



**Библиотека бакалавра**

*100-летию ДонНТУ  
посвящается*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева**

# **КУРС ФИЗИКИ**

В двух томах

Учебное пособие  
для обучающихся образовательных учреждений  
высшего профессионального образования

**Том 1**

- **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**
- **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**
- **ЭЛЕКТРОСТАТИКА**
- **ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**
- **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

Донецк  
2019

**УДК 53(075.8)**  
**ББК 22.3я7**  
**В 67**

Рекомендовано Учёным советом  
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»  
в качестве учебного пособия для обучающихся образовательных учреждений  
высшего профессионального образования  
(Протокол № 7 от 25.10.2019 года)

**Рецензенты:**

Мирошников Вадим Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы» Луганского национального университета им. Владимира Даля

Петренко Александр Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и нанотехнологий Донецкого национального университета, академик Академии технологических наук

**Авторы:**

Волков Александр Фёдорович – кандидат технических наук, профессор кафедры физики ГОУВПО «ДОННТУ»

Лумпиева Таисия Петровна – доцент кафедры физики ГОУВПО «ДОННТУ»

**Волков, А. Ф.**

**В 67** Курс физики : учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. образования. В 2 т. Т. 1 : Физические основы механики. Молекулярная физика и термодинамика. Электростатика. Постоянный электрический ток. Электромагнетизм / А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева ; ГОУВПО «ДОННТУ». – Изд. 2-е, испр. и доп. – Донецк : ДОННТУ, 2019. – 299 с.

Учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Физика» для обучающихся образовательных учреждений высшего профессионального образования. Содержание первого тома составляют разделы: физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика, электростатика и постоянный электрический ток, электромагнетизм. Изложение материала ведётся без громоздких математических выкладок, основной акцент делается на физическую суть явлений и описывающих их законов.

**УДК 53(075.8)**  
**ББК 22.3я7**

## СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения .....	9
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	13
ВВЕДЕНИЕ .....	14
§1 Предмет физики .....	14
§2 Общие сведения .....	15
§3 Основные сведения о векторах .....	17
ЧАСТЬ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ .....	21
Глава 1. <b>Кинематика поступательного и вращательного движения</b> ...	22
§4 Кинематика материальной точки .....	22
4.1 Основные понятия кинематики .....	22
4.2 Система отсчёта. Траектория. Путь. Перемещение .....	23
4.3 Способы задания положения тела в пространстве .....	23
4.4 Характеристики поступательного движения .....	25
4.4.1 Скорость .....	25
4.4.2 Ускорение .....	26
§5 Кинематика вращательного движения .....	29
5.1 Характеристики вращательного движения .....	29
5.2 Связь между линейными и угловыми характеристиками .....	31
Глава 2. <b>Динамика поступательного и вращательного движения</b> ....	33
§6 Динамика материальной точки и поступательного движения твёрдого тела .....	33
6.1 Основные характеристики динамики поступательного движения .	33
6.2 Виды взаимодействий .....	34
6.3 Сложение сил .....	37
6.4 Разложение сил .....	37
6.5 Основные законы динамики материальной точки (законы Ньютона) .....	38
6.5.1 Первый закон Ньютона .....	38
6.5.2 Второй закон Ньютона .....	38
6.5.3 Третий закон Ньютона .....	39
6.6 Динамика системы материальных точек. Закон сохранения импульса .....	40
§7 Динамика вращательного движения .....	44
7.1 Основные характеристики динамики вращательного движения .	44
7.1.1 Момент инерции .....	44
7.1.2 Момент импульса .....	46
7.1.3 Момент силы .....	47
7.2 Основное уравнение динамики вращательного движения .....	49
7.3 Закон сохранения момента импульса .....	50

<b>Глава 3. Работа, мощность, энергия</b>	<b>53</b>
§8 Механическая работа. Мощность	53
8.1 Работа	53
8.2 Графическое представление работы	54
8.3 Мощность	54
8.4 Работа и мощность при вращательном движении	55
§9 Энергия. Закон сохранения энергии	56
9.1 Кинетическая энергия	56
9.2 Потенциальная энергия	58
9.2.1 Консервативные и неконсервативные силы	58
9.2.2 Работа и потенциальная энергия	59
9.2.3 Графическое представление потенциальной энергии	61
9.3 Закон сохранения механической энергии	62
§10 Соударение тел	64
§11 Элементы гидромеханики	68
11.1 Гидростатика	68
11.2 Гидродинамика	69
11.3 Измерение давления в потоке жидкости	72
11.4 Расчёт скорости истечения жидкости	72
<b>Глава 4. Элементы специальной теории относительности</b>	<b>74</b>
§12 Элементы специальной теории относительности	74
12.1 Принцип относительности Галилея	74
12.2 Постулаты специальной теории относительности	75
12.3 Преобразования Лоренца	76
12.4 Следствия из преобразований Лоренца	77
12.5 Основные соотношения релятивистской динамики	78
<i>Обратите внимание!</i>	83
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Физические основы механики»</i>	85
<i>Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!»</i>	91
<i>Коды ответов к тестам</i>	96
<b>ЧАСТЬ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА</b>	<b>97</b>
<b>Глава 5. Молекулярно-кинетическая теория</b>	<b>97</b>
§13 Статистический и термодинамический методы исследования	97
§14 Характеристики атомов и молекул	98
§15 Параметры состояния	99
§16 Уравнение состояния идеального газа	101
§17 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	103
§18 Молекулярно-кинетическая трактовка термодинамической температуры	104
<b>Глава 6. Статистические распределения</b>	<b>105</b>
§19 Распределение Максвелла	105

