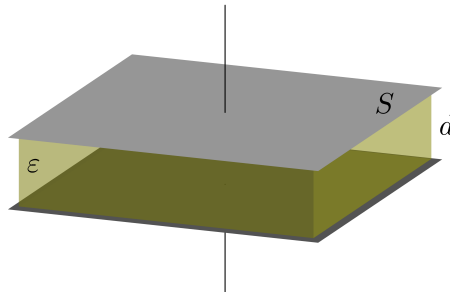


Рис. 114. Плоский конденсатор

Простейший плоский конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин (*обкладки*) площадью S каждая, расположенных на малом расстоянии d друг от друга и разделенных слоем диэлектрика¹¹ с диэлектрической проницаемостью ε . Конденсатор также имеет *выводы* (черные линии на рис. 114) для его соединения с другими устройствами.

Обычно в заряженном конденсаторе (то есть накопившем заряды на своих обкладках) одна из пластин конденсатора несет заряд $+q$, а другая — заряд $-q$. Под *зарядом конденсатора* понимают заряд его *положительной* обкладки.

Емкость (C [Ф]) — это характеристика конденсатора, показывающая его способность накапливать заряд:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (98)$$

где q — заряд конденсатора, U — напряжение между пластинами.

Емкость численно равна заряду конденсатора при напряжении 1 В между его обкладками.

Емкость конденсатора зависит от его размеров и диэлектрика в нем:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (99)$$

где ε_0 — электрическая постоянная (см. справочные таблицы).

Энергия конденсатора рассчитывается по формуле:

$$W_C = \frac{CU^2}{2}. \quad (100)$$

Задача. Плоский конденсатор состоит из двух параллельно расположенных в воздухе пластинок, каждая площадью 100 см^2 , расстояние между ними $0,2 \text{ см}$. Определите емкость конденсатора.

Решение. Между пластинами воздух: $\varepsilon = 1$. Электрическая постоянная $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$. Тогда:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 100 \cdot 10^{-4}}{0,2 \cdot 10^{-2}} = 4,425 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}.$$

¹¹Также между обкладками может быть *вакуум* ($\varepsilon = 1$). Диэлектрическая проницаемость *воздуха* обычно также считается равной единице.

68 Соединения конденсаторов

Конденсаторы соединяют друг с другом двумя способами.

1. **Последовательное соединение:** конец каждого конденсатора соединяется с началом следующего за ним конденсатора (рис. 115, слева). Провод¹², соединяющий конец одного конденсатора с началом другого, не соединяется с каким-то еще устройством.

Вот свойства последовательного соединения.

- Заряд блока конденсаторов¹³ и заряды конденсаторов равны:

$$q = q_1 = q_2 = \dots \quad (101)$$

- Напряжение между концами блока конденсаторов равно сумме напряжений на каждом конденсаторе:

$$U = U_1 + U_2 + \dots \quad (102)$$

- Емкость блока конденсаторов находят из соотношения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (103)$$

2. **Параллельное соединение:** начала конденсаторов соединяются между собой, концы конденсаторов соединяются также между собой (рис. 115, справа). От начала одного из конденсаторов по проводам возможно мысленно перейти к началу любого другого из конденсаторов, не встретив никакого другого устройство (такие «переходы» также возможны между концами конденсаторов).

Вот свойства параллельного соединения.

- Напряжение блока конденсаторов и их напряжения равны:

$$U = U_1 = U_2 = \dots \quad (104)$$

- Заряд блока конденсаторов равен сумме зарядов на каждом из них:

$$q = q_1 + q_2 + \dots \quad (105)$$

- Емкость блока конденсаторов находят так:

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (106)$$

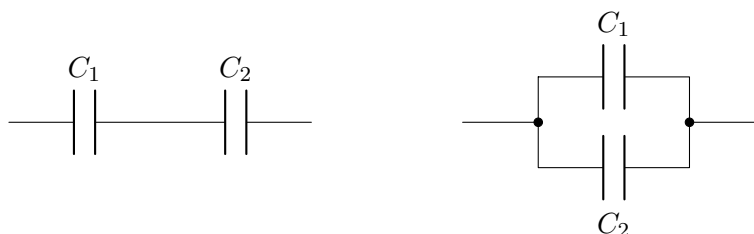


Рис. 115. Последовательное и параллельное соединение двух конденсаторов

¹²Провод на электрических схемах изображается просто линией.

¹³Блок конденсаторов — это группа соединенных между собой конденсаторов (блок имеет два вывода, или конца). Такой блок можно рассматривать как один сложный конденсатор.

Глава 9

Постоянный ток

69 Электрический ток

Электрический ток — это направленное движение заряженных частиц. На рис. 116 изображен ток в теле.

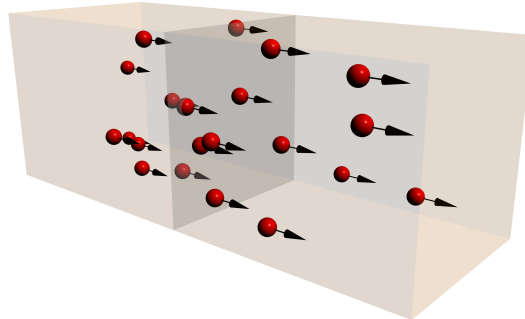


Рис. 116. Электрический ток

Положительные заряды (красные шары) упорядоченно двигаются из одной области тела (светло-оранжевая фигура) в другую. Через *поперечное сечение* (серая плоскость) тела при протекании тока переносится заряд (равный сумме зарядов заряженных частиц, прошедших поперечное сечение за данное время). *Происходит перенос заряда из одной области пространства в другую.*

Сила тока (I [A]) — это характеристика тока, показывающая быстроту¹ переноса заряда:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (107)$$

где q — заряд, перенесенный через поперечное сечение за время t .

Ток называют *постоянным*, если его сила тока остается постоянной.

Обычно скорость направленного движения заряженных частиц, образующих ток, сравнительно невелика (доли миллиметра в секунду).

Вот **связь силы тока со скоростью** направленного движения заряженных частиц:

$$I = nevS, \quad (108)$$

где n — концентрация частиц, e — заряд одной частицы, v — скорость направленного движения частиц, S — площадь поперечного сечения.

Для возникновения тока необходимо выполнение следующих условий.

1. *Наличие свободных заряженных частиц.* Среды, содержащие такие частицы, называют *проводниками*.
2. *Наличие электрического поля внутри проводника.* Иначе говоря, между концами проводника нужно обеспечить напряжение.

Если между концами проводника создают *постоянное напряжение*, то в проводнике устанавливается *постоянный ток*. Постоянное напряжение поддерживают с помощью *источника тока* (например, батарейки).

Ток в *металлах* обусловлен движением свободных *электронов*.

¹Более точно, сила тока есть скорость переноса заряда ($I = \Delta q / \Delta t$) или производная заряда по времени ($I = q'$). Важно заметить, что сила тока *не* есть скорость упорядоченного движения самих частиц, образующих ток.

70 Сопротивление

Сопротивление (R [Ом]) — это характеристика проводника, показывающая его способность препятствовать прохождению тока через него. Например, если проводник А подключить к батарейке, а затем (отсоединив проводник А от батарейки) проводник В подключить к этой же батарейке, то сопротивление будет *больше* у того проводника, в котором *сила тока* была *меньше*.

Пусть имеются три медных провода (рис. 117).

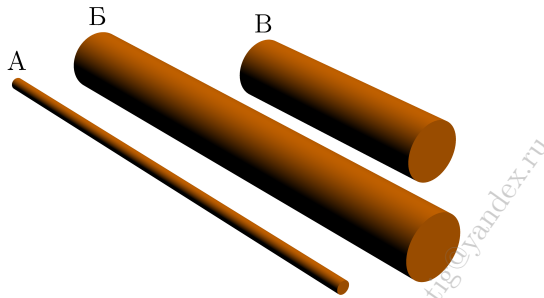


Рис. 117. Три проводника

Провода А, В и В имеют сопротивления R_A , R_B и R_V . Опыт показывает, что их сопротивления связаны так: $R_A > R_B > R_V$. Сравнивать сопротивления тел из одинакового материала можно, используя следующую аналогию: чем «проще» протечь воображаемой жидкости через тело, представляемое как «труба» (то есть чем шире и короче «труба»), тем меньше сопротивление тела.

Сопротивление проводника вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho_z l}{S}, \quad (109)$$

где ρ_z — *удельное сопротивление* вещества (см. справочные таблицы), l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения проводника².

Сопротивление прохождению тока, например, в металлах объясняют тем, что свободные электроны, совершая направленное движение, сталкиваются с ионами металла, колеблющимися вблизи своих положений равновесия (рис. 118).

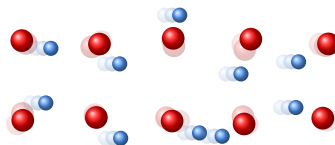


Рис. 118. Направленное движение электронов между ионами металла

Проводник, обладающий сопротивлением, называют *резистором* и изображают на схемах следующим образом (рис. 119).

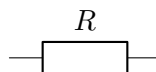


Рис. 119. Резистор

²Или площадь поперечной грани (торца) тела, из которой предполагается «вытекает» ток.

71 Закон Ома

Закон Ома. Сила тока через проводник³ прямо пропорциональна напряжению на этом проводнике и обратно пропорциональна его сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (110)$$

Разобраться с законом Ома помогает аналогия с жидкостью (рис. 120).

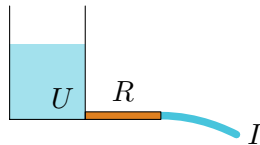


Рис. 120. Аналогия к закону Ома

В сосуде с жидкостью имеется у дна отверстие, в которое вставлена трубка. Давление (аналог напряжения U), создаваемое жидкостью у отверстия, вызывает протекание жидкости по трубке (аналог резистора сопротивлением R). В результате из трубки выливается жидкость с некоторой быстротой вытекания (аналог силы тока I).

Меняя параметры системы на рис. 120, то есть давление (U) у дна и размер отверстия и трубки (R), можно получать различную быстроту вытекания (I) жидкости и убеждаться в справедливости закона Ома.

Закон Ома справедлив для металлов и электролитов. Зависимость силы тока от напряжения (*вольт-амперная характеристика* или *ВАХ*), например, медного провода изображается прямой линией на IU -диаграмме (рис. 121).

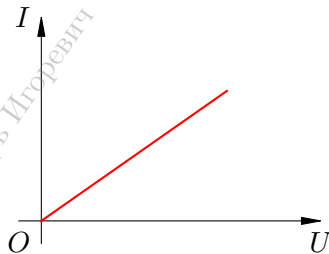


Рис. 121. ВАХ металлического проводника

Задача. Каким должно быть напряжение на концах участка цепи, чтобы сила тока в проводнике равнялась 1 А, если при напряжении 3 В сила тока в этом же проводнике равна 0,5 А.

Решение. Если нет специальных оговорок, то сопротивление R проводника есть величина постоянная. Пусть $U_1 = 3$ В, $I_1 = 0,5$ А и $I_2 = 1$ А. Тогда:

$$R = \frac{U_1}{I_1} = \frac{3}{0,5} = 6 \text{ Ом.}$$

Искомое напряжение равно:

$$U_2 = I_2 R = 1 \cdot 6 = 6 \text{ В.}$$

³Проводником также считается система соединенных между собой проводников (*блок проводников*); предполагается, что такой блок, как и один проводник, имеет два вывода (конца).

72 Соединения проводников

Проводники соединяют друг с другом двумя способами.

1. **Последовательное соединение:** конец каждого проводника соединяется с началом следующего за ним проводника (рис. 122, слева). Провод⁴, соединяющий конец одного проводника с началом другого, не соединяется с каким-то еще устройством.

Вот свойства последовательного соединения.

- Сила тока (кратко — ток) через блок проводников⁵ и токи через проводники равны:

$$I = I_1 = I_2 = \dots \quad (111)$$

- Напряжение между концами блока проводников равно сумме напряжений на каждом проводнике:

$$U = U_1 + U_2 + \dots \quad (112)$$

- Сопротивление блока проводников находят так:

$$R = R_1 + R_2 + \dots \quad (113)$$

2. **Параллельное соединение:** начала проводников соединяются между собой, концы проводников соединяются также между собой (рис. 122, справа). От начала одного из проводников по проводам возможно мысленно перейти к началу любого другого из проводников, не встретив никакого другого устройство (такие «переходы» также возможны между концами проводников).

Вот свойства параллельного соединения.

- Напряжение на блоке проводников и напряжения на них равны:

$$U = U_1 = U_2 = \dots \quad (114)$$

- Ток через блок проводников равен сумме токов через каждый из них:

$$I = I_1 + I_2 + \dots \quad (115)$$

- Сопротивление блока проводников находят из соотношения:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (116)$$

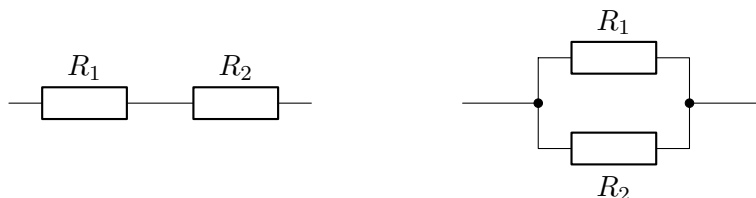


Рис. 122. Последовательное и параллельное соединение двух проводников

⁴Провод на электрических схемах изображается просто линией.

⁵Блок проводников — это группа соединенных между собой проводников (блок имеет два вывода, или конца). Такой блок можно рассматривать как один сложный проводник.

73 Работа тока. Закон Джоуля—Ленца

Электрический ток несет с собой *энергию* (аналогия: поток жидкости, несущий механическую энергию). Эта энергия (*электроэнергия*) возникает за счет работы электрического поля, которое «гонит» заряды тока по проводнику.

Работа тока (A [Дж]) — это работа электрического поля по передвижению зарядов тока в проводнике:

$$A = UIt, \quad (117)$$

где U и I — напряжение и ток проводника, t — время протекания тока.

Мощность тока (P [Вт]) — это быстрота совершения работы тока:

$$P = UI. \quad (118)$$

Электроэнергия, потребленная прибором, может быть рассчитана так:

$$W = Pt. \quad (119)$$

Практически всегда возникает необходимость преобразовать электроэнергию в другой вид энергии. В связи с этим широкое применение нашли следующие устройства.

- *Электронагреватель* преобразует электроэнергию в теплоту.

КПД электронагревателя равен:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{W_{\text{з}}}, \quad (120)$$

где $Q_{\text{п}}$ — полезное тепло, $W_{\text{з}}$ — затраченная электроэнергия.

- *Электродвигатель* преобразует электроэнергию в работу.

КПД электродвигателя равен:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{W_{\text{з}}}, \quad (121)$$

где $A_{\text{п}}$ — полезная работа, $W_{\text{з}}$ — затраченная электроэнергия.

Пусть к батарейке подключен стальной провод (рис. 123).

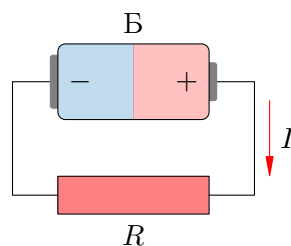


Рис. 123. Опыт с батарейкой и проводом

Батарейка Б вызывает протекание тока⁶ I в проводе с сопротивлением R . Опыт показывает, что за время t провод *нагреется* — в нем выделится *тепло*, которое можно вычислить по **закону Джоуля—Ленца**:

$$Q = I^2 Rt. \quad (122)$$

⁶Направлением тока принято считать направление движения *положительных* зарядов (в данном случае они как бы вытекают из «плюса» батарейки и втекают в ее «минус».)

74 Источник тока

Как известно, для того, чтобы через проводник (резистор) протекал ток, к нему (к его концам) нужно, как говорят, приложить напряжение. Напряжение к резистору подводят от *источника тока* (далее для краткости — источник).

В опытах в качестве источника часто используют батарейку (рис. 124, слева).

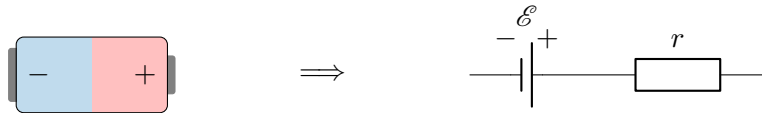


Рис. 124. Источник тока

Любой источник имеет две важные характеристики.

- **Внутреннее сопротивление** (r [Ом]) — это сопротивление току, оказываемое со стороны источника.

Внутреннее сопротивление источника обусловлено наличием в нем проводящих частей, по которым он «перекачивает» ток через себя.

- **ЭДС (электродвижущая сила)** ($\mathcal{E}$ [В]) — это характеристика источника, показывающая его способность вызывать ток:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ист}}}{q}, \quad (123)$$

где $A_{\text{ист}}$ — работа источника (работа сторонней силы), q — заряд, перемещенный через источник.

Чем больше ЭДС источника, тем больший ток (силу тока) он может вызывать в данном проводнике при прочих равных условиях.

Сторонней силой называют силу, «протаскивающую» заряды тока внутри источника (она имеет неэлектрическое происхождение).

Обозначение источника на электрической схеме показано на рис. 124 (справа). Из рисунка видно, что *реальный источник* — это как бы блок, состоящий из двух элементов — ЭДС и внутреннего сопротивления (эти элементы нельзя отделить друг от друга).

Источник тока называют также *источником ЭДС*. Источник с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением ($r \rightarrow 0$) называют *идеальным*.

Знаками «+» и «-» на рис. 124 обозначаются заряженные части источника (ЭДС): на одном *выводе* (конце) находится избыток положительных зарядов, на другом — избыток отрицательных.

Важно обратить внимание на то, что расположения знаков у батарейки и ее ЭДС всегда *согласованы*: например, на рис. 124 и у батарейки, и у ЭДС знак «+» стоит справа, а знак «-» стоит слева. Положительный «вывод» ЭДС изображают длинной чертой, отрицательный — короткой (см. рис. 124, справа).

К источнику могут подключаться самые различные приборы (*приемники*, или *потребители*): нагреватели, лампы, электродвигатели и т. п. В таком случае действует следующее соглашение: *ток через приемник течет в направлении от «плюса» источника к его «минусу»*. То есть ток «вытекает» из источника с его «+»-вывода, протекает по приемнику и «втекает» обратно в источник со стороны его «-»-вывода.

75 Закон Ома для полной цепи

Пусть источник тока (кратко — источник) подключен к резистору (рис. 125).

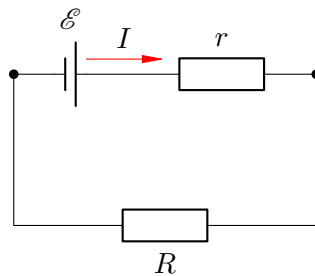


Рис. 125. Полная цепь

Источник с ЭДС $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r и резистор R (его сопротивление называют *внешним*⁷) образуют *полную цепь*. Считается, что в полной цепи ток I «вытекает» из длинной черты (положительный «вывод» ЭДС) и, соответственно, «втекает» в короткую черту (отрицательный «вывод» ЭДС).

В такой цепи справедлив **закон Ома для полной цепи**:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (124)$$

Коротким замыканием называют соединение выводов источника проводом пренебрежимо малого сопротивления (внешнее сопротивление много меньше внутреннего: $R \ll r$). Ток, протекающий в цепи в таком случае, называется *током короткого замыкания* (или *током КЗ*). Короткое замыкание обычно является *аварийным* режимом работы цепи и может привести к выходу из строя элементов цепи из-за очень большой силы тока КЗ.

При расчете цепи ее можно мысленно делить на части — *участки цепи*. Предполагается, что выделенный участок имеет два вывода. Например, в схеме, показанной на рис. 125, можно рассмотреть два участка между выделенными точками: 1) участок с ЭДС $\mathcal{E}$ и резистором r ; 2) участок с резистором R .

Интересно отметить, что при $R = r$ в цепи с заданными $\mathcal{E}$ и r достигается *максимальная* мощность тока на внешнем резисторе.

Задача. Сила тока в цепи батареи, ЭДС которой 30 В, равна 3 А. Напряжение на зажимах батареи 18 В. Определите внутреннее сопротивление цепи.

Решение. Зажимы батареи на схеме полной цепи (рис. 125) обозначены точками. Следовательно, напряжение на зажимах батареи есть напряжение между этими точками. Из схемы видно, что к этим же точкам присоединен и внешний резистор R , поэтому его напряжение равно напряжению на зажимах батареи. Сопротивление R тогда можно найти по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{18}{3} = 6 \text{ Ом}.$$

Теперь внутреннее сопротивление можно найти из формулы (124):

$$r = \frac{\mathcal{E} - IR}{I} = \frac{30 - 3 \cdot 6}{3} = 4 \text{ Ом}.$$

⁷В общем случае внешним сопротивлением называют сопротивление блока резисторов, подключенного к источнику.

76 Полупроводник

Полупроводник — это тело, которое по своей способности проводить ток занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Удельное сопротивление полупроводника убывает с ростом температуры: при довольно *низкой температуре* полупроводник ведет себя как *диэлектрик*, а при *высокой* — как достаточно хороший *проводник*.

На рис. 126 представлена структура полупроводника на примере кремния (Si).

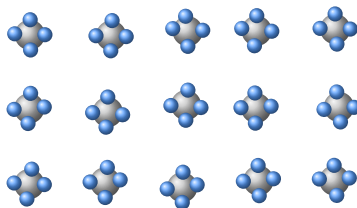


Рис. 126. Структура полупроводника

При довольно низкой температуре каждый атом (группа из одного серого и четырех прикрепленных к нему синих шаров) кремния связан с четырьмя соседними атомами с помощью своих четырех *валентных электронов*⁸ (синие шары). Валентные электроны могут переходить («перескакивать») от одного атома к другому — атомы могут обмениваться своими валентными электронами (переходы этих электронов носят непредсказуемый характер).

При нагревании полупроводника тепловые колебания его частиц становятся более интенсивными, и некоторые валентные электроны могут «оторваться» от своих атомов (рис. 127).

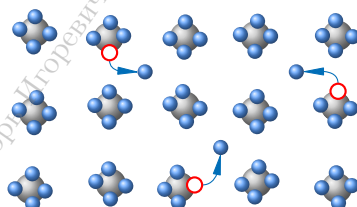


Рис. 127. Появление свободных электронов (и дырок)

Электроны, покинувшие свои атомы, становятся *свободными* (их называют *электронами проводимости*). Покидание атома электроном сопровождается образованием вакантного места с недостающим электроном — *дырки* (красная окружность). Дырку можно рассматривать как *положительный заряд*.

Если подключить полупроводник (со свободными электронами и дырками) к источнику тока, то в полупроводнике появится ток, вызванный упорядоченным движением свободных электронов и дырок: свободные электроны перемещаются к «плюсу» источника, а дырки — к «минусу» источника.

В рассмотренном примере свободные электроны и дырки образуются за счет «отрывов» валентных электронов от атомов, из которых построен *весь* (чистый) полупроводник. Это — полупроводник с *собственной проводимостью*⁹.

⁸Валентными называют электроны, наиболее удаленные от ядра атома.

⁹Проводимость — это способность тела проводить ток.

77 Полупроводники p - и n -типа

Проводимость чистого полупроводника может быть значительно увеличена в результате введения *примеси* из атомов другого химического элемента.

На рис. 128 показана структура кремния с примесным атомом индия (In).

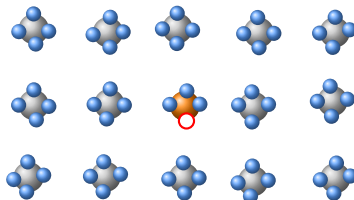


Рис. 128. Полупроводник p -типа

Атом индия (группа из одного оранжевого шара и трех прикрепленных к нему синих) имеет три валентных электрона (синие шары), с помощью которых этот атом «связывается» с тремя соседними атомами кремния (группа из одного серого шара и четырех прикрепленных к нему синих). Для связи с четвертым атомом кремния у атома индия не хватает электрона: здесь образуется дырка (красная окружность). Не входя в подробности, можно сказать, что каждый примесный атом индия порождает подвижную дырку (без образования свободного электрона), способную «путешествовать» по всему полупроводнику.

Примесь, атомы которой создают дырки без появления равного количества свободных электронов, называют *акцепторной*. Полупроводник с акцепторной примесью называется *полупроводником p -типа* (или *p -полупроводником*). В p -полупроводнике электрический ток обеспечивается в основном дырками — дырок намного больше, чем свободных электронов (дырки — *основные носители* заряда, свободные электроны — *неосновные носители* заряда).

Пусть теперь примесь мышьяка (As) внесена в кремний (рис. 129).

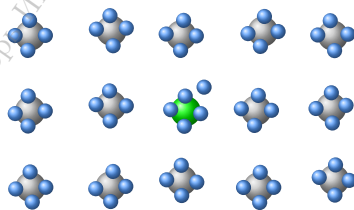


Рис. 129. Полупроводник n -типа

Атом мышьяка (группа из одного зеленого шара и пяти расположенных возле него синих) имеет пять валентных электронов. С помощью четырех из них этот атом «связывается» с четырьмя соседними атомами кремния. Пятый валентный электрон мышьяка, не формирующий связь с каким-либо атомом кремния, становится свободным. Каждый примесный атом мышьяка дает свободный электрон (без образования подвижной дырки).

Примесь, атомы которой дают свободные электроны без появления равного количества подвижных дырок, называют *донорной*. Полупроводник с донорной примесью — это *полупроводник n -типа* (или *n -полупроводник*). В n -полупроводнике свободных электронов намного больше, чем дырок (свободные электроны — *основные носители* заряда, дырки — *неосновные носители* заряда).

78 p – n -Переход

p – n -Переход — это место соприкосновения p - и n -полупроводников (рис. 130).

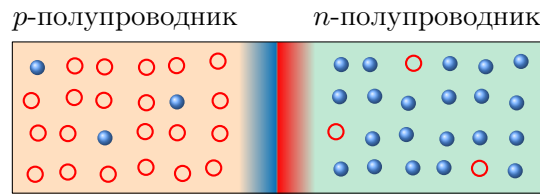


Рис. 130. p – n -Переход

При образовании контакта между p - и n -полупроводниками свободные электроны (синие шары), совершая тепловое движение, проникают из n -области в p -область, а дырки (красные окружности) — из p -области в n -область (свободные электроны и дырки стремятся «смешаться» друг с другом, подобно тому как стремятся смешаться две жидкости, налитые в один сосуд).

В результате этого в пограничном слое n -полупроводника имеется недостаток электронов — этот слой оказывается заряженным *положительно* (красная область). Пограничный слой же p -полупроводника становится заряженным *отрицательно* (синяя область) вследствие ухода из него дырок и прихода в него электронов. Заряженные пограничные слои образуют так называемый *запирающий слой* (красно-синяя область): граница p – n -структуры находится как бы в «конденсаторе», внутреннее поле которого (запирающее поле) препятствует дальнейшему переходу свободных электронов и дырок через границу.

Пусть p – n -структура подключена к источнику тока так, что «плюс» источника подан на p -полупроводник, а «минус» — на n -полупроводник (рис. 131).

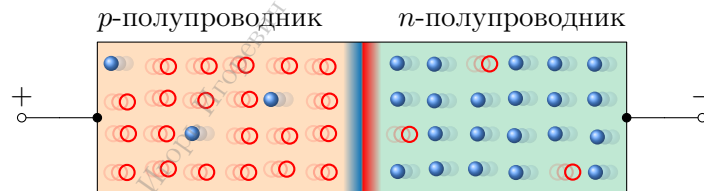


Рис. 131. Прямое включение p – n -перехода

Внешнее электрическое поле, создаваемое заряженными выводами источника («+» и «-») внутри структуры, направлено *против* запирающего поля: на рис. 131 внешнее поле вблизи границы направлено вправо, а запирающее поле — влево. Переходы основных носителей заряда (свободных электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике) через границу облегчаются: внешнее поле «помогает» свободным электронам и дыркам преодолеть запирающий слой (они массово перемещаются через границу контакта: свободные электроны устремляются к «плюсу» источника, а дырки — к его «минусу»). В этом случае сопротивление p – n -перехода мало, и *ток через переход оказывается большим* (источник практически замкнут *накоротко*).

Показанный на рис. 131 способ подключения p – n -перехода к источнику называется *прямым включением* p – n -перехода. При *обратном включении* p – n -переход подключается наоборот: p -область соединяется с «минусом» источника, n -область — с «плюсом» (тогда *ток через переход пренебрежимо мал*).

Глава 10

Магнитное поле

79 Магнит. Магнитное поле

Магнит — это тело, способное притягивать железные предметы¹. На рис. 132 изображен магнит, притягивающий два стальных тела.

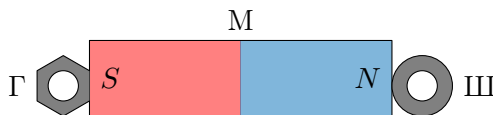


Рис. 132. Магнит, притягивающий стальные предметы

Магнит М притягивает гайку Г и шайбу Ш. У всякого магнита есть *два* места, вблизи которых он действует на тела наиболее сильно; это так называемые *полюса* магнита. *Северный полюс* магнита обозначается синим цветом и буквой *N*, *южный полюс* — красным цветом и буквой *S* (рис. 132). (Магнит, показанный на рис. 132, называют *полосовым*; если подвесить такой магнит на нити за его середину, позволяя ему свободно вращаться, то северный *N*-полюс магнита всегда будет поворачиваться в направлении Северного географического полюса Земли и указывать на географический север: отсюда и возникло название «северный полюс» магнита.)

Разноименные магнитные полюсы притягиваются друг к другу, а одноименные — друг от друга отталкиваются (рис. 133).

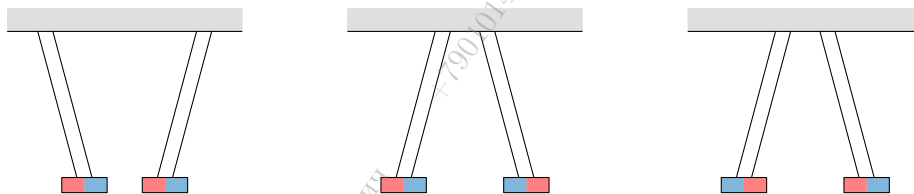


Рис. 133. Притяжение и отталкивание магнитов

Считают, что взаимодействие магнитов осуществляется посредством *магнитного поля* — формы материи, окружающей магниты (поле можно представлять себе как невидимое истечение из тела воображаемой жидкости и т. п.). Сказанное проиллюстрировано на рис. 134: поле магнита А «отталкивает» магнит Б от магнита А (и наоборот; на рис. 134 магниты обращены друг к другу одноименными полюсами).

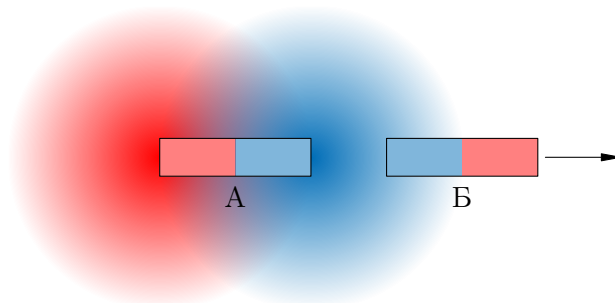


Рис. 134. Действие поля одного магнита на другой

¹Или предметы из сплава железа (например, из стали).

80 Магнитная стрелка

Обнаружить магнитное поле в данной области пространства можно с помощью *магнитной стрелки* — маленького магнита. Магнитная стрелка, свободно вращающаяся на оси, — неотъемлемый элемент простого компаса (рис. 135; тут и далее северный магнитный полюс (N) обозначен синим цветом, южный (S) — красным).

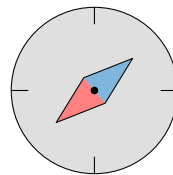


Рис. 135.
Компас

Магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси, вблизи поверхности Земли устанавливается всегда так, что северный полюс N (северный конец) стрелки указывает на географический север Земли.

На рис. 136 показано, как ориентируются магнитные стрелки, расположенные у поверхности планеты в произвольных местах.

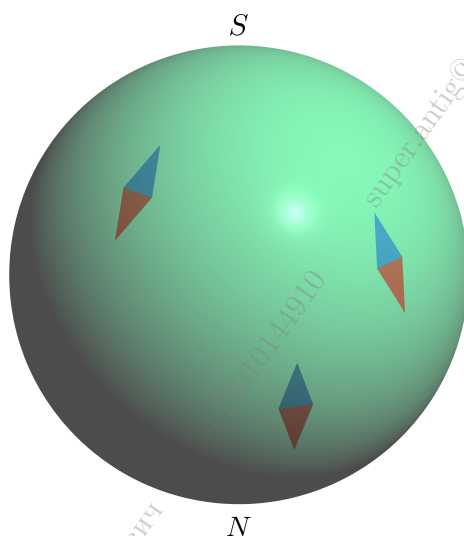


Рис. 136. Установление магнитных стрелок у поверхности планеты

Установление магнитной стрелки в определенном направлении в данном месте у поверхности планеты объясняется тем, что планета сама является огромным магнитом, который действует на магнитную стрелку.

В случае Земли N -полюс стрелки притягивается к южному магнитному полюсу планеты (обозначен буквой S на рис. 136), который находится недалеко от Северного географического полюса Земли. Соответственно, S -полюс стрелки притягивается к северному магнитному полюсу планеты (обозначен буквой N на рис. 136), который находится около Южного географического полюса Земли.

Опыт показывает, что N -полюс стрелки притягивается к S -полюсу магнита и отталкивается от его N -полюса. S -полюс стрелки, наоборот, притягивается к N -полюсу магнита и отталкивается от его S -полюса (рис. 137).

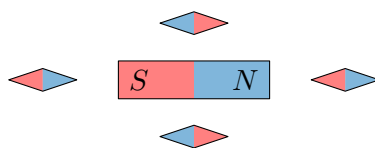


Рис. 137. Установление магнитных стрелок возле магнита

81 Индукция и линии магнитного поля

Индукция ($\vec{B}$ [Тл]) — это характеристика силовой способности магнитного поля в точке пространства. В каждой точке пространства вектор $\vec{B}$ направлен туда же, куда и северный конец (N -полюс) *магнитной стрелки*, помещенной в данную точку (рис. 138, слева).

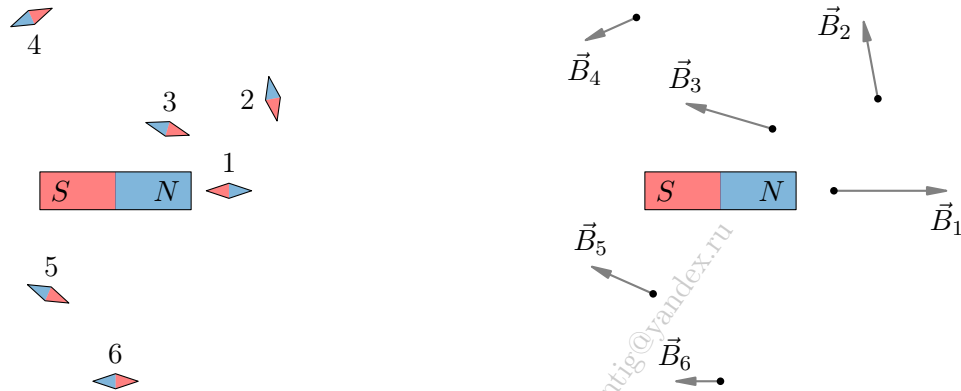


Рис. 138. Стрелки и соответствующие векторы индукции

Возле магнита расположены шесть магнитных стрелок, способных свободно вращаться вокруг своих центров. На рис. 138 (справа) изображены шесть векторов индукции поля магнита: каждой магнитной стрелке отвечает свой вектор $\vec{B}$.

Наглядно описывать магнитное поле в пространстве принято с помощью **линий магнитного поля** — линий, идущих вдоль векторов индукции поля в различных точках пространства².

На рис. 139 показана картина линий поля полосового магнита.

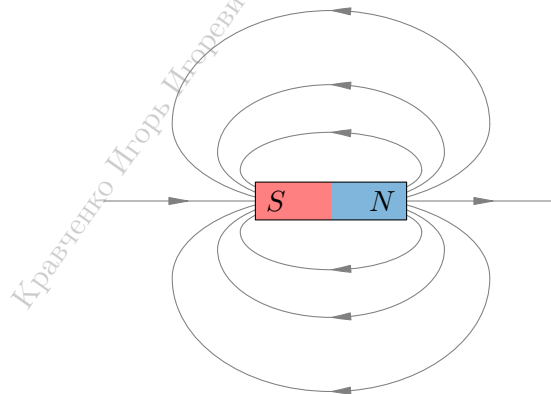


Рис. 139. Линии магнитного поля полосового магнита

Линии поля выходят из северного полюса магнита и входят в южный полюс (линии не пересекаются; внутри магнита они замыкаются). Чем больше густота линий, тем больше индукция поля в данной области пространства.