§20 Средние скорости . . . . .	108
§21 Экспериментальная проверка закона распределения Максвелла . . . . .	110
§22 Идеальный газ в однородном поле тяготения . . . . .	111
22.1 Барометрическая формула . . . . .	111
22.2 Распределение Больцмана . . . . .	112
§23 Определение числа Авогадро . . . . .	113
<b>Глава 7. Явления переноса . . . . .</b>	<b>114</b>
§24 Явления переноса . . . . .	114
24.1 Среднее число столкновений молекул в единицу времени. Средняя длина свободного пробега молекул . . . . .	114
24.2 Явления переноса в газах . . . . .	115
24.2.1 Теплопроводность газов . . . . .	115
24.2.2 Диффузия в газах . . . . .	116
24.2.3 Внутреннее трение (вязкость) газов . . . . .	118
24.3 Явления переноса в жидкостях и твёрдых телах . . . . .	119
<b>Глава 8. Физические основы термодинамики . . . . .</b>	<b>120</b>
§25 Состояние термодинамической системы. Термодинамический процесс . . . . .	121
§26 Работа, совершаемая системой при изменении объёма . . . . .	122
§27 Внутренняя энергия термодинамической системы . . . . .	123
27.1 Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы . . . . .	123
27.2 Внутренняя энергия идеального газа . . . . .	124
§28 Первое начало термодинамики . . . . .	125
§29 Теплоёмкость . . . . .	127
§30 Второе начало термодинамики . . . . .	128
30.1 Энтропия. Приведённое количество тепла . . . . .	128
30.2 Энтропия. Статистическое толкование . . . . .	129
30.3 Термодинамические формулировки второго начала термодинамики . . . . .	130
30.4 Границы применимости второго начала термодинамики . . . . .	131
§31 Тепловые машины . . . . .	132
31.1 Круговые процессы (циклы) . . . . .	132
31.2 Тепловая машина. Кпд тепловой машины . . . . .	132
31.3 Цикл Карно . . . . .	133
§32 Термодинамическое описание процессов в идеальном газе . . . . .	134
32.1 Изохорный процесс . . . . .	135
32.2 Изобарный процесс . . . . .	136
32.3 Изотермический процесс . . . . .	137
32.4 Адиабатный процесс . . . . .	138
<b>Глава 9. Реальные газы и жидкости . . . . .</b>	<b>140</b>
§33 Реальные газы . . . . .	140

33.1	Силы межмолекулярного взаимодействия	140
33.2	Уравнение Ван-дер-Ваальса	142
33.3	Экспериментальные изотермы	143
§34	Жидкое состояние	145
34.1	Строение жидкостей	145
34.2	Поверхностное натяжение	146
34.3	Смачивание	148
34.4	Капиллярные явления	149
	<i>Обратите внимание!</i>	150
	<i>Тест для самоконтроля знаний по теме</i>	
	<i>«Молекулярная физика и термодинамика»</i>	152
	<i>Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!»</i>	158
	<i>Коды ответов к тестам</i>	162
<b>ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК</b>		163
<b>Глава 10. Электрическое поле в вакууме</b>		163
§35	Электрический заряд. Закон Кулона	163
35.1	Свойства заряженных тел	163
35.2	Закон Кулона	164
§36	Электрическое поле. Характеристики электрического поля	165
36.1	Напряжённость электрического поля	165
36.2	Потенциал электростатического поля	166
36.3	Циркуляция вектора напряжённости электростатического поля	168
§37	Графическое изображение электростатических полей	169
§38	Связь между напряжённостью электрического поля и потенциалом	171
§39	Расчёт электростатических полей	173
39.1	Теорема Гаусса	173
39.2	Примеры расчёта электростатических полей	174
39.2.1	Поле равномерно заряженной бесконечно длинной нити	174
39.2.2	Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости	175
39.2.3	Поле равномерно заряженной сферической поверхности	176
<b>Глава 11. Электрическое поле в веществе</b>		177
§40	Электрический диполь	177
§41	Диэлектрики в электрическом поле	178
41.1	Классификация диэлектриков	178
41.2	Поляризация диэлектриков	179
41.3	Поле внутри диэлектрика	180
41.4	Условия на границе раздела двух диэлектриков	182
41.5	Практическое применение диэлектриков	183
§42	Проводники в электрическом поле	185
§43	Емкость. Энергия электрического поля	187
43.1	Емкость уединенного проводника	187

43.2 Конденсаторы . . . . .	188
43.3 Энергия электрического поля . . . . .	190
<b>Глава 12. Постоянный электрический ток . . . . .</b>	<b>192</b>
§44 Электрический ток. Характеристики тока . . . . .	192
§45 Электродвижущая сила. Напряжение . . . . .	194
§46 Закон Ома . . . . .	196
46.1 Закон Ома для однородного участка цепи. Сопротивление . . . . .	196
46.2 Закон Ома для неоднородного участка . . . . .	198
46.3 Закон Ома в дифференциальной форме . . . . .	199
§47 Разветвлённые цепи. Правила Кирхгофа . . . . .	200
§48 Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца. Закон Видемана – Франца . . . . .	201
§49 Элементарная классическая теория электропроводности металлов . . . . .	204
§50 Электрические измерения . . . . .	206
51.1 Электроизмерительные приборы . . . . .	206
51.2 Основные характеристики приборов . . . . .	209
<i>Обратите внимание!</i> . . . . .	210
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме</i> <i>«Электростатика. Постоянный электрический ток» . . . . .</i>	213
<i>Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!» . . . . .</i>	220
<i>Коды ответов к тестам . . . . .</i>	224
<b>ЧАСТЬ 4. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ . . . . .</b>	<b>225</b>
<b>Глава 13. Магнитное поле в вакууме . . . . .</b>	<b>225</b>
§51 Магнитное поле . . . . .	225
51.1 Характеристики магнитного поля . . . . .	225
51.2 Графическое изображение магнитных полей . . . . .	228
§52 Законы магнитного поля. Расчёт магнитных полей . . . . .	230
52.1 Закон Био – Савара – Лапласа . . . . .	230
52.2 Примеры расчёта магнитных полей с применением закона Био – Савара – Лапласа . . . . .	231
52.3 Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока . . . . .	234
52.4 Магнитный поток. Теорема Гаусса для магнитного поля . . . . .	235
§53 Действие магнитного поля на проводник с током . . . . .	237
53.1 Закон Ампера . . . . .	237
53.2 Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле . . . . .	238
§54 Магнитный момент. Контур с током в магнитном поле . . . . .	240
54.1 Магнитный момент . . . . .	240
54.2 Сила, действующая на контур с током в однородном магнитном поле . . . . .	240
54.3 Вращающий момент, создаваемый силами, приложенными к контур . . . . .	241