Именно вдоль линий поля выстраиваются магнитные стрелки (или железные опилки), размещенные возле магнита.

²Эти линии называют также *линиями индукции* или *магнитными силовыми линиями*. Всякая линия поля изображается так, что в любой ее точке вектор индукции направлен по касательной к линии поля.

82 Сложение магнитных полей

Магнитное поле, создаваемое несколькими магнитами, можно рассматривать как наложение полей, создаваемых каждым магнитом в отдельности.

Принцип суперпозиции магнитных полей. Если магниты $M_1, M_2, \dots$ по отдельности создают в данной точке поля $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \dots$, то вместе они создают в данной точке поле

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots \quad (125)$$

Этот принцип можно проиллюстрировать для случая двух магнитов (рис. 140).

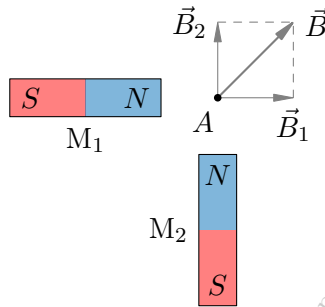


Рис. 140. Принцип суперпозиции магнитных полей

Магнит M_1 создает в точке A поле $\vec{B}_1$, а магнит M_2 в этой же точке создает поле $\vec{B}_2$. Согласно вышеуказанному принципу вместе они создают в точке A поле $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ (рис. 140).

Индукции магнитных полей в общем случае складываются векторно.

Задача. Два одинаковых магнита M_1, M_2 расположены так, что их оси лежат на одной прямой OO' ; магниты обращены друг к другу одноименными полюсами (рис. 141). Чему равен модуль результирующего вектора магнитной индукции в точке A , лежащей на прямой OO' и равноудаленной от обоих магнитов?

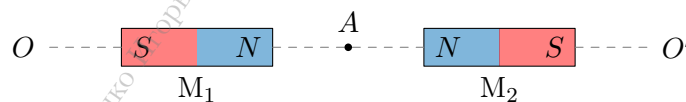


Рис. 141. К задаче

Решение. Так как точка A одинаково удалена от одноименных полюсов магнитов M_1 и M_2 (или густота собственных магнитных линий каждого магнита в этой точке одинакова), то соответствующие магнитные индукции $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$, создаваемые этими магнитами в данной точке, одинаковы по величине (рис. 142).

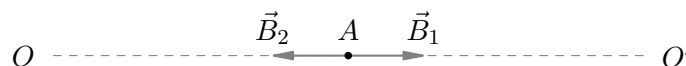


Рис. 142. К задаче

Так как векторы $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ равны по модулю и противоположны по направлению, то результирующий вектор $\vec{B}$, вычисляемый по формуле (125), равен нулю: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = 0$. Соответственно, модуль вектора $\vec{B}$ равен нулю.

83 Опыт Эрстеда

Магнитными свойствами обладает также электрический ток. Обнаружить на опыте эти свойства тока и изучить их удалось в опыте Эрстеда.

Схема опыта Эрстеда показана на рис. 143.

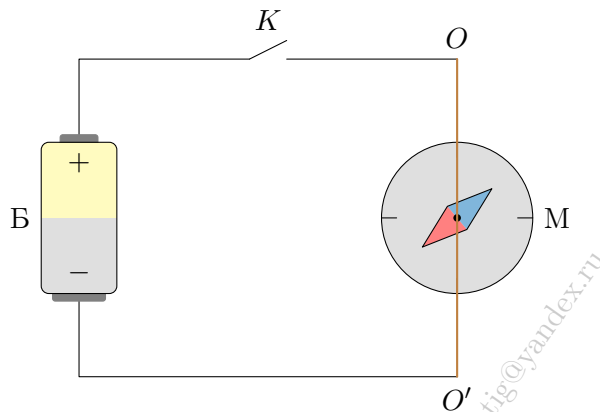


Рис. 143. Опыт Эрстеда: тока в цепи нет

Над магнитной стрелкой М (стрелкой компаса) расположен провод OO' , подключенный через ключ K к батарее Б. Если ключ разомкнут (в цепи из батарейки и проводников нет тока), то магнитная стрелка указывает на (географический) север Земли.

Пусть теперь ключ в рассмотренной схеме замыкают (рис. 144).

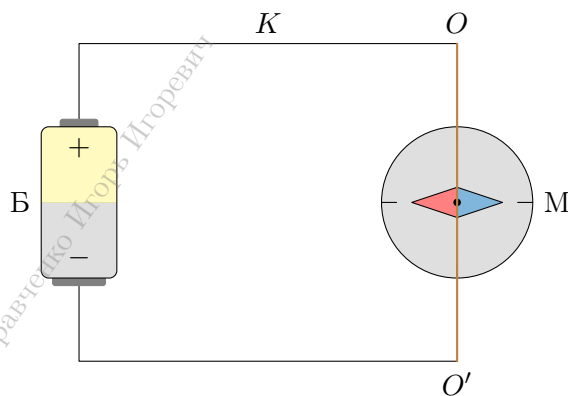


Рис. 144. Опыт Эрстеда: ток в цепи есть

Замыкание ключа K приводит к протеканию тока в цепи из батарейки Б и проводников. При достаточно большом токе в цепи магнитная стрелка М устанавливается *перпендикулярно проводу OO'* . Оказывается, отклонение магнитной стрелки вызвано действием на нее со стороны провода OO' с током (стрелка и провод с током взаимодействуют друг с другом подобно тому, как магнитная стрелка взаимодействует с постоянным магнитом). При размыкании ключа магнитная стрелка возвращается в свое начальное положение.

Опыт Эрстеда показывает, что *электрический ток создает в окружающем пространстве магнитное поле*.

84 Магнитное поле прямого провода с током

Пусть имеется прямой провод, через который протекает электрический ток. На рис. 145 показана картина линий магнитного поля вокруг провода.

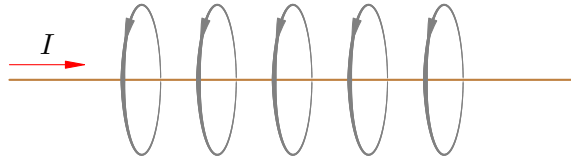


Рис. 145. Линии магнитного поля прямого провода с током

Линии поля прямого провода с током являются окружностями. Центры этих окружностей лежат на проводе, при этом окружности лежат в плоскостях, перпендикулярных проводу (см. рис. 145).

Через любую точку пространства вне провода можно провести соответствующую линию (в форме окружности) его магнитного поля. С удалением от провода густота линий поля убывает (убывает индукция магнитного поля).

Для определения направления линий магнитного поля прямого тока можно пользоваться следующим правилом.

Правило правой руки. Если большой палец правой руки расположить так, чтобы он указывал направление тока в проводе, то остальные согнутые пальцы (охватывающие провод) укажут направление линий магнитного поля, создаваемого этим током.

Рисунок 146 иллюстрирует применение этого правила.

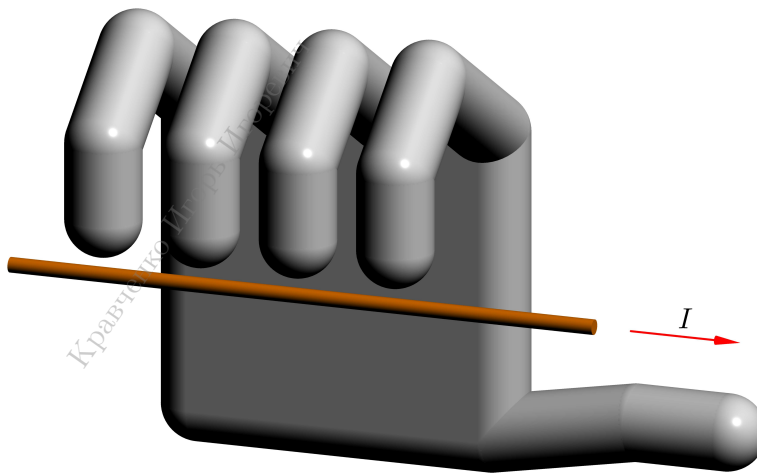


Рис. 146. Правило правой руки

Сопоставляя рисунки 145 и 146, можно видеть, что согнутые пальцы на рис. 146 указывают направление линий магнитного поля вокруг провода.

Задача. Два одинаковых изолированных тонких провода с противоположно направленными равными токами плотно вставлены в узкую пластиковую трубку. Что можно сказать о магнитном поле вокруг трубки?

Решение. С помощью правила правой руки можно убедиться, что поля токов компенсируют друг друга — магнитное поле вокруг трубки отсутствует.

85 Магнитное поле кольца с током

Пусть имеется провод в форме кольца, через который протекает электрический ток. На рис. 147 показана картина линий магнитного поля кольца с током.

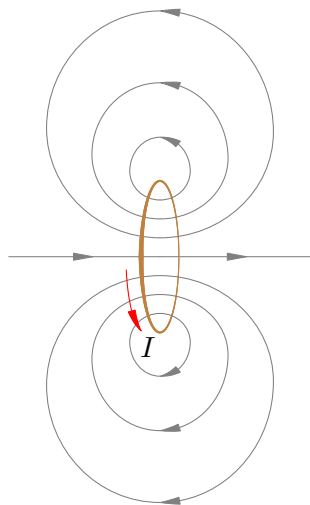


Рис. 147. Линии магнитного поля кольцевого провода с током

Линии поля кольца как бы выходят из него со одной стороны и входят в него с другой стороны (внутри кольца линии замыкаются).

Для определения того, с какой стороны из кольца выходят линии его магнитного поля, можно воспользоваться следующим правилом.

Правило правой руки. Направление линий магнитного поля *внутри* кольца укажет большой палец правой руки, если остальные согнутые пальцы (охватывающие кольцо) расположены так, что они указывают направление тока кольца.

Рисунок 148 иллюстрирует применение этого правила.

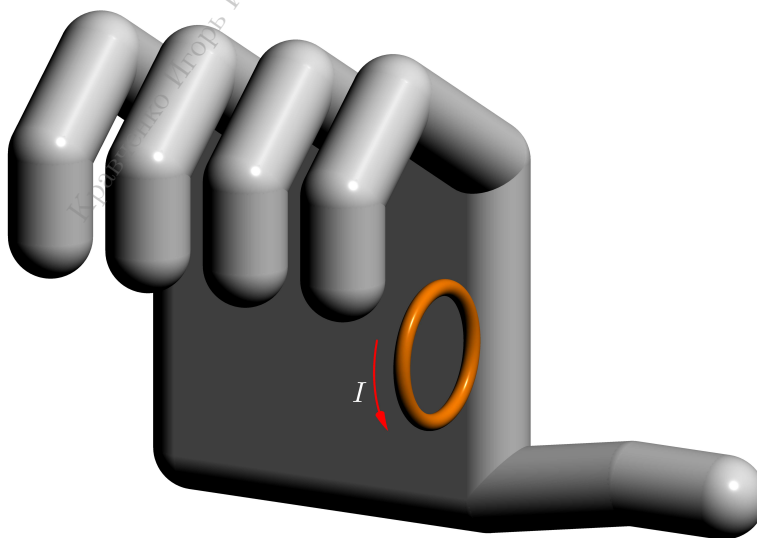


Рис. 148. Правило правой руки

Соотнося рисунки 147 и 148, можно видеть, что большой палец на рис. 148 указывает направление линий магнитного поля внутри кольца.

86 Магнитное поле катушки с током

Пусть имеется цилиндрическая *катушка*, состоящая из нескольких витков провода, намотанного по винтовой линии (*соленоид*). На рис. 149 показана картина линий магнитного поля катушки с током.

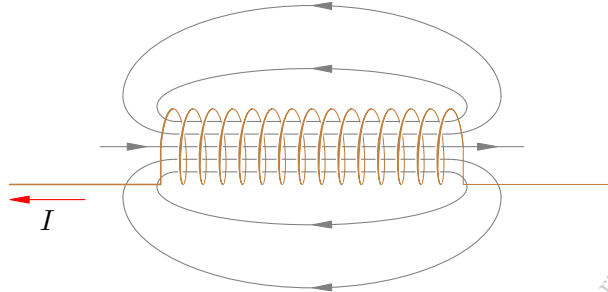


Рис. 149. Линии магнитного поля катушки с током

Линии поля катушки как бы выходят из нее со одной стороны и входят в нее с другой стороны (внутри катушки линии замыкаются).

Для определения того, с какой стороны из катушки выходят линии ее магнитного поля, можно воспользоваться следующим правилом.

Правило правой руки. Направление линий магнитного поля *внутри* катушки укажет большой палец правой руки, если остальные согнутые пальцы (охватывающие катушку) расположены так, что они указывают направление тока в катушке.

Рисунок 150 иллюстрирует применение этого правила.

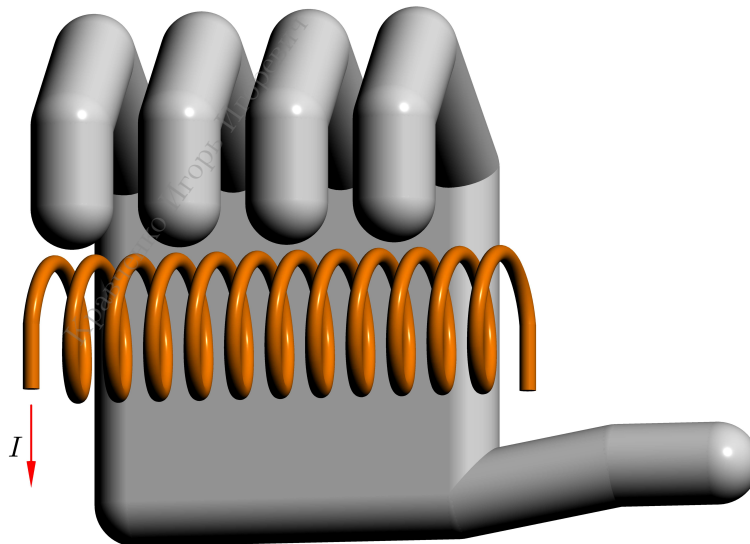


Рис. 150. Правило правой руки

Сопоставляя рисунки 149 и 150, можно убедиться, что большой палец на рис. 150 указывает направление линий магнитного поля внутри катушки.

При плотной намотке витков *внутри* достаточно длинной катушки вдали от ее краев магнитное поле является *однородным*: из рис. 149 видно, что *линии* *однородного* поля являются *параллельными* *прямыми* *одинаковой* *густоты*.

87 Сила Ампера

Сила Ампера (F_A [Н]) — это сила, действующая на провод с током со стороны магнитного поля:

$$F_A = IBl \sin \alpha, \quad (126)$$

где I — сила тока в проводе, B — индукция магнитного поля, l — длина провода (находящегося в магнитном поле), α — угол между направлениями тока I и поля B .

Пусть провод с током помещен между полюсами дугового магнита (рис. 151).

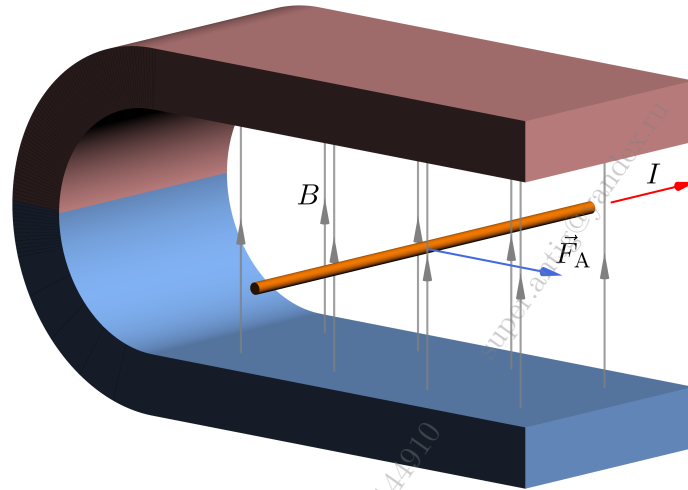


Рис. 151. Сила Ампера

Поле магнита с индукцией B (его линии изображены серым цветом) действует на провод с током I с силой Ампера $\vec{F}_A$. Направление силы Ампера можно определять по следующему правилу.

Правило левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы вытянутые четыре пальца указывали направление тока, а линии поля входили в ладонь, то отведенный перпендикулярно большому пальцу (лежащий в одной плоскости с остальными пальцами) укажет направление силы Ампера.

Рисунок 152 иллюстрирует применение этого правила.

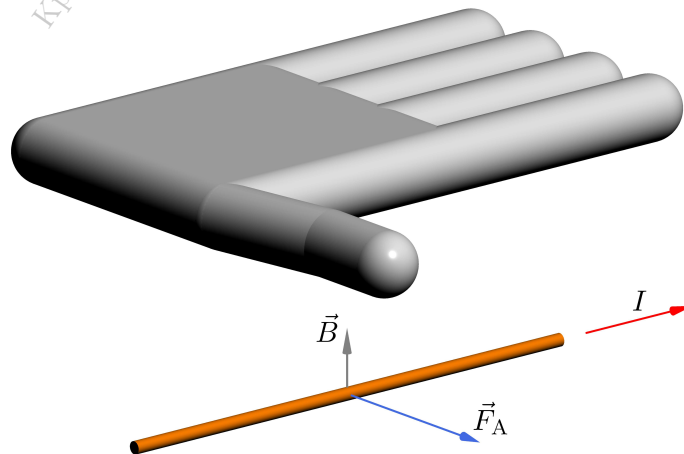


Рис. 152. Правило левой руки

88 Сила Лоренца

Сила Лоренца (F_L [Н]) — это сила, действующая на *движущийся* заряд со стороны магнитного поля:

$$F_L = qBv \sin \alpha, \quad (127)$$

где q — величина заряда, B — индукция магнитного поля, v — скорость заряда, α — угол между направлениями скорости v и поля B .

Пусть заряд влетает в пространство между полюсами магнита (рис. 153).