54.4 Работа, совершаемая при вращении контура с током в однородном магнитном поле . . . . .	242
54.5 Контур с током в неоднородном магнитном поле . . . . .	243
§55 Сила Лоренца . . . . .	244
§56 Эффект Холла . . . . .	247
<b>Глава 14. Магнитное поле в веществе . . . . .</b>	<b>248</b>
§57 Магнитное поле в веществе . . . . .	248
57.1 Намагничивание магнетика . . . . .	248
57.2 Классификация магнетиков . . . . .	250
57.3 Диамагнетики. Парамагнетики . . . . .	250
57.4 Ферромагнетики . . . . .	252
57.5 Условия на границе раздела двух магнетиков . . . . .	255
<b>Глава 15. Электромагнитная индукция . . . . .</b>	<b>256</b>
§58 Электромагнитная индукция . . . . .	256
58.1 Явление электромагнитной индукции . . . . .	256
58.2 Вихревое электрическое поле . . . . .	258
58.3 Принцип работы генератора переменного тока . . . . .	259
58.4 Токи Фуко . . . . .	261
§59 Самоиндукция . . . . .	263
59.1 Индуктивность контура . . . . .	263
59.2 ЭДС самоиндукции . . . . .	265
59.3 Токи при замыкании и размыкании цепи . . . . .	266
§60 Взаимная индукция . . . . .	268
§61 Энергия магнитного поля . . . . .	269
§62 Магнитные измерения . . . . .	271
<i>Обратите внимание! . . . . .</i>	<i>273</i>
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Электромагнетизм» . . . . .</i>	<i>276</i>
<i>Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!» . . . . .</i>	<i>282</i>
<i>Коды ответов к тестам . . . . .</i>	<i>287</i>
Терминологический словарь . . . . .	288
Предметный указатель . . . . .	292
Использованная литература. . . . .	298



## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A$	– работа
$A_r$	– относительная атомная масса химического элемента
$\vec{a}$	– ускорение
$\vec{a}_n$	– нормальное ускорение
$\vec{a}_\tau$	– тангенциальное ускорение
$\vec{B}$	– магнитная индукция
$C$	– электрическая ёмкость (электроёмкость)
$C_V$	– молярная теплоёмкость при постоянном объёме
$C_P$	– молярная теплоёмкость при постоянном давлении
$c_V$	– удельная теплоёмкость при постоянном объёме
$c_p$	– удельная теплоёмкость при постоянном давлении
$c$	– скорость света в вакууме
$D$	– коэффициент диффузии
$\vec{D}$	– электростатическая индукция (электрическое смещение)
$d_{\text{эф}}$	– эффективный диаметр молекулы
$\vec{E}$	– напряжённость электрического поля
$\vec{F}$	– сила
$G$	– постоянная всемирного тяготения, электропроводность
$g$	– ускорение свободного падения
$\vec{H}$	– напряжённость магнитного поля
$I$	– сила постоянного тока
$i$	– индекс суммирования, число степеней свободы, сила тока
$J$	– момент инерции
$\vec{J}$	– намагниченность
$\vec{j}$	– плотность тока
$K$	– коэффициент теплопроводности
$k$	– коэффициент жесткости, постоянная Больцмана
$L$	– индуктивность
$\vec{L}$	– момент импульса
$M$	– молярная масса
$M_r$	– относительная молекулярная масса вещества
$\vec{M}$	– момент силы
$m$	– масса тела
$m_0$	– масса покоя, масса одной молекулы
$N$	– сила нормальной реакции опоры, число молекул, механическая мощность
$N_A$	– число Авогадро
$n$	– концентрация частиц
$P$	– мощность электрического тока
$\vec{P}_V$	– поляризованность
$p$	– давление
$\vec{p}$	– импульс тела, дипольный момент диполя

- $\vec{p}_m$  – магнитный момент контура с током  
 $Q$  – количество тепла (тепло)  
 $q$  – электрический заряд  
 $R$  – радиус окружности, молярная газовая постоянная, электрическое сопротивление  
 $r$  – коэффициент сопротивления среды  
 $\vec{r}$  – радиус-вектор  
 $S$  – путь, энтропия, площадь  
 $T$  – период вращения, абсолютная температура  
 $t$  – время  
 $U$  – внутренняя энергия, электрическое напряжение  
 $V$  – объём  
 $\langle v \rangle$  – среднеарифметическая скорость молекул газа  
 $v_b$  – наиболее вероятная скорость молекул газа  
 $\langle v_{kv} \rangle$  – среднеквадратичная скорость молекул газа  
 $\vec{v}$  – скорость  
 $W$  – энергия, термодинамическая вероятность  
 $W_k$  – кинетическая энергия  
 $W_n$  – потенциальная энергия  
 $w$  – объёмная плотность энергии  
 $\langle z \rangle$  – среднее число столкновений за единицу времени  
  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления  
 $\gamma$  – показатель адиабаты  
 $\Delta \vec{r}$  – перемещение  
 $\varepsilon$  – относительное удлинение, диэлектрическая проницаемость среды, электродвижущая сила  
 $\vec{\varepsilon}$  – угловое ускорение  
 $\langle \varepsilon \rangle$  – средняя кинетическая энергия молекулы  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия, коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость).  
 $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега  
 $\mu$  – коэффициент трения, магнитная проницаемость среды  
 $\nu$  – частота вращения, количество вещества (число молей)  
 $\rho$  – плотность вещества, удельное сопротивление материала  
 $\sigma$  – механическое напряжение, поверхностная плотность заряда, удельная электропроводимость  
 $\tau$  – линейная плотность заряда  
 $\Phi$  – поток вектора напряжённости электрического поля, магнитный поток  
 $\varphi$  – угол поворота, потенциал электростатического поля  
 $\Psi$  – полный магнитный поток (потокосцепление)  
 $\vec{\omega}$  – угловая скорость  
 $\omega$  – циклическая частота

## Греческий и латинский алфавиты

Для обозначения физических величин в физике используют греческие и латинские буквы, поэтому знание греческого и латинского алфавита облегчит понимание физического текста.