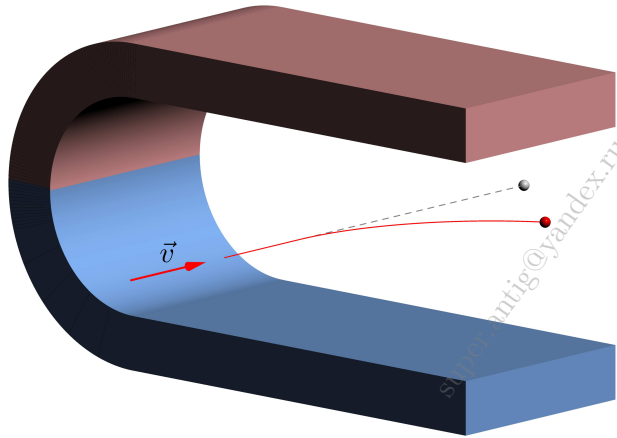


Рис. 153. Отклонение движения заряда в магнитном поле

Положительный заряд (красный шар), движущийся со скоростью $\vec{v}$, при падении в поле магнита (оно сосредоточено практически между его полюсами) отклоняется от первоначального направления движения под действием силы Лоренца (для сравнения серой штриховой линией показана траектория движения незаряженной частицы). Вот правило для определения направления этой силы.

Правило левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы вытянутые четыре пальца указывали направление скорости *положительного* заряда, а линии поля входили в ладонь, то отведенный перпендикулярно большой палец (лежащий в одной плоскости с остальными пальцами) укажет направление силы Лоренца (если заряд отрицательный, то четыре пальца устанавливают *против* его скорости).

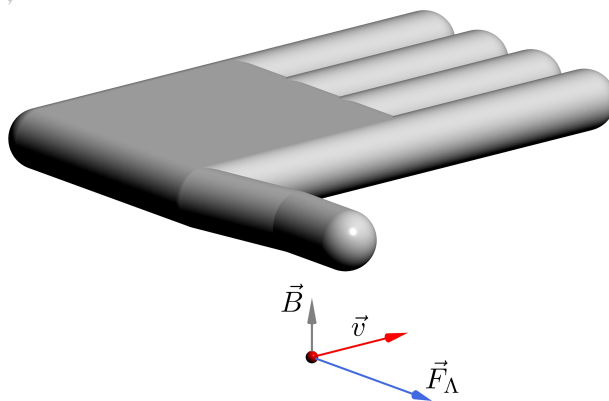


Рис. 154. Правило левой руки

Глава 11

Электромагнитная индукция

89 Магнитный поток

Пусть имеются два проводящих контура¹ в магнитном поле (рис. 155).

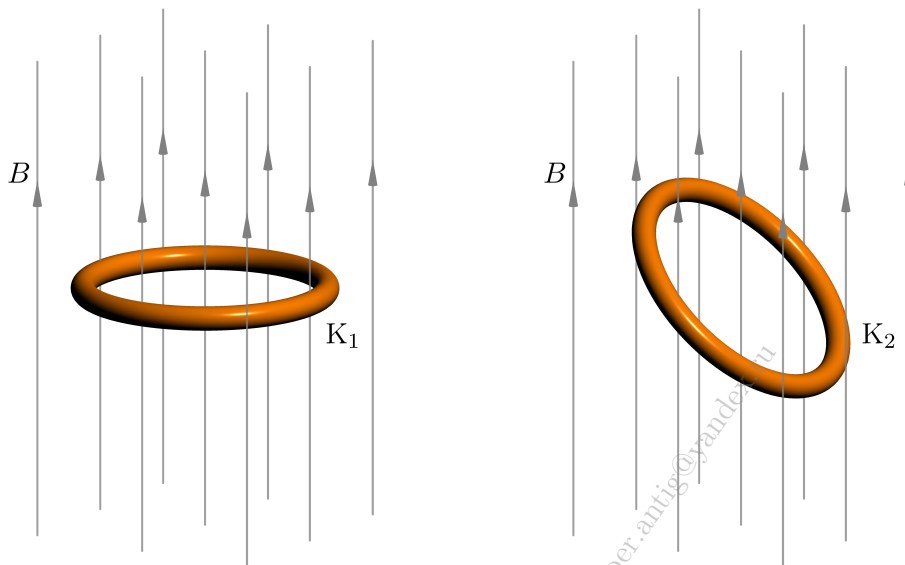


Рис. 155. Два контура в магнитном поле

Контур K_1 и K_2 (кольца) расположены в однородном магнитном поле B . Плоскость контура K_1 перпендикулярна линиям поля, а через плоскость контура K_2 линии поля проходят *не* перпендикулярно. Из рис. 155 видно, что кольцо K_1 пронизывается большим количеством линий магнитного поля, чем кольцо K_2 : в таком случае говорят, что магнитный поток через кольцо K_1 больше, чем через кольцо K_2 .

Магнитный поток (Φ [Вб]) — это характеристика *количества* линий магнитного поля, пронизывающих контур:

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (128)$$

где B — индукция магнитного поля (в котором находится контур), S — площадь контура, α — угол между вектором $\vec{B}$ и перпендикуляром к плоскости контура.

На рис. 156 изображен пример к определению магнитного потока.

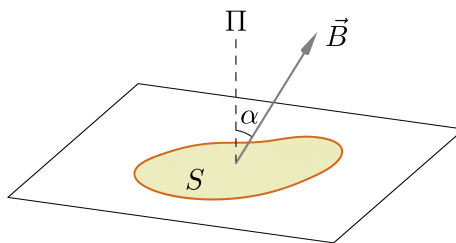


Рис. 156. Контур произвольной формы в магнитном поле

В магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ расположен произвольный контур площади S так, что вектор $\vec{B}$ образует угол α с перпендикуляром Π к плоскости контура. Формула (128) дает магнитный поток через этот контур: $\Phi = BS \cos \alpha$.

¹Контур — это фигура, образованная замкнутой линией в пространстве.

90 Закон электромагнитной индукции Фарадея

Электромагнитная индукция — это явление возникновения электрического тока в проводящем контуре при изменении магнитного потока через контур.

На рис. 157 изображена схема опыта по обнаружению явления электромагнитной индукции.

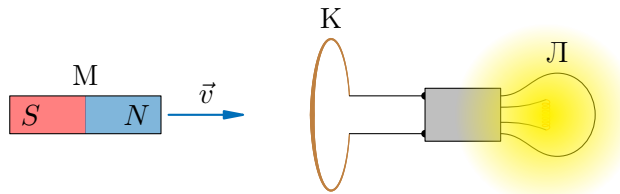


Рис. 157. Магнит перемещают относительно проводящего контура

При *вдвигании* магнита М в контур, образованный кольцевым проводником К и лампой Л, загорается лампа, что свидетельствует о протекании тока через данный контур. Также лампа загорается, если магнит *выдвигать* из этого контура или если *двигать сам контур* относительно покоящегося магнита.

Появление тока в контуре в рассмотренной ситуации объясняют *изменением количества линий магнитного поля, пронизывающих контур*. Ток, который наводится в контуре вследствие изменения количества этих линий внутри контура, называют *индукционным током*.

Практически удобно считать, что индукционный ток вызывается как бы «невидимой батареей», которая «появляется» в контуре (рис. 158).

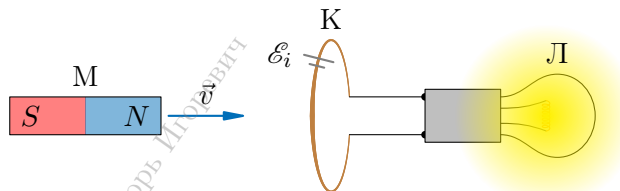


Рис. 158. «Невидимая батарейка» в контуре вызывает индукционный ток

При изменении количества линий магнитного поля, пронизывающих контур, в нем как бы образуется «невидимая батарейка» с так называемой *ЭДС индукции* $\mathcal{E}_i$ (внутреннее сопротивление у такой «батарейки» отсутствует). Эта «батарейка» и вызывает ток в проводящем контуре в данном случае.

Закон электромагнитной индукции Фарадея. При изменении магнитного потока через контур в этом контуре возникает ЭДС индукции, равная скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'. \quad (129)$$

Так, чем быстрее двигают магнит в рассмотренном опыте (то есть чем быстрее меняется магнитный поток через контур), тем большая ЭДС индукции возникает в контуре, и тем, соответственно, большая сила индукционного тока регистрируется в нем.

91 ЭДС индукции в движущемся проводе

Пусть прямой провод перемещается в постоянном магнитном поле (рис. 159).

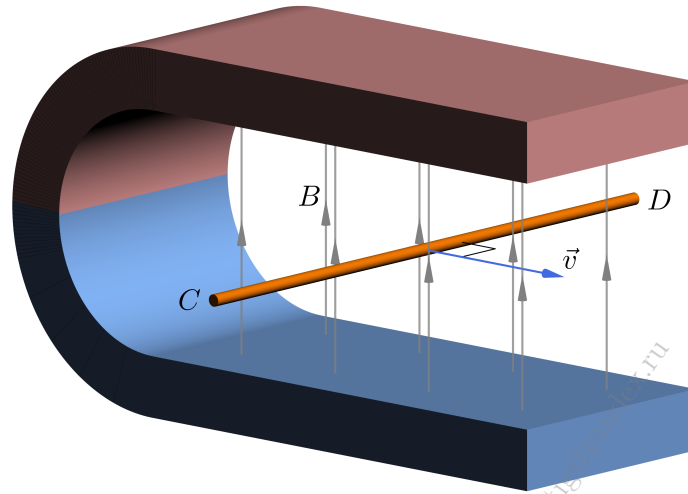


Рис. 159. Движение провода в магнитном поле

Провод CD движется в магнитном поле B в плоскости, перпендикулярной линиям поля, поступательно так, что его скорость $\vec{v}$ образует прямой угол с осью провода ($\vec{v} \perp CD$). Опыт показывает, что в этом случае между концами провода возникает *напряжение*. В проводе как бы появляется «невидимая батарейка» с ЭДС индукции (без внутреннего сопротивления).

ЭДС индукции в движущемся проводе при его движении в магнитном поле равна:

$$\mathcal{E}_i = Bvl \cos \alpha, \quad (130)$$

где B — индукция магнитного поля, v — скорость провода, l — длина провода (находящегося в магнитном поле; $\vec{v} \perp l$), α — угол между вектором $\vec{B}$ и перпендикуляром к плоскости движения провода.

На рис. 160 изображен пример к определению ЭДС индукции в движущемся проводе.

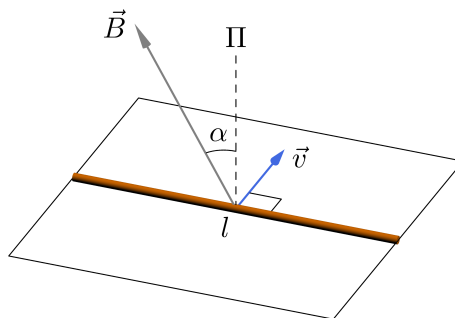


Рис. 160. К определению ЭДС индукции в движущемся проводе

В магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ поступательно движется провод длиной l со скоростью $\vec{v}$ (причем $\vec{v} \perp l$), при этом вектор $\vec{B}$ образует угол α с перпендикуляром Π к плоскости движения. Формула (130) дает ЭДС индукции в этом проводе: $\mathcal{E}_i = Bvl \cos \alpha$.

92 Правило Ленца

Как известно, магнит,двигаемый в проводящий контур², вызывает протекание индукционного тока в контуре (рис. 161).

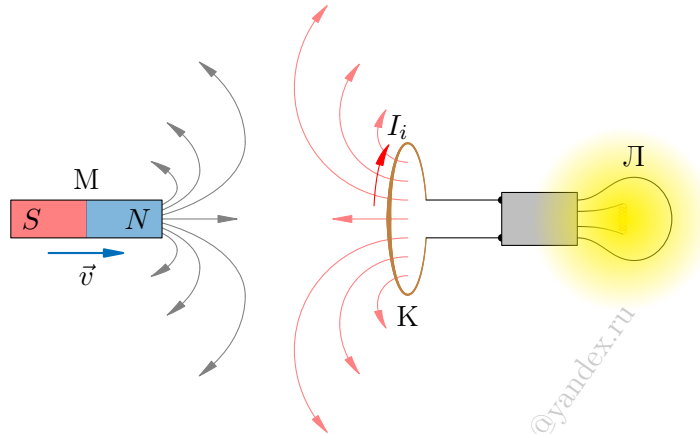


Рис. 161. Линии внешнего и собственного магнитных полей

Магнит М двигают в контур, образованный кольцевым проводником К и лампой Л. Изменение количества линий так называемого *внешнего* магнитного поля (поля магнита) через контур приводит к появлению индукционного тока I_i в контуре (линии внешнего поля изображены серым цветом). Так как ток порождает вокруг себя магнитное поле, то контур «создает» свое *собственное* магнитное поле (линии собственного поля изображены светло-красным цветом).

Магнитный поток внешнего поля через контур называют *внешним магнитным потоком*. Магнитный поток собственного поля через контур называется соответственно *собственным магнитным потоком*.

Правило Ленца. Индукционный ток имеет такое направление, что собственный магнитный поток *препятствует изменению* внешнего магнитного потока.

Вот удобное правило для решения задач: контур «стремится создать» свое поле так, что число его линий *«препятствует» изменению числа линий внешнего поля через него (компенсирует это изменение)*. Иными словами, контур «стремится создать» свое поле таким образом, чтобы *общее количество линий* (и внешнего и собственного) полей через него оставалось *неизменным*.

Так, в ситуации на рис. 161 число линий внешнего поля (серых линий) через контур увеличивается. Проводящий контур «создает» свои линии поля (светло-красные линии) так, что они «препятствуют» изменению числа серых линий через контур: в данном случае линии собственного поля направлены против линий внешнего поля.

Магнит, приближающийся (или удаляющийся) к *проводящему* контуру, действует на контур с некоторой силой (магнит и контур взаимодействуют друг с другом подобно тому, как взаимодействуют два магнита). *Контур всегда стремится отклоняться в сторону движения магнита*. Например, в рассмотренном опыте (рис. 161) сила, действующая на контур со стороны магнита, направлена вправо (если бы контур был подвешен на нити, он бы отклонялся вправо).

²Или выдвигаемый из проводящего контура (роль магнита может выполнять также проводник с током — например, катушка с током).

93 Катушка. Самоиндукция

Магнитный поток катушки, создаваемый током в ней и пронизывающий ее, равен:

$$\Phi_L = LI, \quad (131)$$

где L — *индуктивность* катушки³, I — ток в катушке.

Говорят, что индуктивность — это способность катушки накапливать энергию магнитного поля.

Энергия катушки рассчитывается по формуле:

$$W_L = \frac{LI^2}{2}. \quad (132)$$

Самоиндукция — это явление возникновения ЭДС в контуре (катушке) при изменении силы тока в этом же самом контуре (катушке). Схема опыта по обнаружению явления самоиндукции показана на рис. 162 (слева).

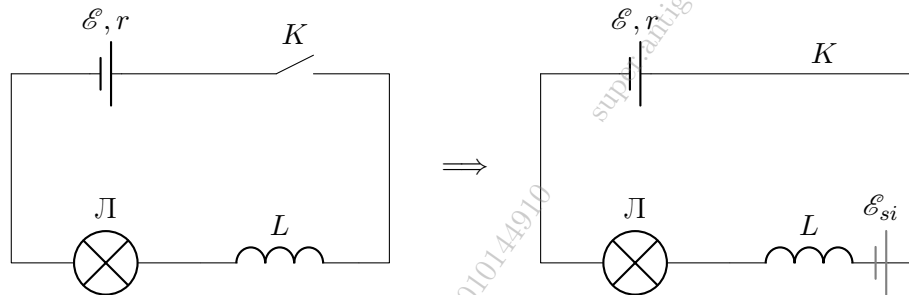


Рис. 162. К опыту по обнаружению явления самоиндукции

Имеется цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности L и лампы Л , подключенных к батарее $\mathcal{E}, r$ через ключ K . При разомкнутом ключе тока в цепи нет, лампа не горит.

Пусть теперь ключ в рассмотренной схеме замыкают (рис. 162, справа).

Сразу после замыкания ключа K тока в цепи нет. Это объясняется тем, что в катушке возникает *ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{si}$, препятствующая изменению тока через катушку*⁴ (постоянный ток в цепи устанавливается спустя некоторое время — соответственно, лампа загорается *постепенно*).

ЭДС самоиндукции в катушке при изменении тока в ней находится по формуле:

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -LI'. \quad (133)$$

ЭДС индукции будет возникать в катушке при любом способе изменения магнитного потока катушки (по закону электромагнитной индукции Фарадея):

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi_L}{\Delta t} = -\Phi'_L.$$

³Индуктивность — это характеристика катушки (контра), показывающая ее способность создавать магнитное поле. В общем случае индуктивность катушки определяется так: $L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$, где μ — магнитная проницаемость вещества внутри катушки, μ_0 — магнитная постоянная, N — число витков катушки, S — площадь поперечного сечения катушки, l — длина катушки.

⁴Говорят, что ток в катушке не может измениться *скачком*.

Глава 12

Электромагнитные колебания и волны

94 Электромагнитные колебания

Электромагнитные колебания — это периодические изменения заряда, тока и напряжения в электрической цепи. Изучение электромагнитных колебаний удобно начинать с рассмотрения процессов в *колебательном контуре* — замкнутой цепи из конденсатора и катушки.

Пусть *заряженный* конденсатор замыкают на катушку (рис. 163, слева).

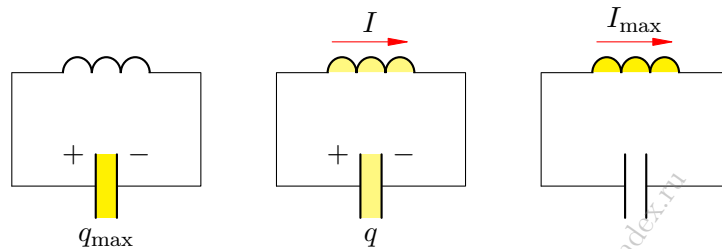


Рис. 163. Электромагнитные колебания в колебательном контуре

Сразу после замыкания цепи начинаются электромагнитные колебания — периодические изменения заряда на конденсаторе и тока в катушке (это *свободные* колебания; они совершаются только за счет энергии, запасенной в контуре — внешних воздействий нет). Период колебаний обозначается через T . При $t = 0$ (рис. 163, слева) конденсатор с начальным зарядом $q_{\max}$ начинает разряжаться, ток в катушке равен нулю (ток в ней не может измениться скачком). При $0 < t < T/4$ (рис. 163, посередине) конденсатор с зарядом q (при этом $q < q_{\max}$) разряжается, ток I в катушке нарастает. При $T/4$ (рис. 163, справа) конденсатор *разряжен*, ток в катушке достиг максимального значения $I_{\max}$.