### *Алфавит греческий*

Греческая буква	Название по-английски	Название по-русски
А α	alpha	альфа
В β	beta	бета
Г γ	gamma	гамма
Δ δ	delta	дельта
Ε ε	epsilon	эпсилон
Ζ ζ	zeta	дзета
Η η	eta	эта
Θ θ	theta	тета
Ι ι	iota	йота
Κ κ	kappa	каппа
Λ λ	lambda	ламбда
Μ μ	mu	мю
Ν ν	nu	ню
Ξ ξ	xi	кси
Ο ο	omicron	омикрон
Π π	pi	пи
Ρ ρ	rho	ро
Σ σ	sigma	сигма
Τ τ	tau	тау
Υ υ	upsilon	ипсилон
Φ φ ϕ	phi	фи
Χ χ	chi	хи
Ψ ψ	psi	пси
Ω ω	omega	омега

*Алфавит латинский*

Латинская буква		Название буквы	Латинская буква		Название буквы
	Курсив			Курсив	
A, a	<i>A, a</i>	а	N, n	<i>N, n</i>	эн
B, b	<i>B, b</i>	бэ	O, o	<i>O, o</i>	о
C, c	<i>C, c</i>	це	P, p	<i>P, p</i>	пэ
D, d	<i>D, d</i>	дэ	Q, q	<i>Q, q</i>	ку, кю
E, e	<i>E, e</i>	е	R, r	<i>R, r</i>	эр
F, f	<i>F, f</i>	эф	S, s	<i>S, s</i>	эс
G, g	<i>G, g</i>	же, гэ	T, t	<i>T, t</i>	тэ
H, h	<i>H, h</i>	аш, ха	U, u	<i>U, u</i>	у
I, i	<i>I, i</i>	и	V, v	<i>V, v, v</i>	вэ
J, j	<i>J, j</i>	йот, жи	W, w	<i>W, w, w</i>	дубль-вэ
K, k	<i>K, k</i>	ка	X, x	<i>X, x</i>	икс
L, l	<i>L, l</i>	эль	Y, y	<i>Y, y</i>	игрек
M, m	<i>M, m</i>	эм	Z, z	<i>Z, z</i>	зет, зета

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Физика» для студентов, обучающихся по техническим и технологическим направлениям подготовки высших учебных заведений. Содержание первого тома составляют разделы: физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика, электростатика и постоянный электрический ток, электромагнетизм. Содержание второго тома: колебания и волны, волновая и квантовая оптика, элементы квантовой механики, основы физики твёрдого тела, элементы физики атомного ядра.

**Основная цель пособия** – помочь студентам изучить курс физики. Авторы пытались, с одной стороны, максимально полно охватить все разделы курса, предусмотренные программой, а с другой – изложить весь материал компактно, не используя громоздких математических выкладок, пространных рассуждений и т. д. Основное внимание уделено сути рассматриваемых явлений, законам, описывающим эти явления, границам применимости законов; а также определениям физических величин, единицам измерения. Определения, формулировки законов, а также все новые термины и выводы выделены в тексте курсивом. Мелким шрифтом выделен дополнительный материал и материал, предназначенный для углублённого изучения тем. Математические знания, необходимые для пользования пособием, соответствуют обычному курсу математики во вузах.

Сводные таблицы, приведённые в тексте, а также большое количество ссылок и иллюстраций помогут вам лучше понять и усвоить учебный материал, а тесты – проверить уровень усвоения материала. В конце книги находится предметный указатель, который поможет отыскать нужные сведения, а также терминологический словарь.

Изучение материала рекомендуем проводить в два этапа:

- 1) беглое чтение материала всей темы с целью ознакомления с его структурой, выделением основных вопросов;
- 2) чтение с проработкой: на этом этапе надо понять весь материал.

Изучая курс физики, помните, что часть учебного материала подлежит **обязательному запоминанию**. Это определения, формулировки законов, единицы измерения физических величин. Чтобы **глубже понять** суть явлений, научиться видеть их как в природе, так и в технике, рекомендуем Вам ответить на вопросы рубрики «Давайте подумаем!», а также просмотреть лекционные демонстрации, ссылки на которые даны в соответствующих параграфах.

Методика решения задач, примеры их решения, методы обработки результатов эксперимента и их представления, а также правила обращения с простейшими приборами, рассматриваются в практикумах [1, 8, 9].

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: **В. В. Мирошникову**, профессору, заведующему кафедрой «Приборы» Луганского национального университета им. Владимира Даля и **А. Г. Петренко**, профессору кафедры теоретической физики и нанотехнологий Донецкого национального университета за полезные замечания и советы, которые были учтены при подготовке рукописи к печати. Также выражаем свою искреннюю благодарность и признательность **И. В. Лумпиеву** за оформление графического материала книги.

С замечаниями и предложениями по книге к авторам можно обратиться по электронной почте: [af.volkov51@gmail.com](mailto:af.volkov51@gmail.com) , [tplumpieva@gmail.com](mailto:tplumpieva@gmail.com)

## ВВЕДЕНИЕ

### §1 Предмет физики

**Физика** – это наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, законы её движения.

В настоящее время известны два вида неживой материи: **вещество и поле**. К первому виду материи – веществу – относятся атомы, молекулы и все тела, состоящие из них. Второй вид материи образуют гравитационные, электромагнитные и другие поля.

Материя находится в непрерывном движении, под которым понимается всякое изменение вообще. Движение является неотъемлемым свойством материи, которое несотворимо и неуничтожимо, как и сама материя. Материя существует и движется в пространстве и во времени.

Основным методом исследования в физике является **эксперимент** (опыт), т. е. наблюдение исследуемого явления в точно контролируемых условиях, позволяющих следить за ходом исследования и воссоздавать его каждый раз при повторении этих условий.

Для объяснения физических явлений используют гипотезы. **Гипотеза** – это научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого-либо факта или явления и требующее проверки и доказательства. Правильность гипотезы проверяется постановкой соответствующих опытов, путём выяснения согласия следствий, вытекающих из гипотезы, с результатами опытов и наблюдений. Доказанная гипотеза превращается в научную теорию или закон.

**Физическая теория** – это система основных идей, обобщающих опытные данные и отражающих объективные закономерности природы. Физическая теория даёт объяснение целой области явлений природы с единой точки зрения.

Физика является научным фундаментом развития новых отраслей техники. На основе её открытий создана электротехника и радиотехника, электронная и вычислительная техника, космическая техника и приборостроение, ядерная энергетика, лазерная техника и т. д. На основе достижений физики разрабатываются принципиально новые и более совершенные методы производства, приборы и установки. В свою очередь техника, развиваясь и совершенствуясь, выдвигает перед физикой такие проблемы, решение которых требует более глубокого изучения различных физических явлений. Именно технические потребности общества привели в своё время к развитию механики, необходимой для строительства различных сооружений. Задача создания более экономичных двигателей вызвала бурное развитие термодинамики и т. д.

Физика формирует научное мировоззрение человека. Развиваясь, она видоизменяет, дополняет, углубляет представления о природе вещей и причинных связях окружающего мира. Со временем её теоретические концепции приобретают общеприкладное значение. Таким образом, инженер любого профиля должен владеть физикой в такой степени, чтобы быть в состоянии применять её достижения в своей производственной деятельности.

## §2 Общие сведения

1. Реальные свойства материальных объектов настолько сложны, а взаимные связи между явлениями и процессами столь многообразны, что учесть все эти свойства и связи сразу невозможно. Поэтому в процессе познания необходимо выделять в изучаемых объектах главное, существенное и отвлекаться от всего случайного, второстепенного.

Мысленная операция, в ходе которой главное отделяется от второстепенного, называется **абстрагированием**. Построенная в результате абстрагирования идеализированная, упрощённая схема явления или объекта называется **физической моделью**. Примерами физических моделей являются материальная точка, абсолютно твёрдое тело, идеальный газ, равновесный процесс, точечный заряд, элемент тока, абсолютно чёрное тело и т. д.

Любая физическая модель имеет ограниченный характер и пригодна лишь для приближённого описания явления и объекта. Следовательно, закономерности, полученные на основе физических моделей, также имеют приближённый и ограниченный характер. Всегда имеется принципиальная возможность уточнения, дополнения, обобщения того или иного закона. Однако установленные на определённом этапе развития физики закономерности, правильно объясняющие экспериментальные данные, не отбрасываются с развитием нового этапа, а включаются в него, как предельный случай, справедливый в определённых условиях. Таким образом, всегда должен выполняться **принцип соответствия**.

2. Все понятия и физические модели вводятся в науку с помощью определений, которые позволяют создать единую научную терминологию. **Определение** – это сформулированное в сжатой форме содержания понятия. Во всех научных теориях есть понятия, которые принимаются без определений. В физике без определений принимаются такие понятия, как состояние, явление, процесс, взаимодействие и др.

Основными физическими понятиями являются физическая величина и физический закон.

2.1. **Физическая величина** – это характеристика одного из свойств физического объекта или физического явления, которую можно прямо или косвенно измерить и выразить числом.

В качественном отношении эта величина присуща многим объектам, в количественном отношении – индивидуальна. Например, любое физическое тело можно характеризовать массой, но численное значение массы у каждого тела свое.

В определении физической величины необходимо отражать её качественное и количественное содержание. Отразить качественное содержание – значит указать, какое свойство или процесс характеризует величина. Например, сопротивление проводника характеризует способность проводника препятствовать прохождению тока; электроёмкость проводника характеризует способность проводника накапливать электрический заряд.

Отразить количественное содержание – значит указать способ измерения этой величины. Например, электроёмкость – это величина, численно равная заряду, сообщение которого изменяет потенциал проводника на один вольт.

Физические величины могут быть скалярными и векторными, поэтому в определении также необходимо указывать характер величины. В качестве примера приведём полное определение электроёмкости.

*Электрическая ёмкость (электроёмкость) – это скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и численно равная заряду, сообщение которого изменяет потенциал проводника на один вольт:*

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Не все понятия, рассматриваемые в физике, являются физическими величинами. Не являются физическими величинами система отсчёта, материальная точка, равновесный процесс и др.

**2.2. Физический закон** – это количественная или качественная объективная зависимость одних физических величин от других. Эта зависимость может быть установлена как опытным путём, так и теоретическим.

Число фундаментальных законов природы, известных в наше время, сравнительно невелико и выражаются они с математической точки зрения, как правило, просто. Гораздо более обширны и требуют более серьёзного математического аппарата частные случаи проявления законов. Используя правила обращения с математическими величинами, можно получить многочисленные следствия, допускающие экспериментальную проверку.

Не следует путать определение физической величины с физическим законом. Например, плотность твёрдого тела по определению равна

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Нельзя говорить, что плотность – это величина, пропорциональная массе тела и обратно пропорциональная его объёму, так как у твёрдых тел нельзя изменить массу, не изменив его объём.

**3. Единицей физической величины** называется условно выбранная физическая величина, имеющая тот же физический смысл, что и рассматриваемая. **Системой единиц** называется совокупность единиц физических величин, образованная в соответствии с определёнными правилами.

**Основными единицами** данной системы называются единицы нескольких разнородных физических величин, произвольно выбранные при построении этой системы. **Производными единицами** называются единицы, устанавливаемые через другие единицы данной системы на основании физических законов, которые выражают взаимосвязь между соответствующими физическими величинами.



Стандартом установлено, что обязательному применению подлежат единицы Международной системы единиц (СИ), а также десятичные кратные и дольные от них. Основными единицами СИ являются: метр (м) – единица длины; килограмм (кг) – единица массы; секунда (с) – единица времени; ампер (А) – единица силы тока; кельвин (К) – единица термодинамической температуры; кандела (кд) – единица силы света; моль (моль) – единица количества вещества. Дополнительные единицы СИ: радиан (рад) – единица плоского угла; стерadian (ср) – единица телесного угла.

В некоторых областях науки и техники допускается использование внесистемных единиц. Например, в ядерной физике массу измеряют в атомных единицах массы (а.е.м.), а энергию – в электрон-вольтах (эВ).

Подробную информацию о единицах измерения можно найти в справочных материалах.

4. Языком физики является математика, в частности дифференциальное и интегральное исчисления. Применяя аппарат высшей математики, физика вкладывает несколько иной смысл в некоторые её понятия. Используемое в физике понятие «элементарная физическая величина» нельзя отождествлять с понятием математически бесконечно малой величины.

Например, элементарный объём  $dV$  – это такой объём, который, с одной стороны, столь велик, что содержит достаточно большое для того или иного усреднения количество частиц; с другой стороны, настолько мал, что данная макроскопическая величина, например, плотность, во всех его точках остается одинаковой, даже если она меняется в рассматриваемом макроскопическом объёме  $V$ .

### §3 Основные сведения о векторах

**Скалярные и векторные величины.** Величины, значения которых задаются положительными или отрицательными числами, называют **скалярными** (масса, температура, работа и т. п.). Величины, значения которых определяются как числом, так и направлением в пространстве, называются **векторными** (сила, скорость, ускорение, напряжённость электрического поля, индукция магнитного поля и т. п.), и могут быть изображены векторами.

**Вектор** – отрезок, имеющий определённую длину и направление. Обозначаются векторы следующим образом  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ . Длина вектора  $\vec{a}$  (модуль или абсолютная величина) обозначается  $a$  или  $|\vec{a}|$ . Два вектора  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  считаются

**равными**, если равны их модули и совпадают направления (т.е. векторы параллельны и ориентированы в одну сторону).

**Коллинеарные** векторы – параллельные одной и той же прямой. Взаимно **противоположные** векторы – равные по длине и противоположные по направлению.