Теперь конденсатор начинает *перезаряжаться* (рис. 164, слева).

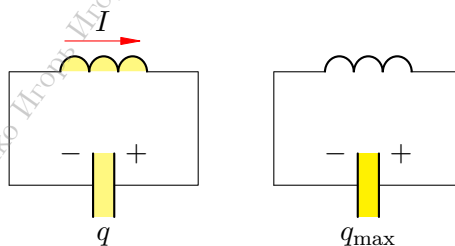


Рис. 164. Электромагнитные колебания в колебательном контуре

При $T/4 < t < T/2$ (рис. 164, слева) на обкладках конденсатора появляются заряды противоположного знака по сравнению с теми, что были вначале; ток в катушке убывает. При $t = T/2$ (рис. 164, справа) конденсатор перезарядился — его заряд снова равен $q_{\max}$ (однако полярность другая); тока в катушке нет.

При $T/2 < t < T$ процессы в колебательном контуре повторяются, но идут в обратном направлении («обратно» заряженный конденсатор разряжается; в катушке нарастает ток в противоположном направлении по сравнению с тем, что было при $0 < t < T/2$).

Желтым цветом обозначено сосредоточение *энергии* в колебательном контуре при колебаниях — элементы как бы обмениваются энергией между собой.

95 Свободные колебания в контуре

Свободные (*собственные*) электромагнитные колебания, происходящие в колебательном контуре, оказываются *гармоническими*. Так, **заряд конденсатора** меняется во времени по закону *косинуса* (или *синуса*):

$$q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi), \quad (134)$$

где $q_{\max}$ — *амплитуда заряда* (наибольшее значение заряда), ω — циклическая частота (или круговая частота), φ — начальная фаза.

Ток катушки и напряжение конденсатора можно вычислять через заряд конденсатора:

$$I = q', \quad U = \frac{q}{C}, \quad (135)$$

где q' — производная заряда по времени, C — емкость конденсатора.

На рис. 165 изображены графики колебаний заряда конденсатора и тока катушки в контуре (в одних координатных осях).

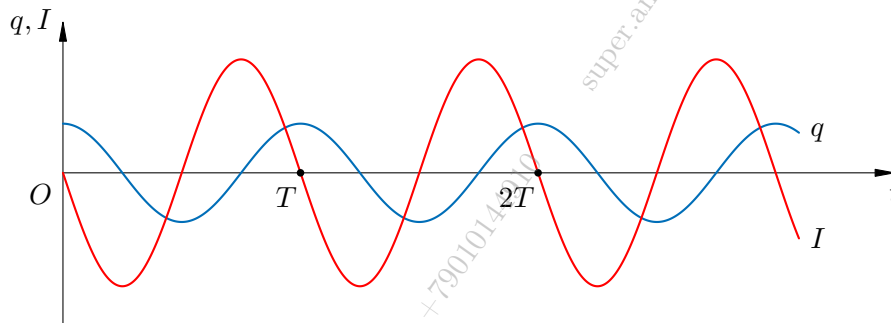


Рис. 165. Графики колебаний заряда и тока в контуре

Ток и заряд колеблются с периодом T . При этом нули заряда приходятся на максимумы или минимумы тока; и наоборот, нули тока соответствуют максимумам или минимумам заряда.

Период колебаний в контуре находят так (*формула Томсона*):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (136)$$

где L и C — индуктивность катушки и емкость конденсатора.

При решении задач удобно использовать понятие полной энергии контура.

Полная энергия контура (W [Дж]) — это сумма энергий катушки и конденсатора:

$$W = W_L + W_C. \quad (137)$$

Следующий закон обычно применяется при решении задач, сформулированных в терминах энергии.

Закон сохранения полной энергии контура. Если сопротивление контура равно нулю (энергия перераспределяется только между катушкой и конденсатором), то полная энергия контура сохраняется:

$$W_1 = W_2 = \dots, \quad (138)$$

где W_1 и W_2 — полные энергии контура в первом и втором состояниях.

96 Вынужденные колебания в контуре

Электромагнитные колебания в колебательном контуре называются *вынужденными*, если они возникают под действием периодической *вынуждающей* силы.

Так, вынужденные колебания совершаются в контуре, подключенном к источнику *синусоидального* напряжения (рис. 166).

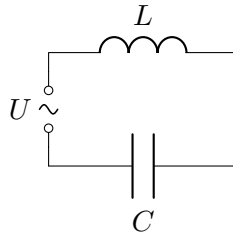


Рис. 166. Вынужденные колебания

Пусть в схеме, показанной на рис. 166, напряжение источника¹ меняется по закону: $U = U_0 \sin(\omega t)$. Тогда в контуре происходят колебания заряда и тока с *вынужденной* циклической частотой ω . (Если бы колебания в контуре были свободными, то они совершались бы с *собственной* циклической частотой ω_c контура, равной²: $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.)

На рис. 167 приведен график зависимости амплитуды силы тока в контуре от циклической частоты (*резонансная кривая*).

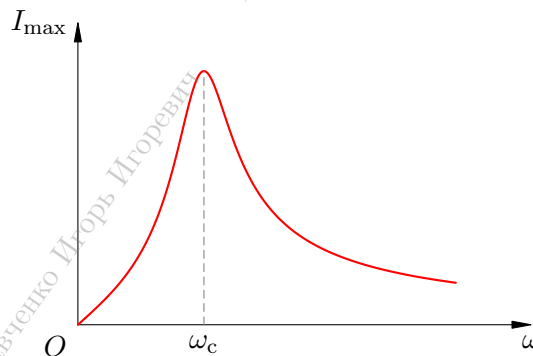


Рис. 167. Резонансная кривая

Как видно из рисунка, амплитуда тока тем больше, чем ближе вынужденная частота ω к собственной частоте ω_c контура. При $\omega = \omega_c$ (возможно, приблизительно) наступает *резонанс* — возрастание амплитуды колебаний. При $\omega \rightarrow 0$ ток в контуре равен нулю (ток малой частоты — это практически постоянный ток, который через конденсатор пройти не может); ток также равен нулю при $\omega \rightarrow \infty$ (при быстром изменении тока в катушке возникает большая ЭДС самоиндукции, препятствующая увеличению тока).

В случае колебаний в контуре (свободных или вынужденных) в нем протекает так называемый *переменный ток* — ток, изменяющийся с течением времени.

¹На схеме выводы источника — это выколотые точки.

²Подстановка формулы Томсона в определение циклической частоты.

97 Электроэнергия

Любой ток (постоянный или переменный) несет с собой энергию, называемую *электроэнергией* (ЭЭ). Например, электрическая лампа функционирует за счет того, что к ней по проводам подводится ЭЭ.

Производство ЭЭ осуществляется чаще всего *генераторами переменного тока* (на *электростанциях*). На рис. 168 иллюстрируется принцип действия генератора переменного тока.

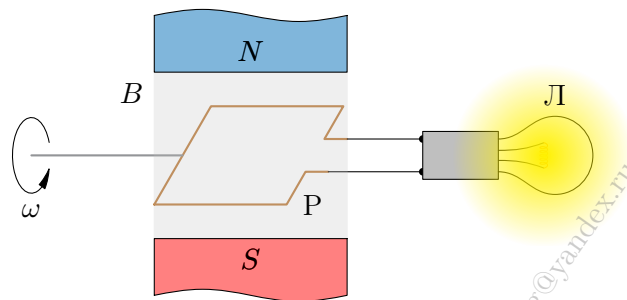


Рис. 168. Схема генератора переменного тока

Проводящая рамка P, подключенная к лампе Л, вращается с *постоянной* угловой скоростью ω в однородном магнитном поле B как бы между полюсами N и S магнита. Меняющийся магнитный поток через рамку порождает ЭДС индукции в ней, которая вызывает ток в контуре из рамки и лампы. В этом случае ток в рамке и лампе оказывается *синусоидальным*.

Передача ЭЭ потребителям происходит по проводам под *высоким* напряжением — *высоковольтным линиям электропередачи*. То есть напряжение в линии электропередачи (ЛЭП) перед транспортировкой ЭЭ повышают.

При доставке ЭЭ потребителю напряжение в ЛЭП необходимо уменьшить³. Повышение (перед транспортировкой ЭЭ) или понижение (при доставке ЭЭ) *переменного* напряжения осуществляют с помощью специальных устройств — *трансформаторов*.

Простейший трансформатор состоит из двух обмоток (катушек), навитых на замкнутый стальной сердечник (рис. 169).

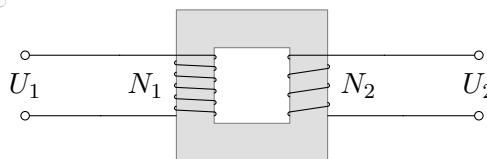


Рис. 169. Трансформатор

На *первичную обмотку* с числом витков N_1 подают напряжение U_1 от источника напряжения. На выводах *вторичной обмотки* с числом витков N_2 (вследствие изменения через нее магнитного потока, созданного переменным током в первичной обмотке) возникает напряжение U_2 . Трансформатор характеризуют

коэффициентом трансформации, равным $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

³Потребление электроэнергии на низком напряжении оказывается технически менее сложным и менее опасным, чем на высоком.

98 Электромагнитная волна

Электромагнитная волна — это распространение колебаний электрического и магнитного полей⁴.

Источником электромагнитных волн является любой заряд, движущийся с ускорением. На рис. 170 показана структура электромагнитной волны вдали от колеблющегося заряда, излучающего эту волну.

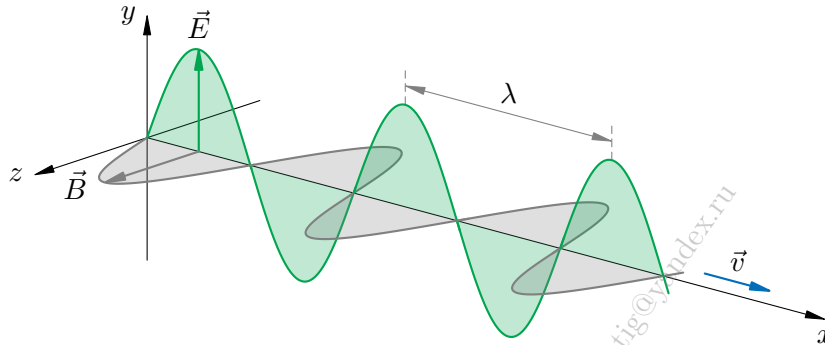


Рис. 170. Электромагнитная волна

Электромагнитная волна, изображенная на рис. 170, излучается зарядом, колеблющимся с частотой ν вдоль оси y около начала координат. Волна распространяется (бежит) со скоростью $\vec{v}$ вдоль оси x . В каждой точке оси x векторы напряженности $\vec{E}$ электрического поля и индукции $\vec{B}$ магнитного поля волны совершают колебания вдоль осей y и z соответственно (в каждой точке оси x векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ взаимно перпендикулярны⁵; колебания этих векторов происходят также с частотой ν , называемой *частотой электромагнитной волны*).

Две синусоиды на рис. 170 отражают распределение значений напряженности E и индукции B вдоль оси x в некоторый момент времени. *Длина волны* λ — это расстояние между двумя ближайшими впадинами или горбами (см. рис. 170; $\lambda = \nu T$, где T — период волны, то есть величина обратная частоте волны).

Электромагнитные волны являются *поперечными* — колебания векторов напряженности и индукции происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны ($\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$).

Все электромагнитные волны в зависимости от частоты (или длины волны в вакууме) разделяют на диапазоны.

1. **Радиоволны** ($\nu < 3 \cdot 10^{12}$ Гц).
2. **Инфракрасное излучение** ($3 \cdot 10^{12}$ Гц $< \nu < 4 \cdot 10^{14}$ Гц).
3. **Видимый свет** ($4 \cdot 10^{14}$ Гц $< \nu < 8 \cdot 10^{14}$ Гц).
4. **Ультрафиолетовое излучение** ($8 \cdot 10^{14}$ Гц $< \nu < 6 \cdot 10^{16}$ Гц).
5. **Рентгеновское излучение** ($6 \cdot 10^{16}$ Гц $< \nu < 8 \cdot 10^{19}$ Гц).
6. **Гамма-излучение** ($\nu > 8 \cdot 10^{19}$ Гц).

⁴А именно, колебаний *напряженности* электрического поля и *индукции* магнитного поля.

⁵Кратчайший поворот вектора $\vec{E}$ к вектору $\vec{B}$ всегда совершается против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора $\vec{v}$.

Часть IV

Оптика

Глава 13

Геометрическая оптика

99 Свет. Луч света

Видимый свет (кратко — свет) есть частный случай электромагнитных волн (свет воспринимается человеческим глазом). Частоты видимого света лежат в диапазоне примерно от $4 \cdot 10^{14}$ Гц до $8 \cdot 10^{14}$ Гц (длины волн этого диапазона в *вакууме* принимают значения примерно от 380 нм до 780 нм).

Источник света — это тело, испускающее свет. Если размеры источника света (кратко — источника) много меньше расстояния до освещаемого тела, то такой источник считают *точечным*. (Если данное тело воспринимается как черное, то это значит, что это тело не излучает свет в направлении наблюдателя.)

Луч света — это линия, вдоль которой распространяется свет (передается энергия от источника). На первых порах луч света можно представлять себе просто как узкий пучок света (наподобие солнечного луча).

Закон прямолинейного распространения света. В прозрачной однородной среде¹ лучи света являются прямыми линиями.

На рис. 171 показан ход луча света в чистой равномерно прогретой воде.

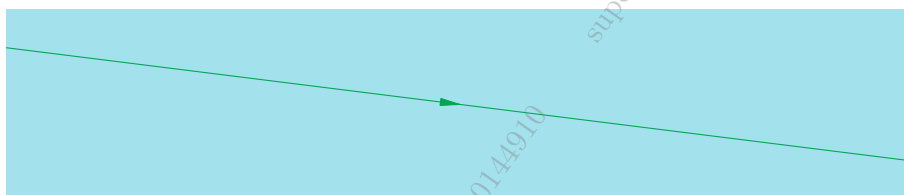


Рис. 171. Прямолинейное распространение света

Прямолинейное распространение света приводит к образованию тени от непрозрачного тела. *Тень* — это область пространства, в которую не попадает свет от источника. Если непрозрачное тело освещают точечным источником, то для нахождения области тени от источника проводят лучи, касающиеся поверхности непрозрачного тела. Если непрозрачное тело освещается *протяженным* источником, то возникает также *полутень* — область пространства, в которую попадает свет только от части источника.

Закон независимости лучей света. При пересечении лучей света характер их распространения не изменяется. Каждый луч освещает пространство так, как если бы других лучей вообще не было.

На рис. 172 показан ход двух пересекающихся лучей света в прозрачной однородной среде.

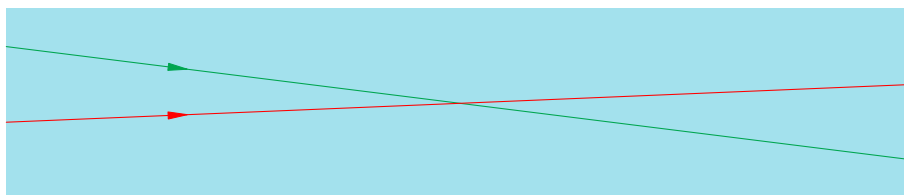


Рис. 172. Независимость лучей света

¹Прозрачная среда — это среда, в которой может распространяться свет; однородная среда — это среда с одинаковыми свойствами в каждой ее точке.

100 Отражение света. Зеркало

Отражение света — это изменение направления хода луча света, падающего на границу раздела двух сред, при котором луч возвращается в исходную среду.

На рис. 173 показано отражение узкого пучка света.

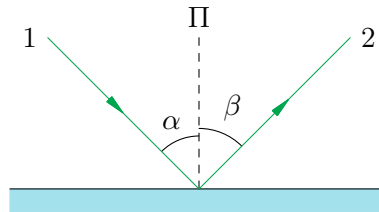


Рис. 173. Отражение света

Падающий луч 1 образует угол α (угол падения) с перпендикуляром П к поверхности отражения в точке падения. Отраженный луч 2 образует угол β (угол отражения) с упомянутым перпендикуляром П. (Углы падения и отражения отсчитываются от перпендикуляра к отражающей поверхности!)

Закон отражения. Угол падения равен углу отражения:

$$\alpha = \beta, \quad (139)$$

причем падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к поверхности отражения в точке падения лежат в одной плоскости.

Пусть имеются две отражающие поверхности, на каждую из которых падает широкий пучок света (рис. 174).



Рис. 174. Зеркальное и рассеянное отражения

При отражении от *зеркальной* поверхности (*зеркала*) пучок света (многообразие параллельных лучей) после отражения сохраняет свою параллельность: отражённые лучи также идут параллельно (рис. 174, слева). *Матовая* (шероховатая) поверхность дает *рассеянный свет* — лучи такого света идут во всевозможных направлениях (рис. 174, справа).

Особый интерес представляет отражение в *плоском* зеркале. *Изображение* произвольного предмета в плоском зеркале *симметрично предмету относительно зеркала* (рис. 175; предмет обозначен буквой П, изображение — буквой И).



Рис. 175. Изображение не зависит от расположения и размеров зеркала

101 Преломление света

Преломление света — это изменение направления хода луча света при прохождении границы двух прозрачных сред.

Пусть два луча света, идущих в воздухе, падают под одинаковыми углами на поверхность воды и стекла соответственно (рис. 176).

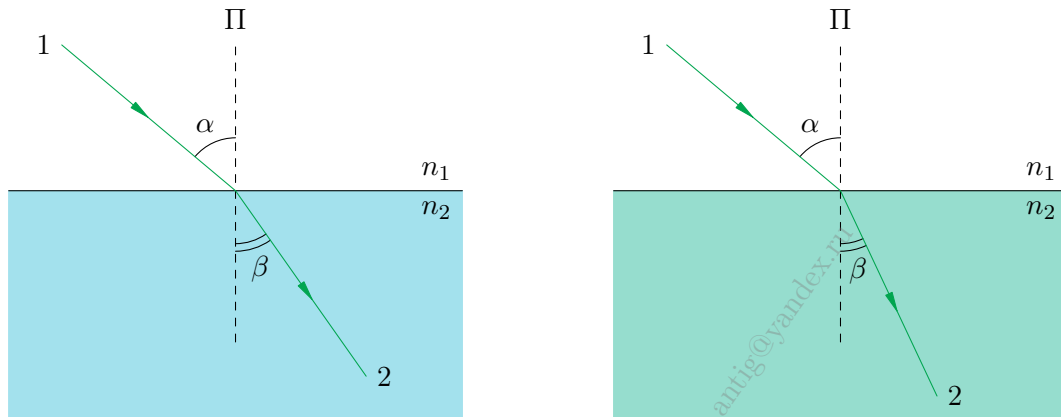


Рис. 176. Преломление света

На рис. 176 (слева) показано преломление луча при его переходе из воздуха в воду, а на рис. 176 (справа) — его преломление при переходе из воздуха в стекло.

Показатель преломления (n) — это характеристика способности среды преломлять луч (см. справочные таблицы):

$$n = \frac{c}{v}, \quad (140)$$

где c — скорость света в вакууме, v — скорость света в среде².

Показатель преломления — это, как говорят, *оптическая плотность* среды. Так как на рис. 176 стекло преломляет падающий луч сильнее, чем вода (при прочих равных условиях), то говорят, что стекло является оптически более плотной средой, чем вода (в данном случае показатель преломления стекла больше показателя преломления воды).

В обоих случаях, проиллюстрированных на рис. 176, луч 1 называется *падающим лучом* (он идет в среде с показателем преломления n_1), а угол α между падающим лучом и *перпендикуляром* Π к границе раздела сред в точке падения называется *углом падения*. Луч 2, называется *преломленным лучом* (он идет в среде с показателем преломления n_2), а угол β между преломленным лучом и упомянутым перпендикуляром Π называется *углом преломления*.

Сравнивая ход луча 1 и ход луча 2 на рис. 176, можно заключить: чем оптически *плотнее* среда, тем *ближе* к перпендикуляру Π идет луч в этой среде.

Закон преломления можно сформулировать так:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (141)$$

причем падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения лежат в одной плоскости.

²При переходе света (и вообще любой электромагнитной волны) из одной среды в другую частота света остается неизменной (частота света задается его источником).

102 Полное внутреннее отражение

Пусть точечный источник света находится в воде, над поверхностью которой находится воздух (рис. 177).

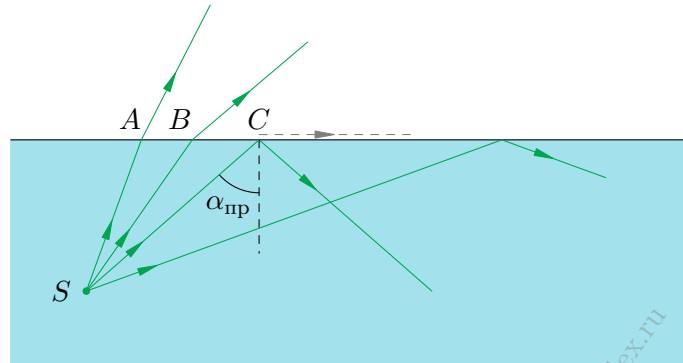


Рис. 177. Полное внутреннее отражение

Источник S испускает лучи во все стороны (на рисунке показаны некоторые из них). Луч SA , падающий на поверхность воды под сравнительно малым углом³, как и следовало ожидать, преломляется, выходя в воздух⁴. Угол падения луча SB больше; этот луч также выходит в воздух, но после преломления (в воздухе) луч идет ближе к поверхности воды.

С увеличением угла падения преломленный луч идет все ближе к поверхности воды, и наступает такой момент, когда угол преломления становится равным 90° : этому случаю соответствует луч SC , который после преломления должен был бы пойти параллельно поверхности воды (серый штриховой луч). В действительности падающий луч SC отражается обратно в воду. При дальнейшем увеличении угла падения луч уже не выходит из воды.

Рассмотренное явление называют *полным внутренним отражением*. Угол падения, которому соответствует угол преломления 90° , называется *предельным углом полного внутреннего отражения* (обозначается $\alpha_{\text{пр}}$; см. рис. 177). При углах падения, равных или превышающих $\alpha_{\text{пр}}$, оптически более плотная среда не выпускает наружу лучи света. (Угол $\alpha_{\text{пр}}$ вычисляют из закона преломления, рассматривая случай хода луча из более плотной среды в менее плотную с углом преломления 90° : $n_1 \sin \alpha_{\text{пр}} = n_2 \sin 90^\circ$, где n_1 — показатель преломления более плотной среды, n_2 — показатель преломления менее плотной среды.)

Задача. Найти показатель преломления рубина, если предельный угол полного отражения для рубина равен 34° .

Решение. Если нет специальных оговорок, то оптически менее плотной средой является воздух (или вакуум) с показателем преломления, равным единице. В таком случае рассмотрение хода луча с углом падения, равным $\alpha_{\text{пр}}$, позволяет записать закон преломления так: $n_p \sin \alpha_{\text{пр}} = n_v \sin 90^\circ$, где n_p и n_v — показатели преломления рубина и воздуха соответственно.

Отсюда искомый показатель преломления равен:

$$n_p = \frac{n_v \sin 90^\circ}{\sin \alpha_{\text{пр}}} = \frac{1 \cdot \sin 90^\circ}{\sin 34^\circ} \approx 1,79.$$

³Угол падения отсчитывается от перпендикуляра к границе раздела сред в точке падения!

⁴Лучи SA и SB также частично отражаются назад в воду (на рисунке не показано).

103 Линза

Линза — это прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями. Выделяют два вида линз⁵.

1. **Собирающая:** толщина середины линзы *больше* толщины ее края. На рис. 178 показаны все возможные собирающие линзы.



Рис. 178. Собирающие линзы

2. **Рассеивающая:** толщина середины линзы *меньше* толщины ее края. На рис. 179 изображены все возможные рассеивающие линзы.



Рис. 179. Рассеивающие линзы

Пусть имеются две линзы; на них падают параллельные пучки света (рис. 180).



Рис. 180. Действия собирающей и рассеивающей линз

Собирающая линза преобразует параллельный пучок света в *сходящийся* пучок (рис. 180, слева), а рассеивающая — в *расходящийся* (рис. 180, справа).

Линзу можно считать *тонкой*, если ее *толщина много меньше характерных расстояний в задаче*. На рис. 181 показаны обозначения тонких линз.

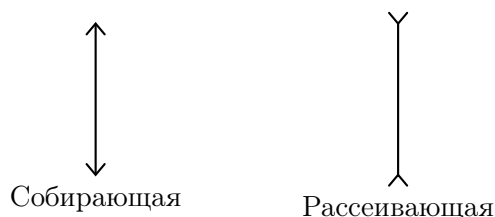


Рис. 181. Обозначения тонких собирающей и рассеивающей линз

⁵Далее предполагается, что показатель преломления линзы *больше* показателя преломления окружающей среды.

104 Ход лучей в тонкой линзе

Пусть имеются два параллельных пучка света: один падает на тонкую собирающую линзу, другой — на тонкую рассеивающую (рис. 182).

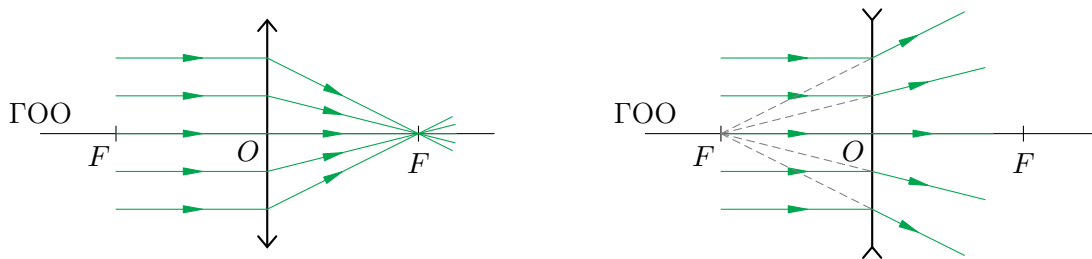


Рис. 182. Фокусировка и рассеяние параллельного пучка света

В случае собирающей линзы (рис. 182, слева) пучок света, параллельный *главной оптической оси* ГОО (оси симметрии линзы), после прохождения линзы собирается в ее правом *фокусе* F (любая линза имеет два фокуса — слева и справа на ГОО; обычно фокусы расположены на одинаковых расстояниях от линзы). Рассеивающая же линза (рис. 182, справа) преобразует такой пучок света в расходящийся пучок, как бы (мнимо) выходящий из левого фокуса F линзы. Точки O на рис. 182 называются *оптическими центрами* линз. Расстояния OF называются *фокусными расстояниями* (обозначаются F).

Падающие на линзы лучи на рис. 182 удобно называть «нормальными» (они как бы падают на линзу под *прямым* углом).

Оптическая сила (D [дптр]) — это характеристика преломляющей способности линзы:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (142)$$

Чем больше оптическая сила линзы, тем ближе к линзе фокусируется (возможно, мнимо) пучок света, падающий на нее «нормально» (см. рис. 182).

Правила хода лучей в линзе можно сформулировать так⁶.

1. «Нормальный» луч после преломления идет через фокус (рис. 183, слева).
2. Луч, идущий в оптический центр, не преломляется (рис. 183, посередине).
3. Если луч падает на линзу *наклонно* («ненормально»), то для построения его дальнейшего хода через центр линзы проводят *побочную оптическую ось* ПОО, параллельную этому лучу, и находят *побочный фокус* P , находящийся в точке пересечения ПОО с *фокальной плоскостью* ФП, проходящей через фокус F перпендикулярно ГОО. Преломленный луч идет через этот побочный фокус (рис. 183, справа).

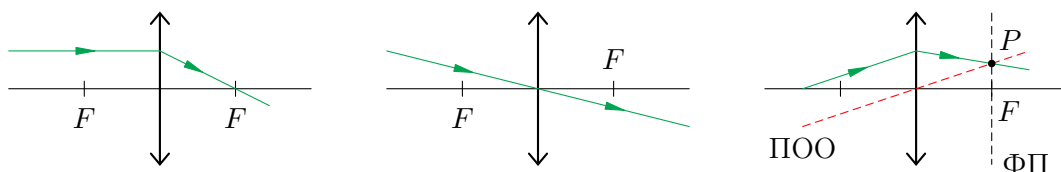


Рис. 183. К правилам хода лучей в линзе

⁶В случае рассеивающей линзы выражение «идет через» понимать как «мнимо идет через».

105 Построение изображения в линзе

Теорема об изображении. Если перед линзой⁷ находится светящаяся точка S (*предмет*), то после преломления в линзе все лучи (или их продолжения) пересекаются в одной точке S' , называемой *изображением* точки S .

Для построения изображения любой точки (предмета) достаточно найти точку пересечения (возможно, мнимого) каких-либо *двух* лучей, вышедших из этой точки (рис. 184).

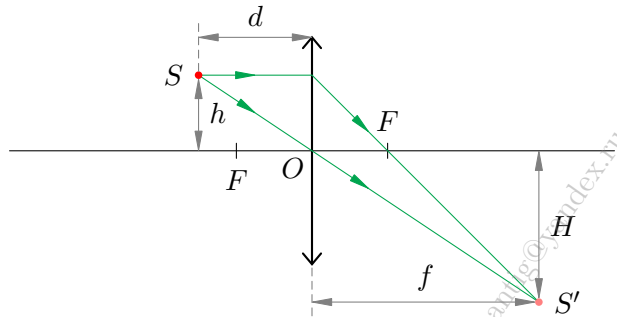


Рис. 184. Построение изображения точки

Расстояние от предмета до линзы обозначают d , расстояние от изображения до линзы обозначается f . Через h и H обозначены как бы высоты предмета и изображения соответственно.

Формула линзы есть следующее соотношение:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (143)$$

при этом:

- F считается *отрицательным*, если линза *рассеивающая*;
- f считается *отрицательным*, если изображение *мнимое*.

Увеличение линзы находят так:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \quad (144)$$

Изображение может быть (**характеристики изображения**):

- 1) увеличенным или уменьшенным;
- 2) прямым или обратным;
- 3) действительным или мнимым.

Так, изображение S' на рис. 184 является как бы увеличенным ($H > h$), как бы обратным (изображение находится по другую сторону от главной оптической оси по сравнению с предметом S) и действительным (изображение дается пересечением действительных преломленных лучей).

Чтобы построить изображение произвольного предмета в линзе, нужно найти изображение каждой точки этого предмета.

⁷Далее предполагается, что речь идет о тонких линзах.

106 Глаз

Пусть *нормальный* глаз рассматривает сначала очень удаленный предмет, а затем — предельно близкий, который можно четко рассмотреть (рис. 185).

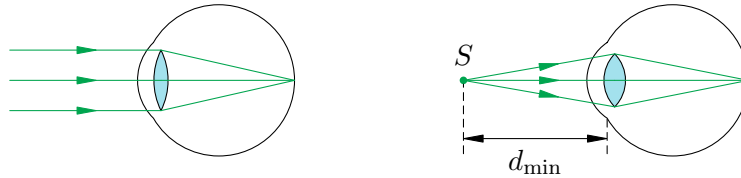


Рис. 185. Рассматривание очень далекого предмета и предельно близкого

Если предмет очень далеко от глаза (рис. 185, слева), то до глаза от предмета доходят параллельные лучи, преломляющиеся *хрусталиком* (обозначен светло-голубым цветом), который является собирающей линзой (хрусталик может менять свою кривизну — тем самым меняется его фокусное расстояние). Изображение предмета (точка пересечения лучей) получается на *сетчатке* (задней внутренней поверхности глаза). В этом случае глазные мышцы не напряжены, а хрусталик не деформирован.

Если предмет рассматривается глазом с предельно близкого расстояния $d_{\min}$ (рис. 185, справа), то хрусталик максимально деформирован (искривлен). Лучи после прохождения хрусталика также собираются в одной точке на сетчатке глаза (при дальнейшем приближении предмета к глазу преломленные лучи уже не фокусируются в одну точку — изображение становится размытым).

Расстояние наилучшего зрения для нормального глаза составляет 25 см. На таком расстоянии предмет можно рассматривать без напряжения довольно долгое время (хрусталик деформирован не сильно).

Близорукий глаз фокусирует параллельные лучи *перед* сетчаткой — изображение удаленного предмета оказывается размытым (рис. 186, слева).



Рис. 186. Близорукость и ее коррекция

Близорукость корректируют *рассеивающей* линзой (рис. 186, справа).

Дальнозоркий глаз фокусирует параллельные лучи *за* сетчаткой — изображение удаленного предмета оказывается размытым (рис. 187, слева).

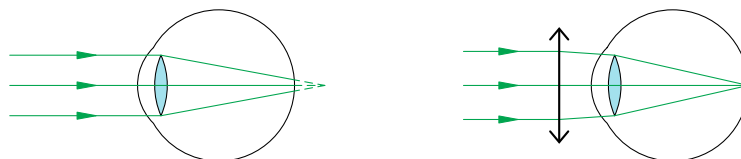


Рис. 187. Дальнозоркость и ее коррекция

Дальнозоркость корректируют *собирающей* линзой (рис. 187, справа).

Глава 14

Волновая оптика

107 Сложение световых волн

Свет — это электромагнитные *волны*, поэтому распространение света можно представлять себе как поток волн. (Сказанное далее относится к волнам любой природы, речь о световых волнах идет для определенности.)

Принцип суперпозиции волн. При наложении волн света в некоторой точке пространства их напряженности (индукции) складываются.

Имеются два важных случая сложения волн (рис. 188).

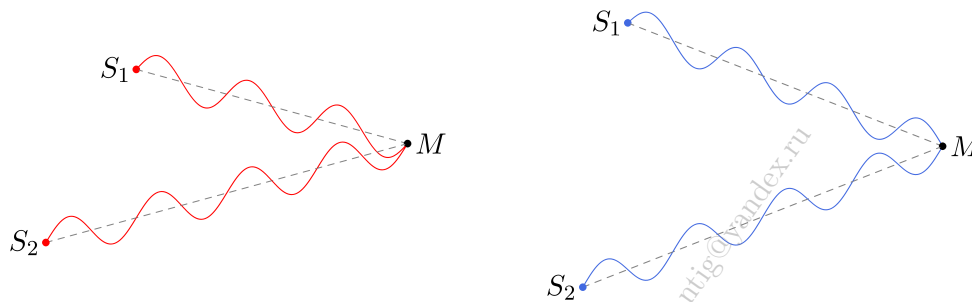


Рис. 188. Наложения двух волн в точке пространства

Пусть точечные источники S_1 и S_2 являются *когерентными* (то есть они излучают свет *одинаковой частоты*¹ и имеют *постоянную разность фаз*; в данном случае разность фаз равна нулю — источники «колеблются» одинаково). Волны от этих источников накладываются друг на друга в точке M .

На рис. 188 (слева) разность расстояний $\Delta = S_2M - S_1M$ (*разность хода*) равна длине волны ($\Delta = \lambda$). В этом случае волны в точке M складываются *в фазе* — в точке M достигается *максимально возможная освещенность* от данных источников.

Условие максимума. При наложении когерентных волн освещенность в данной точке максимальна, если разность хода равна *целому числу* длин волн:

$$\Delta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (145)$$

На рис. 188 (справа) разность хода $\Delta = S_2M - S_1M$ составляет половину длины волны ($\Delta = \lambda/2$). Теперь волны в точке M складываются *в противофазе* — в точке M достигается *минимально возможная освещенность* от данных источников.

Условие минимума. При наложении когерентных волн освещенность в данной точке минимальна, если разность хода равна *полуцелому числу* длин волн:

$$\Delta = m\lambda + \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (146)$$

Если разность хода принимает какое-то иное значение, не равное целому или полуцелому числу длин волн, тогда волны, приходящие в данную точку, создают в ней колебания с некоторой промежуточной освещенностью (больше минимально возможной освещенности, но меньше максимально возможной).

¹Свет одной частоты (одного цвета) называется *монохроматическим* светом. Белый свет не является монохроматическим: он представляет собой смесь волн с разными частотами (эти частоты отвечают цветам от красного до фиолетового).

108 Интерференция света

Интерференция света — это сложение волн света в пространстве, при котором возникает *интерференционная картина*, то есть фиксированное, не зависящее от времени распределение мест максимумов и минимумов освещенности². Устойчивая интерференционная картина будет образована при наложении волн от *когерентных* источников.

На рис. 189 показана интерференционная картина, созданная наложением волн двух когерентных точечных источников.