**Единичные** векторы – векторы, модуль которых равен 1. Единичные векторы, имеющие направления прямоугольных координатных осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  (в сторону возрастания координаты) называются **ортами** и обозначаются  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  (рис. 3.1).

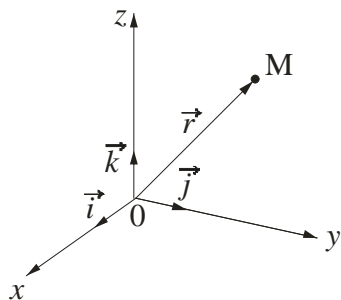


Рисунок 3.1

**Радиус-вектор точки.** Вектор  $\vec{OM}$ , начало которого совпадает с началом координат, а конец находится в точке  $M$  (рис. 3.1) вполне определяет эту точку и называется **радиус-вектором точки  $M$** . Обозначается  $\vec{r}$ . Точка  $O$  в этом случае называется полюсом.

**Линейные комбинации векторов.** Сумма двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  есть вектор  $\vec{c}$ , являющийся диагональю  $AC$  параллелограмма  $ABCD$  (рис. 3.2).

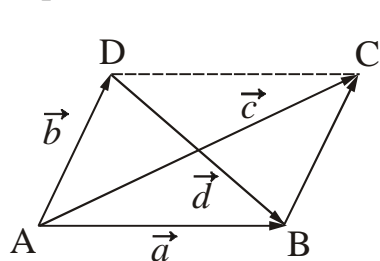


Рисунок 3.2

Основные свойства суммы:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}, \quad |\vec{a} + \vec{b}| \leq |\vec{a}| + |\vec{b}|.$$

**Разностью  $\vec{a} - \vec{b}$**  называется сумма векторов  $\vec{a}$  и  $-\vec{b}$  (диагональ  $DB$ , рис. 3.2):

$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}) = \vec{d}.$$

**Произведением скаляра и вектора ( $m\vec{a}$  или  $\vec{a}m$ )** называется вектор, коллинеарный с вектором  $\vec{a}$ , длина его равна  $m|\vec{a}|$ , а направление совпадает с  $\vec{a}$  при  $m > 0$  и противоположно ему при  $m < 0$ .

Каждый вектор  $\vec{a}$  в пространстве может быть разложен на сумму векторов параллельных ортам  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ :

$$\vec{a} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z,$$

где  $a_x, a_y, a_z$  – проекции вектора  $\vec{a}$  на соответствующие координатные оси.

**Скалярное умножение векторов.** Скалярным произведением векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  называется скаляр, определяемый равенством

$$\vec{a}\vec{b} = ab \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол между векторами  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , приведёнными к общему началу (обозначения см. рис. 3.3).

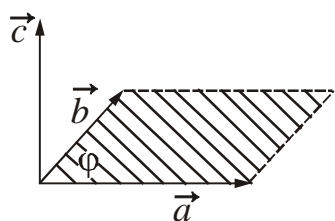


Рисунок 3.3

**Векторное умножение векторов.** Векторным произведением векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  (обозначается  $\vec{a} \times \vec{b}$  или  $[\vec{a}\vec{b}]$ ) называется вектор  $\vec{c}$ , длина которого равна  $ab \sin \varphi$  (т.е. равна площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  как на сторонах) и который направлен перпендикулярно  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  в такую сторону, чтобы три вектора  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  и  $\vec{c}$  образовали правую тройку. После совмещения начал векторов  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  и  $\vec{c}$  кратчайший поворот от  $\vec{a}$  к  $\vec{b}$  кажется наблюдателю, смотрящему с конца вектора  $\vec{c}$ , идущим против часовой стрелки (рис. 3.3).

Таблица 3.1

## Свойства произведений векторов

Скалярное	Векторное
1. $\vec{a}\vec{b} = \vec{b}\vec{a}$	1. $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$ при перестановке множителей векторное произведение изменяет свое направление
2. $m \cdot (\vec{a}\vec{b}) = (m\vec{a}) \cdot \vec{b}$	2. $m(\vec{a} \times \vec{b}) = (m\vec{a}) \times \vec{b}$
3. $\vec{a} \cdot (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a}\vec{b} + \vec{a}\vec{c}$	3. $\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$
4. $\vec{a}\vec{b} = 0$ , если $\vec{a} \perp \vec{b}$ условие перпендикулярности векторов	4. $\vec{a} \times \vec{b} = 0$ , если $\vec{a} \parallel \vec{b}$ условие коллинеарности векторов
5. $\vec{a}\vec{a} = a^2$	5. $\vec{a} \times \vec{a} = 0$

**Правила дифференцирования векторов**

$$\frac{d}{dt}(\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \dots) = \frac{d\vec{a}}{dt} + \frac{d\vec{b}}{dt} + \frac{d\vec{c}}{dt} + \dots$$

$$\frac{d}{dt}(k\vec{a}) = \frac{dk}{dt}\vec{a} + k\frac{d\vec{a}}{dt} \quad (k - \text{скалярная функция от } t)$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a}\vec{b}) = \frac{d\vec{a}}{dt}\vec{b} + \vec{a}\frac{d\vec{b}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a} \times \vec{b}) = \frac{d\vec{a}}{dt} \times \vec{b} + \vec{a} \times \frac{d\vec{b}}{dt} \quad (\text{множители нельзя переставлять местами})$$

$$\frac{d}{dt}\vec{a}[\varphi(t)] = \frac{d\vec{a}}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

**Скалярные и векторные поля. Градиент**

**Скалярным** полем называется область пространства, каждой точке которой соответствует значение некоторой скалярной величины  $\varphi = \varphi(x, y, z)$ . Таким полем является, например, поле температуры неравномерно нагретого тела, поле плотности неоднородного тела, поле электростатического потенциала и т. п.

**Векторным** полем называется область пространства, каждой точке которой соответствует значение некоторого вектора. Таким полем является поле вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$ , вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

**Градиент скалярной величины** – это вектор, направленный в сторону максимального возрастания величины и численно равный изменению величины, приходящемуся на единицу длины в этом направлении.

Рассмотрим понятие градиента на примере градиента температуры.