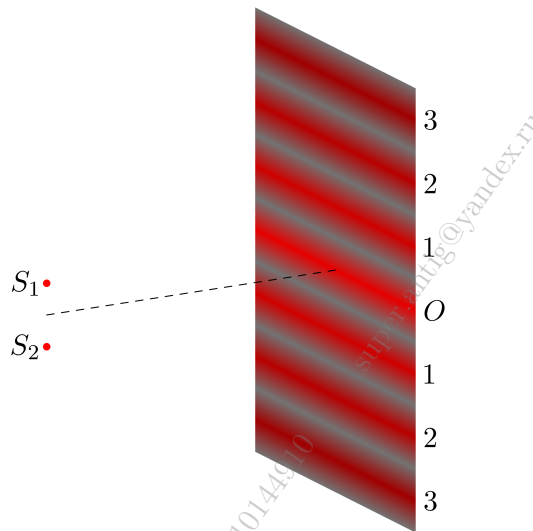


Рис. 189. Интерференция волн двух точечных источников

Источники S_1 и S_2 (красного света) находятся достаточно далеко от серого экрана (непрозрачной плоскости), на котором наблюдается картина. Ось симметрии интерференционной картины отмечена штриховой линией.

В этом случае интерференционная картина представляет собой практически чередование как бы светлых и темных полос (*интерференционные полосы*). Светлые полосы — это сильно освещенные места, или *интерференционные максимумы* (на рис. 189 обозначены красным цветом); темные полосы — это слабо освещенные места, *интерференционные минимумы* (на рис. 189 обозначены серым цветом). При переходе от некоторой полосы к соседней освещенность меняется плавно.

На центральной светлой полосе³, обозначенной буквой O , расположены так называемые *центральные максимумы*. Ближайшие к центральной (сверху и снизу) две соседние светлые полосы — это полосы первых максимумов (обозначены цифрами 1). Сразу за ними (с удалением от центра картины) следуют полосы вторых максимумов, обозначенные цифрами 2 (и так далее: цифры 3 обозначают, соответственно, полосы третьих максимумов).

По мере удаления от центра картины она становится все менее контрастной и на некотором расстоянии от центра вообще исчезает. Если бы источники на рис. 189 излучали белый свет, то полосы максимумов (кроме центральной полосы) состояли бы из полосок всех цветов радуги.

²Вообще интерферировать могут волны любой природы.

³Через нее проходит ось симметрии картины.

109 Дифракция света

Дифракция света — это огибание световыми волнами краев препятствия. (Дифракция свойственна волнам любой природы.)

Пусть волна падает на экран с достаточно узкой щелью (рис. 190).

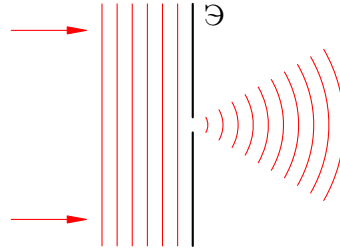


Рис. 190. Дифракция на щели

В данном случае на экран Э слева падает *плоская* волна: ее «гребни» выстроены вдоль параллельных линий (обозначенных красным цветом). После прохождения щели волна становится практически *сферической*: «гребни» лежат на дугах концентрических окружностей (волна расходится)! Расходящаяся волна заходит в область предположительной тени от экрана.

Пусть на **дифракционную решетку** — совокупность узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками, — падает плоская волна света (рис. 191).

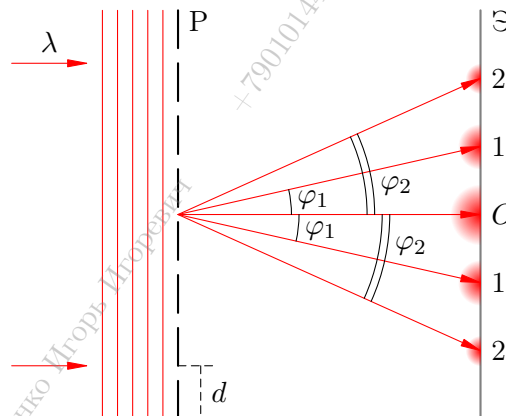


Рис. 191. Дифракция на решетке

На решетку P с периодом⁴ d падает плоская волна красного света с длиной волны λ . На экране Э за решеткой наблюдается интерференционная картина — чередование максимумов и минимумов интерференции (места сильной освещенности отмечены красными полукругами — это центральный максимум O (в центре картины), а также первые и вторые максимумы, расположенные симметрично относительно максимума O и обозначенные цифрами 1 и 2). Направления, например, на первый и второй максимумы (относительно направления на центр картины) задают углы φ_1 и φ_2 соответственно.

Формула дифракционной решетки описывает положения максимумов (с номерами m) на экране:

$$d \sin \varphi_m = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (147)$$

⁴Период решетки есть ширина щели плюс ширина непрозрачного промежутка.

110 Дисперсия света

Прежде всего нужно сказать, что белый (солнечный) свет является смесью световых пучков разных цветов, а именно — смесью волн всего видимого диапазона (от красного до фиолетового).

На рис. 192 показан *спектр* белого света — полоса со всеми цветами радуги, плавно переходящими друг в друга.

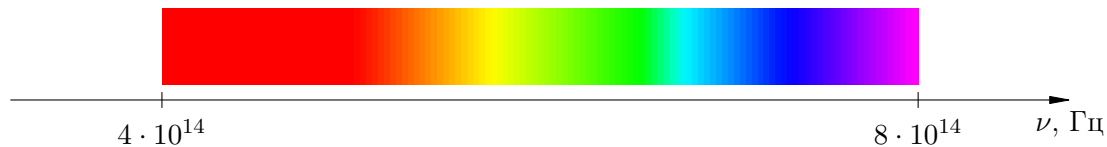


Рис. 192. Спектр белого света

Каждому цвету соответствует волна определенной частоты в диапазоне видимого света (волны с частотами примерно от $4 \cdot 10^{14}$ Гц до $8 \cdot 10^{14}$ Гц). Красный свет имеет наименьшую частоту, а фиолетовый — наибольшую.

В спектре белого света удобно выделять семь цветов — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый⁵. Так цвета перечислены в *порядке возрастания частоты* света (см. рис. 192).

Дисперсия света — это зависимость преломляемости луча света от его частоты (на данной границе сред).

Пусть узкий луч солнечного света падает на стеклянную призму (рис. 193).

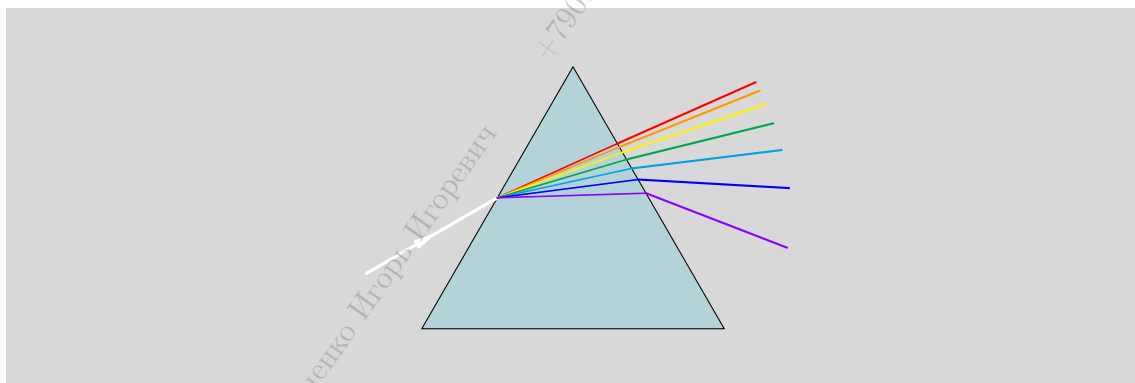


Рис. 193. Дисперсия света

Можно считать, что на призму падают разноцветные лучи, смешанные в один луч (эту «смесь» глаз воспринимает как белую). Преломление цветных лучей при вхождении в призму оказывается разным (на рис. 193 ход лучей показан качественно): *при переходе от красного цвета к фиолетовому (при увеличении частоты света) отклонение цветного луча увеличивается*.

Зависимость показателя преломления среды от частоты света имеет вид⁶:

$$n \sim \nu. \quad (148)$$

⁵Для запоминания цветов можно использовать такое правило: «каждый охотник желает знать, где сидит фазан» (первые буквы слов фразы соответствует первым буквам цветов).

⁶Эта зависимость («чем больше ν , тем больше n ») работает на очень малых изменениях частоты, но ей можно пользоваться для качественных ответов: например, показатель преломления для синего цвета больше показателя преломления для зеленого и т. д.

Глава 15

Основы специальной теории относительности (СТО)

111 Принципы СТО

Экспериментально установлено, что *свет распространяется в вакууме только с одной скоростью, равной примерно:*

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (149)$$

Отличие распространения света от, например, движения тел «в обычной жизни» состоит в том, что *скорость света от любых источников в вакууме одинакова для всех наблюдателей в любых инерциальных системах отсчета.*

Пусть имеются два наблюдателя, измеряющих скорость света от одного источника (рис. 194; этот рисунок носит иллюстративный характер).

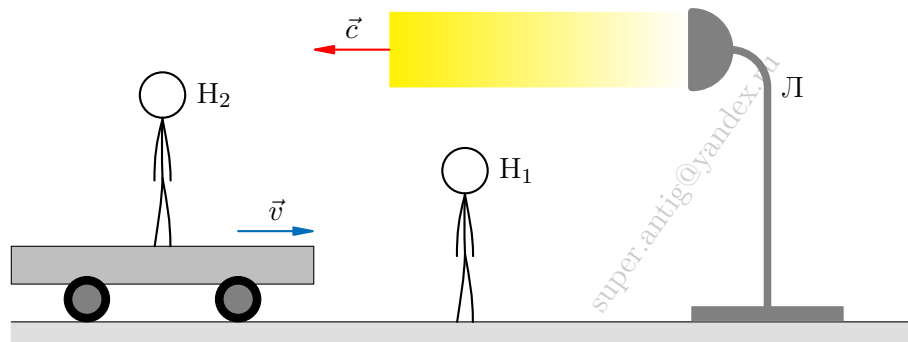


Рис. 194. Наблюдатели фиксируют одинаковую скорость света

Пусть наблюдатели и источник света располагаются вблизи планеты без атмосферы (вокруг вакуум). Наблюдатель H_1 стоит на поверхности планеты, а наблюдатель H_2 стоит на тележке, движущейся с постоянной скоростью $\vec{v}$ (относительно планеты). Источник света — лампа Л.

Оказывается, что приборы каждого из этих наблюдателей показывают одно и то же значение скорости света $\vec{c}$ — свет «проносится» мимо наблюдателя H_2 с такой же скоростью, как и мимо наблюдателя H_1 . Это значит, что аналогия с ветром (как бы дующим из лампы) в случае со светом не работает.

В описанном опыте применительно к свету классическая механика отказывает, так как она предназначена для описания движений тел со скоростями, много меньшими скорости света: классическая механика требует у тела такую скорость v , что $v \ll c$.

Для описания движения любых материальных объектов (в том числе света и тел, скорости v которых не удовлетворяют соотношению $v \ll c$) Эйнштейн предложил новое учение — *специальную теорию относительности (СТО)*. В основе СТО лежат два принципа.

Принцип относительности Эйнштейна. Всякое физическое явление при одних и тех же начальных условиях протекает одинаково в любой инерциальной системе отсчета.

Принцип инвариантности скорости света. В каждой инерциальной системе отсчета свет движется в вакууме с одной и той же скоростью.

Эти принципы называют постулатами Эйнштейна. Одним из удивительных следствий этих постулатов является то, что *скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью движения любого материального объекта* (в том числе физического поля: гравитационного, электромагнитного и т. д.).

112 Основные формулы СТО

Пусть изолированное тело¹ покоится в данной системе отсчета. Согласно Эйнштейну это тело обладает так называемой **энергией покоя**:

$$E_0 = mc^2. \quad (150)$$

Формула (150) утверждает, что любое тело обладает энергией просто потому, что оно существует. Соотношение (150) называют *формулой Эйнштейна*.

Пусть теперь изолированное тело движется в некоторой системе отсчета. Тогда его **полная энергия**² в этой системе вычисляется по формуле:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (151)$$

где v — скорость тела.

Выражение для энергии (151) позволяет сделать следующие выводы о возможных скоростях движения материальных объектов.

- При $v \rightarrow c$ полная энергия массивного тела стремится к бесконечности ($E \rightarrow \infty$), что невозможно. Это значит, что *скорость v массивного тела всегда меньше скорости света в вакууме: $v < c$.*
- Энергия безмассовой частицы (например, фотона) по формуле (151) получается нулевой, хотя тот же фотон (как частица света) энергию имеет! Поэтому приходится принять, что *безмассовая частица всегда движется со скоростью света в вакууме*³ (тогда формула (151) просто отказывает — формулы для энергии безмассовых частиц находят в квантовой физике).

Релятивистский импульс⁴ движущегося тела равен:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (152)$$

Связь энергии и импульса есть следующее соотношение:

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2. \quad (153)$$

Задача. Мощность общего излучения Солнца $3,83 \cdot 10^{26}$ Вт. На сколько в связи с этим уменьшается каждую секунду масса Солнца?

Решение. С учетом определения мощности энергия, отдаваемая каждую секунду Солнцем, равна: $\Delta E = P \cdot t = 3,83 \cdot 10^{26} \cdot 1 = 3,83 \cdot 10^{26}$ Дж.

Ясно, что «неподвижное» Солнце теряет свою энергию покоя, значит его масса уменьшается (формула (150)). Поскольку в формуле (150) энергия покоя тела прямо пропорциональна его массе, то искомое изменение массы равно:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{3,83 \cdot 10^{26}}{(3 \cdot 10^8)^2} \approx 4,26 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

¹Изолированное тело — это тело, практически не взаимодействующее с другими телами.

²Или просто энергия.

³Согласно СТО даже в среде безмассовая частица движется со скоростью c света.

⁴Релятивистский — значит устанавливаемый в СТО.

Часть V

Квантовая физика

Глава 16

ФОТОНЫ

113 Фотоэффект

Эйнштейн в поисках объяснения результатов опытов по взаимодействию света¹ с веществом пришел к выводу, что свет (*и электромагнитное излучение вообще*) состоит из отдельных порций — квантов (или, как говорят, *фотонов*)². Таким образом, стали считать, что свет — это поток особых частиц (фотонов), движущихся в вакууме со скоростью c .

Энергия фотона пропорциональна частоте излучения:

$$E_{\text{ф}} = h\nu, \quad (154)$$

где h — *постоянная Планка* (см. справочные таблицы).

Фотоэффект — это вырывание электронов из тела падающим светом. Явление фотоэффекта было исследовано Столетовым с помощью специального устройства, основная часть которого показана на рис. 195.

Главная часть этого устройства состоит из двух металлических пластин — пластина А (анод) и пластина К (катод). К пластинам от батарейки подводится напряжение U (на анод подан «плюс», а на катод — «минус»). В данном случае напряжение U считается положительным (его знак определяется знаком анода).

При освещении катода, например, ультрафиолетовым светом его фотоны (желтые шары) выбивают с катода электроны (синие шары), которые разгоняются электрическим полем (созданным пластинами) в сторону анода. Достигшие анода выбитые электроны (*фотоэлектроны*) устремляются к «плюсу» — через батарейку протекает ток $I_{\text{ф}}$, называемый *фототоком* (потому что его создают фотоэлектроны).

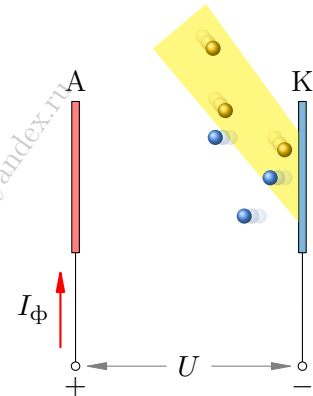


Рис. 195. Фотоэффект

Три *закона фотоэффекта* формулируются так.

- I.** Число электронов, вырываемых из катода за секунду, пропорционально мощности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте)³:

$$N_{\text{фэ}} \sim P_{\text{изл}}. \quad (155)$$

- II.** Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от мощности падающего излучения⁴:

$$E_{\text{к. max}} \sim \nu. \quad (156)$$

- III.** Фотоэффект наблюдается только при частотах, больших некоторой частоты $\nu_{\text{кр}}$, называемой *красной границей фотоэффекта* и зависящей от облучаемого вещества:

$$\nu > \nu_{\text{кр}}. \quad (157)$$

¹Здесь и далее любое электромагнитное излучение называется для краткости светом.

²Эйнштейн развил идею Планка (*гипотезу Планка*), которая состоит в том, что свет излучается и поглощается отдельными порциями (квантами).

³Мощность падающего излучения — это отношение суммарной энергии фотонов, попадающих на облучаемое тело, ко времени, за которое эти фотоны попали на тело.

⁴Эту зависимость можно использовать только для качественных ответов: например, чем больше частота излучения, тем больше максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

114 Формулы для фотоэффекта

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта позволяет объяснить все экспериментально установленные законы фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{\text{к. max}}, \quad (158)$$

где $h\nu$ — энергия фотона, $A_{\text{вых}}$ — *работа выхода*⁵ (см. справочные таблицы), $E_{\text{к. max}}$ — *максимальная кинетическая энергия* фотоэлектронов.

Формула (158) есть закон сохранения энергии: энергия фотона идет на совершение работы по «вытаскиванию» электрона из вещества и на придание электрону кинетической энергии.

Работа выхода вычисляется через красную границу фотоэффекта⁶:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}}. \quad (159)$$

Минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ («критическая частота»), при которой еще возможен фотоэффект, есть частота, при которой преломляется полученный из эксперимента график зависимости максимальной кинетической энергии $E_{\text{к. max}}$ фотоэлектронов от частоты ν света (рис. 196, слева; облучаемое вещество не меняется). Ход графика на рис. 196 (слева) объясняется формулой (158), если в ней выразить энергию $E_{\text{к. max}}$ и учесть, что энергия не может быть отрицательна.

Запирающее напряжение (U_z [В]) — это минимальная величина напряжения в опыте по исследованию явления фотоэффекта, при котором фототок равен нулю (это значит, что фотоэлектроны практически достигают анода, но их скорость у анода равна нулю).

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов находится через запирающее напряжение⁷:

$$E_{\text{к. max}} = eU_z, \quad (160)$$

где e — заряд электрона (см. таблицы).

Запирающее напряжение U_z есть напряжение, при превышении которого появляется фототок (см. график зависимости фототока $I_{\text{ф}}$ от напряжения U при постоянных мощности и частоте света на рис. 196, справа; при достаточно больших положительных напряжениях ток достигает предельной величины $I_{\text{н}}$, называемой *током насыщения*).

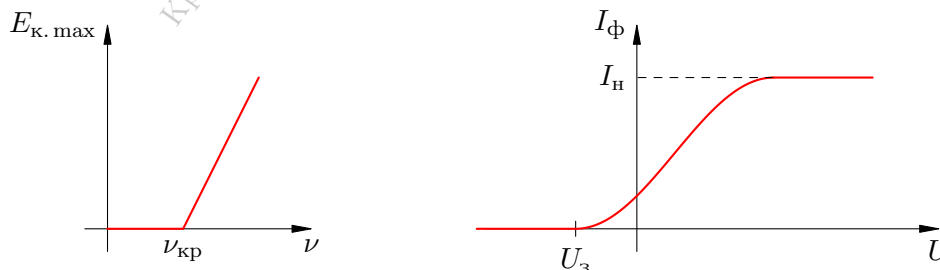


Рис. 196. Зависимости $E_{\text{к. max}}(\nu)$ и $I_{\text{ф}}(U)$ для фотоэффекта

⁵Минимальная энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы он покинул вещество.

⁶Красная граница фотоэффекта ($\nu_{\text{кр}}$) — термин, *не связанный с цветом* света! Для избежания лишних ассоциаций вместо этого термина используют термин «критическая частота».

⁷Фактически это запись закона изменения энергии: работа электрического поля равна изменению механической энергии тела.

115 Давление света

Опыт показывает, что свет оказывает давление на освещаемую поверхность (подобно тому как поток жидкости давит на стенку, в которую он врзается).

Пусть два одинаковых луча света падают под одинаковыми углами на зеркальную и черную поверхность некоторого тела соответственно (рис. 197).



Рис. 197. Падение света на зеркальную и черную поверхность

Пусть зеркальная поверхность полностью отражает свет (рис. 197, слева), а черная — полностью его поглощает (рис. 197, справа). Оказывается (при прочих равных условиях), *давление света на абсолютно отражающую поверхность в два раза больше его давления на абсолютно поглощающую поверхность.*

Давление света получает простое объяснение, если свет рассматривать как поток частиц (фотонов). Пусть для простоты за одну секунду на поверхность тела падает только один фотон (рис. 198).

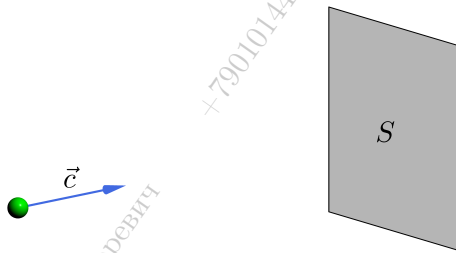


Рис. 198. Падение фотона на поверхность тела

Падающий фотон движется перпендикулярно поверхности площади S в вакууме со скоростью света $\vec{c}$. При столкновении с поверхностью фотон (подобно мячу) оказывает на нее давление P . Из классических представлений это давление равно: $P = F/S$, где F — сила, действующая на площадку. Сила F , также действующая на фотон, есть скорость изменения импульса фотона $\Delta p/\Delta t$. После отражения фотон движется с прежними скоростью и импульсом p (начальный импульс), но в обратном направлении: изменение его импульса равно $2p$. Согласно СТО импульс фотона (фотон не имеет массу) равен $E_{\text{ф}}/c$, где $E_{\text{ф}}$ — энергия фотона. Энергия света, поступающая на поверхность, связана с мощностью N падающего излучения так: $E = N \cdot \Delta t$. С учетом сказанного после упрощений формула для давления приобретает вид: $P = \frac{2N}{c \cdot S}$. То есть давление света зависит от мощности излучения и площади поверхности.

В случае поглощения фотон как бы «застревает» в поверхности, и изменение его импульса тогда равно p — коэффициент 2 в полученной формуле для давления убирается, так что давление в этом случае при прочих равных условиях уменьшается в два раза по сравнению с отражением!

116 Постулаты Бора

Планетарная модель атома предполагает, что вокруг ядра электроны движутся как бы по окружностям, а значит, имеют ускорения. Как известно, ускоренно движущиеся заряды излучают электромагнитные волны, уносящие энергию этих зарядов. Получается, что теряя энергию, электроны должны в конце концов прекратить свое движение и упасть на ядро. Итак, классическая физика предсказывает «схлопывание» атома — то есть его неустойчивость, что противоречит опыту.

Для разрешения этого противоречия Бор предложил такие три постулата.

- I.** Атом (система атомов) может находиться только в особых (стационарных) состояниях, в которых энергия атома принимает определенные значения $E_1, E_2, \dots$. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает энергию. На рис. 199 изображена модель атома водорода по Бору.

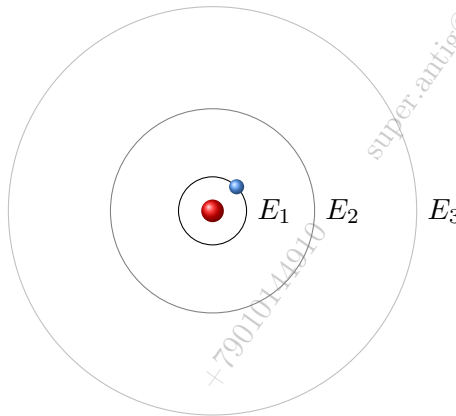


Рис. 199. Модель атома водорода по Бору

В атоме вокруг ядра электрон может «летать» только по *стационарным орбитам* (окружности на рисунке). Двигаясь по одной из таких орбит, электрон не излучает. Каждой стационарной орбите отвечает определенное значение из набора *уровней энергии* атома $E_1, E_2, \dots$

- II.** При переходе из состояния с большей энергией E_n в состояние с меньшей энергией E_k атом излучает фотон с энергией

$$E_{\text{ф}} = E_n - E_k. \quad (161)$$

Атом также может перейти из состояния E_k в состояние с большей энергией E_n , поглотив фотон, но только такой, энергия которого удовлетворяет соотношению (161).

- III.** Значения скорости v электрона и радиуса r его орбиты могут принимать только дискретный набор значений так, что выполняется условие:

$$mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (162)$$

где m — масса электрона (см. таблицы), $\hbar = h/2\pi$ («аш с чертой»; деление постоянной Планка на 2π).

Энергия атома водорода на уровне n по Бору равна: $E_n = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{n^2}$.

117 Спектры

Опыт показывает, что белый свет разлагается в *сплошной спектр* — полосу со всеми цветами радуги, плавно переходящими друг в друга (рис. 200).



Рис. 200. Сплошной спектр

Спектр называется сплошным (или непрерывным) потому, что в нем присутствуют все частоты видимого диапазона — то есть все возможные цвета, получающиеся плавным переходом от красной границы до фиолетовой. Оказывается, что любые тела в любом агрегатном состоянии⁸ с высокой температурой дают излучение со сплошным спектром.

Однако, очень разреженный *атомарный* газ, нагретый достаточно сильно, излучает свет с *линейчатым спектром* — спектром, состоящим из отдельных тонких линий. Выделяют два вида линейчатых спектров.

1. **Спектр испускания** образован тонкими отдельно стоящими разноцветными линиями. На рис. 201 показан спектр испускания для водорода (в видимом диапазоне).



Рис. 201. Линейчатый спектр испускания для водорода

Каждому химическому элементу (каждому виду атомов) соответствует свой уникальный набор линий спектра. Так как газ разрежен, то можно считать что каждый его атом излучает независимо от соседних атомов. Поэтому можно заключить, что *атом характеризуется определенным набором частот (или длин волн в вакууме) излучаемого света*.

2. **Спектр поглощения** образован тонкими отдельно стоящими темными линиями. На рис. 202 показан спектр поглощения для водорода (в видимом диапазоне).



Рис. 202. Линейчатый спектр поглощения для водорода

Спектр поглощения получается, если через разреженный атомарный газ, охлажденный достаточно сильно, пропустить свет со сплошным спектром. Данный химический элемент как бы «забирает себе» только определенные частоты из непрерывного спектра. Так, водород «поглощает» те частоты, которые излучает сам и которые отражены в его спектре испускания (см. рис. 201).

⁸Газы должны быть довольно плотными.

118 Атомное ядро

Общепризнанной моделью атомного ядра является *нуклонная* модель: ядро состоит из протонов и нейтронов (общее название этих частиц — *нуклоны*).

Зарядовое число (Z) — это число протонов в ядре. Если заряд протона обозначить q_p , то заряд ядра равен Zq_p . Нейтральный атом несет в себе также Z электронов (заряд ядра равен по величине сумме зарядов электронов). Получается, что зарядовое число есть порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева.

Массовое число (A) — это число нуклонов в ядре. Таким образом, число нейтронов в ядре равно $A - Z$.

Ядро любого химического элемента обозначается так: A_ZX (под X подразумевается символ химического элемента). Например, ядро железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ состоит из 56 нуклонов, а именно из 26 протонов и 30 нейтронов.

Изотопами называются разновидности атомов одного химического элемента, *различающиеся только числом нейтронов* в ядре. При этом изотопы проявляют одинаковые химические свойства, так как эти свойства определяются числом электронов в атоме, а значит — зарядовым числом Z ядра, которое для каждого изотопа есть величина постоянная.

На рис. 203 условно изображены три изотопа водорода.

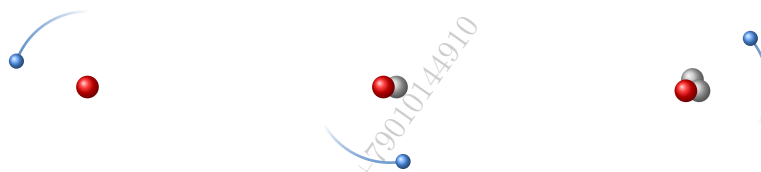


Рис. 203. Изотопы водорода

У водорода три изотопа (на рисунке 203 красные шары — протоны, серые — нейтроны, синие — электроны): протий ${}^1_1\text{H}$ (рис. 203, слева), дейтерий ${}^2_1\text{H}$ (рис. 203, посередине) и тритий ${}^3_1\text{H}$ (рис. 203, справа).

Нуклоны внутри ядра удерживаются так называемыми *ядерными силами* (которые относят к сильному взаимодействию). Для того, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, нужно *совершить работу* против ядерных сил, скрепляющих нуклоны между собой в ядре (аналогия: совершение работы для разрыва куска резины).

Энергия связи ядра ($E_{\text{св}}$)⁹ — это минимальная энергия, которую нужно затратить для разделения ядра на составляющие его нуклоны. Оказывается, *сумма масс отдельно взятых нуклонов, составляющих ядро, больше массы ядра* на величину, называемую **дефектом масс**:

$$\Delta m = (M_p + M_n) - m_{\text{ядра}}, \quad (163)$$

где M_p — масса всех протонов, а M_n — масса всех нейтронов ядра¹⁰.

Дефекту масс Δm данного ядра отвечает его энергия связи¹¹: $E_{\text{св}} = \Delta m c^2$.

⁹Энергии атомов и элементарных частиц удобнее измерять в *электронвольтах* (эВ): 1 эВ есть энергия, которая приобретается электроном при прохождении ускоряющего напряжения 1 вольт: 1 эВ $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\cdot$ 1 В = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

¹⁰Массы элементарных частиц (а также атомов) можно найти в справочных таблицах.

¹¹По формуле Эйнштейна $E = mc^2$.

119 Радиоактивность. Ядерные реакции

Радиоактивность — это самопроизвольное (спонтанное) превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц (например, электронов, протонов, фотонов и др.). Явление радиоактивности называют еще *радиоактивным распадом*. Выделяют следующие основные типы таких распадов.

- При **альфа-распаде** ядро испускает ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ (α -частицу):



- При **бета-распаде** ядро дает электрон ${}^0_{-1}e$ (β -частицу):



Также может происходить так называемый *позитронный бета-распад*, при котором ядро выбрасывает *позитрон* ${}^0_{+1}e$ — частицу с массой электрона, но с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона (позитрон — это как бы «положительно заряженный электрон»). В связи с этим формула (165) описывает, как говорят, *электронный бета-распад*. (Также α - и β -распады могут сопровождаться испусканием γ -излучения (γ -лучей) — электромагнитных волн чрезвычайно высокой частоты с большой проникающей способностью.)

Период полураспада (T) — это время, за которое исходное количество радиоактивных ядер *убывает вдвое*. Каждый радиоактивный изотоп имеет определенный период полураспада.

Закон радиоактивного распада позволяет найти число N *нераспавшихся* радиоактивных ядер спустя время t после начала наблюдения:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (166)$$

где N_0 — начальное число радиоактивных ядер.

График зависимости $N(t)$ числа нераспавшихся ядер радиоактивного элемента от времени представлен на рис. 204. Из рисунка видно: за период полураспада T число «целых» ядер уменьшается в два раза (это справедливо при любом начальном числе нераспавшихся ядер).

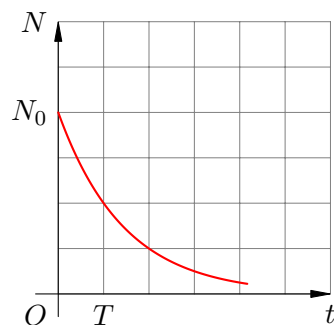


Рис. 204.
Зависимость $N(t)$

Ядерными реакциями называют превращения ядер, вызванные их взаимодействием друг с другом или с налетающими на них частицами. Исторически первой ядерной реакцией, осуществленной человеком, была реакция превращения ядра азота в ядро кислорода:



При любых ядерных превращениях (см. формулы (164), (165) и (167)) соблюдаются два закона — законы сохранения массового и зарядового чисел.

1. Сумма массовых чисел ядер и частиц до реакции равна сумме массовых чисел ядер и частиц после реакции. По формуле (167): $14 + 4 = 17 + 1$.
2. Сумма зарядовых чисел ядер и частиц до реакции равна сумме зарядовых чисел ядер и частиц после реакции. Из формулы (167) видно: $7 + 2 = 8 + 1$.

Часть VI

Приложение

Глава 17

Как решать задачи по физике

120 Как найти ответ к задаче

В начале изучения физики приходится решать задачи, но так как опыта нет, то для упражнения нужно научиться просто находить ответ к классическим задачам. На примере следующей задачи покажем, как это можно делать на основе общих соображений.

Задача. Трактор за первые 5 мин проехал 600 м. Какой путь он пройдет за 0,5 ч, двигаясь с той же скоростью?

Мы знаем, что для решения нам нужно начать с формулы. Смотрим в пособие по физике и видим, что путь S равен

$$S = vt, \quad (168)$$

где v, t — скорость тела и время его движения.

К чему это? Можно по ней что-то найти. Мы видим связанные 5 мин и 600 м, и их подстановка в формулу дает

$$600 = v \cdot 5 \quad \Rightarrow \quad v = 120 \text{ м/мин.}$$

Так по частям можно решать любую задачу. Что дальше? Ведь нужно найти «какой-то путь»...

Можно понять что найти-то нужно путь «второй» (600 м — это «первый» путь).

Но любой путь при равномерном движении находится по формуле (168). Для второго пути есть время, не хватает для него скорости. Но скорость-то будет такая же! Находим второй путь:

$$S_2 = 120 \cdot 30 = 3600 \text{ м}$$

(тут перевели 0,5 ч в 30 мин, чтоб «подходило»).

Здесь вкратце показан простейший пример творческих рассуждений при решении задачи по физике. Развитие умения творчески рассуждать, а не решать по алгоритмам и т. п., поможет впоследствии перейти к задачам вплоть до олимпиадного уровня.

... математика есть весьма подсобный предмет для физики, она очень помогает, но это, во всяком случае, не есть что-то необходимое.

(П. Капица. «Как следует изучать физику».)

... Вы правильно пришли к выводу, что надо меньше думать об основах. Главное, чем надо овладеть, — это техникой работы, а понимание тонкостей само придет потом.

(Л. Ландау. Из писем.)

... путь к ответу — это индивидуальный и увлекательный научный поиск. И этот творческий процесс нельзя заменить изучением рецептов решения задач.

(О. Я. Савченко. «Задачи по физике».)

121 Специальные записи

Часто случается, что для решения задачи необходимо сделать **специальные записи**. Например, задачи на силы решаются на основе рисунков и уравнений сил и т. д.

Приведем основные такие случаи и укажем соответствующие специальные записи.

1. **Сложное движение.** Если движение тела сложное, то выберите ось, по которой движение тела описать несложно и запишите формулы движения по этой оси.
2. **Силы.** Если задача может быть связана с силами, то сделайте рисунок, покажите силы, действующие на тело, и ускорение. Далее запишите уравнения сил по осям, которые видите удобными: $\pm F_1 \pm F_2 \pm \dots = \pm ma$.
3. **Равновесие.** Если задача связана с покоем «длинного» тела (т. е. нельзя не учесть его размеры), то сделайте рисунок, покажите силы, действующие на тело. Далее запишите уравнения сил по осям, которые видите удобными: $\pm F_1 \pm F_2 \pm \dots = \pm ma$ и запишите уравнение моментов относительно удобной точки: $\pm M_1 \pm M_2 \pm \dots = 0$.
4. **Гидравлический пресс, сообщающиеся сосуды.** Запишите уравнение прессы или сосудов: $P_{\text{л}} = P_{\text{п}}$, где $P_{\text{л}}$ и $P_{\text{п}}$ — давления в левом и правом сосудах.
5. **Столкновение (расталкивание) тел.** Если тела сталкиваются и т. д., то сделайте рисунки с телами до и после столкновения, покажите импульсы тел. Далее запишите закон сохранения импульса на соответствующую ось: $\pm p_1 \pm p_2 \pm \dots = \pm p'_1 \pm p'_2 \pm \dots$
Если взаимодействие тел упругое, то для системы тел также выполняется закон сохранения полной механической энергии: $E_1 = E_2 = \dots$
6. **Энергия (механическая).** Если в условии мало данных и/или речь про энергии, то полезно показать рисунки со всеми ключевыми положениями тел. Далее запишите закон сохранения полной механической энергии для тел или системы: $E_1 = E_2 = \dots$
7. **Смесь газов.** Запишите закон Дальтона: $P_{\text{см}} = P_{1\text{см}} + P_{2\text{см}} + \dots$
8. **Теплообмен.** Если тела «смешивают»: одни принимают тепло, другие — отдают, то перечислите все процессы с каждым телом (каждому процессу соответствует своя теплота: $Q_1, Q_2, \dots$). Запишите уравнение теплового баланса: $\pm Q_1 \pm Q_2 \pm \dots = 0$.
9. **Энергия и газ.** Если идет речь о газе в совокупности с энергией/работой, запишите первый закон термодинамики: $Q = \Delta U + A$.