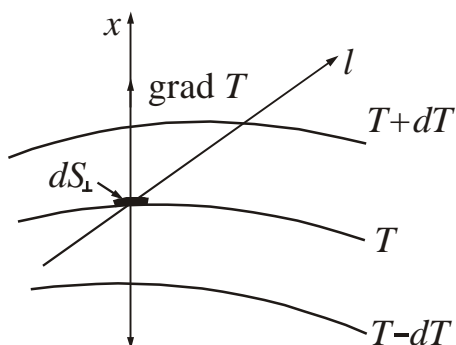


Рисунок 3.4

Предположим, что температура меняется вдоль некоторого направления  $x$  (рис. 3.4). Если соединить все точки тела с одинаковой температурой, то получится поверхность равных температур, которую называют изотермической. На рис. 3.4 изображены три поверхности с температурами  $T - dT$ ;  $T$ ;  $T + dT$ , где  $dT$  – это бесконечно малое изменение температуры. Изотермические поверхности не пересекаются, так как каждой точке тела соответствует своя температура. Они или замыкаются сами на себя, или заканчиваются на гра-

нице тела.

Изменение температуры в произвольном направлении  $l$  характеризуется производной по направлению  $\frac{\partial T}{\partial l}$ . Эта производная будет иметь максимальное значение в направлении нормали к изотермной поверхности (в нашем случае это направление  $x$ ). Вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры называется **градиентом** температуры и обозначается  $\text{grad } T$ :

$$\left( \frac{\partial T}{\partial l} \right)_{\max} = \frac{\partial T}{\partial x} = \text{grad } T$$

Численно градиент температуры равен разности температур двух точек, отстоящих друг от друга на единицу длины.

Если ввести декартову систему координат, то градиент температуры может быть выражен соотношением:

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

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – единичные векторы.

**Обратите внимание!** Понятие градиента различных величин очень широко используется в физике, и мы будем к нему не раз обращаться.

- **Давайте подумаем!**

При изучении физики на первом месте должна быть физическая природа явления со всеми его свойствами и связями, а потом уже количественное осмысление обнаруженных функциональных связей и отыскание характеризующих данное явление законов.

Физическая суть изучаемого явления тогда будет по-настоящему осознана, когда это явление Вы будете узнавать и понимать в действительности, вне учебной аудитории: в природе, быту и, самое главное, в той производственной деятельности, которой будете заниматься.

Для того чтобы помочь Вам лучше понять суть изучаемых явлений, в каждый раздел включена рубрика «**Давайте подумаем!**». В ней Вы найдёте задачи-вопросы. Их ещё называют качественными задачами. Такие задачи решаются путем логических умозаключений, базирующихся на законах физики. Математические вычисления при этом не применяются.

### 1.1. Чем отличается понятие дифференциала в математике и физике?

## ЧАСТЬ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Простейшей формой движения является *механическое движение*, состоящее в изменении положения тела с течением времени относительно других тел или частей одного и того же тела.

Раздел физики, изучающий закономерности механического движения и взаимодействия тел, называется *механикой*. Движение тел со скоростями, много меньшими скорости света  $c$  в вакууме, изучает *классическая механика*. В основе классической механики лежат законы динамики, сформулированные Ньютоном\* в 1687 году. Законы Ньютона возникли в результате обобщения большого количества опытных фактов.

С развитием науки обнаружили новые факты, которые не укладывались в рамки классической механики. Они получили своё объяснение в теории относительности и в квантовой механике.

Теория относительности, сформулированная А. Эйнштейном\* в 1905 году, пересмотрела ньютоновские представления о пространстве и времени. В результате была создана механика тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света в вакууме – *релятивистская механика*. Уравнения релятивистской механики в пределе (для скоростей малых по сравнению со скоростью света) переходят в уравнения классической механики. Таким образом, классическая механика вошла в релятивистскую механику как частный случай и сохранила своё прежнее значение для описания движения тел с малыми скоростями.

---

\*Ньютон Исаак (1642–1727), английский физик, математик и астроном.

\*Эйнштейн Альберт (1879–1955), немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1921 г.

В результате развития физики атома в 20-х годах двадцатого века была создана **квантовая механика**. Уравнения квантовой механики также дают в пределе (для масс, больших по сравнению с массами атомов) уравнения классической механики. Следовательно, классическая механика вошла и в квантовую механику как предельный случай. Таким образом, развитие науки не перечеркнуло классическую механику, а лишь показало её ограниченную применимость.

Классическая механика состоит из трёх разделов: кинематики, динамики и статики. **Кинематика** математически описывает различные виды механического движения, не выясняя причин этого движения. **Динамика** исследует влияние взаимодействия между телами на их механическое движение. **Статика** изучает условия равновесия тел. Законы статики являются частным случаем законов динамики, поэтому в данном курсе статику мы рассматривать не будем.

## Глава 1. Кинематика поступательного и вращательного движения

### §4 Кинематика материальной точки и поступательного движения твёрдого тела

#### 4.1 Основные понятия кинематики

Для описания реальных движущихся тел в механике пользуются в зависимости от условий конкретной задачи различными физическими моделями: материальная точка, абсолютно твёрдое тело, абсолютно упругое тело, абсолютно неупругое тело.

**Материальной точкой** называется тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Например, при исследовании движения автомобиля из одного пункта в другой, его можно считать материальной точкой. Если же вы изучаете движение водителя, находящегося внутри автомобиля, то автомобиль надо рассматривать как протяжённое тело.

Произвольное протяжённое тело или систему таких тел можно рассматривать как систему материальных точек. Для этого тела системы мысленно разбиваются на столь большое число частей, чтобы размеры каждой части были пренебрежимо малы по сравнению с размером самих тел.

**Абсолютно твёрдым телом** называется тело, деформацией которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Абсолютно твёрдое тело можно рассматривать как систему материальных точек, жёстко связанных между собой.

**Абсолютно упругим телом** называется тело, которое после прекращения внешнего силового воздействия полностью восстанавливает свои первоначальные размеры и форму.

**Абсолютно неупругим телом** называется тело, которое после прекращения внешнего силового воздействия полностью сохраняет деформированное состояние, вызванное этим воздействием.

## 4.2 Система отсчёта. Траектория. Путь. Перемещение

Положение тела в пространстве всегда указывается относительно других тел. Тело, относительно которого рассматривается движение, называется **телом отсчёта**. Чтобы определить положение исследуемого тела, с телом отсчёта жёстко связывают систему координат, снабжённую часами. Совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и часов, отсчитывающих время, называется **системой отсчёта**. В дальнейшем мы будем пользоваться прямоугольной декартовой системой координат.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Модель декартовой системы координат.

<http://youtube.com/watch?v=gmfIKFgy5WM&list=PLE5E65E9A742BF6D1>

**Поступательное движение** – это такое движение, при котором любая прямая, жёстко связанная с телом, перемещается, оставаясь параллельной самой себе. Поэтому кинематическое рассмотрение поступательного движения твёрдого тела сводится к изучению движения любой из его точек. В динамике обычно рассматривают движение центра инерции тела.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Виды движений: Поступательное и вращательное движения.

<http://youtube.com/watch?v=C1yGNCPw7BU&list=PLE5E65E9A742BF6D1>

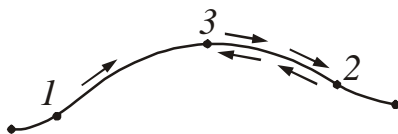


Рисунок 4.1

Линия, описываемая в пространстве движущейся точкой, называется **траекторией**. В зависимости от вида траектории движение делят на прямолинейное и криволинейное. Частным видом криволинейного движения является движение по окружности.

Пусть материальная точка, двигаясь по некоторой траектории (рис. 4.1), переместилась из точки 1 в точку 2. Расстояние  $S_{12}$  между точками 1 и 2, отсчитанное вдоль траектории, называется длиной пройденного пути или просто **пройденным путём**.

Если материальная точка повернёт обратно и дойдёт до точки 3, то полный путь равен:  $S = S_{12} + S_{23}$ . Путь всегда выражается положительным числом.

Вектор, соединяющий начальное и конечное положения точки, называется **перемещением**. Обозначается  $\Delta \vec{r}$  (рис. 4.2).

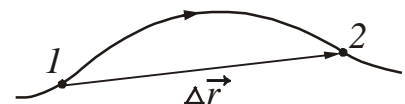


Рисунок 4.2

## 4.3 Способы задания положения тела в пространстве

**Основная задача кинематики** – определить положение тела в любой момент времени. Обычно положение тела определяют с помощью координат. Движение точки считается полностью определённым, если заданы уравнения, описывающие изменение координат точки со временем:

$$x = x(t) \quad y = y(t) \quad z = z(t)$$

Эти уравнения называются кинематическими уравнениями движения точки.

Координаты тела можно задавать несколькими способами.

### 1. Табличный способ.

При этом способе для каждого момента времени указывают значение координаты тела и представляют эту зависимость в виде таблицы. Например:

$t, \text{с}$	0	2	4	6	8	10	12	14
$x, \text{м}$	2	6	18	38	66	102	146	198

### 2. Графический способ.

Зависимость координат от времени даётся в виде графика. Например, для равномерного прямолинейного движения эта зависимость имеет вид, представленный на рис. 4.3.

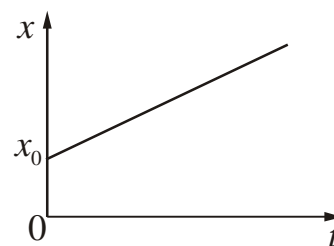


Рисунок 4.3

### 3. Аналитический способ.

Зависимость координат от времени задаётся в виде формул.

**Пример:** для равномерного прямолинейного движения координата зависит от времени:

$$x = x_0 + vt.$$

Если тело движется по плоскости, то можно описывать зависимость координаты  $y$  от координаты  $x$ , т.е.  $y = f(x)$ . При этом координаты  $y$  и  $x$  зависят от времени, т.е.  $y = f(t)$ ,  $x = f(t)$ . Зависимость  $y = f(x)$  называется уравнением траектории.

**Пример:** Координаты тела изменяются в соответствии с уравнениями:

$$x = A_1 \sin \omega t, \quad y = A_2 \sin \omega t.$$

Разделим одно уравнение на другое и выразим  $y$ . Получим:

$$y = \frac{A_2}{A_1} \cdot x.$$

Траекторией тела является прямая линия.

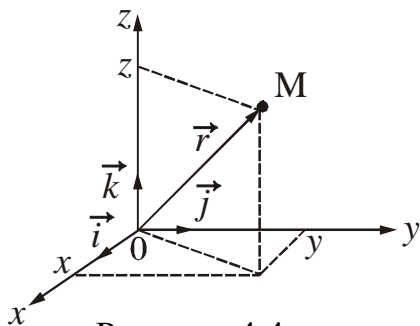


Рисунок 4.4

### 4. С помощью радиус-вектора $\vec{r}$ .

**Радиус-вектор  $\vec{r}$**  – это вектор, проведенный из начала координат в точку, где находится тело (рис. 4.4). Радиус-вектор можно разложить на составляющие:

$$\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z,$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – единичные векторы (орты).



## 4.4 Характеристики поступательного движения

### 4.4.1 Скорость

Для характеристики быстроты движения тела в механике вводится понятие скорости. Пусть в момент времени  $t$  тело находилось в точке 1, положение которой задается радиус-вектором  $\vec{r}$ . За время  $\Delta t$  оно совершило перемещение  $\Delta \vec{r}$  и оказалось в точке 2 (рис. 4.5).

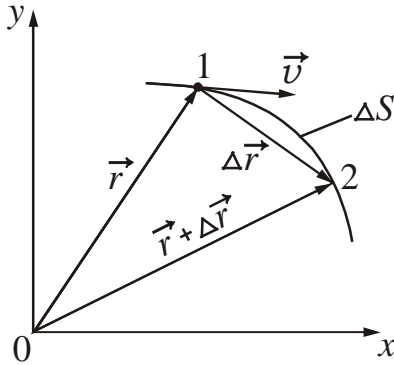


Рисунок 4.5

Скорость тела определяется как предел отношения перемещения  $\Delta \vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за который оно произошло, при условии, что  $\Delta t$  стремится к нулю:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}' . \quad (4.1)$$

$$[v] = \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

**Скорость ( $\vec{v}$ ) – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения положения тела в пространстве и равная первой производной радиус-вектора по времени.**

Вектор скорости всегда направлен по касательной к траектории в сторону движения. Модуль скорости  $v$  определяется как производная пути по времени:

$$v = \frac{dS}{dt} , \quad (4.2)$$

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Вектор скорости: Опыт с точилом.

<http://youtube.com/watch?v=k3SIL19D2rE&list=PLE5E65E9A742BF6D1>

Из (4.2) следует, что путь  $dS$ , пройденный за элементарно малое время  $dt$  будет определяться следующим образом:

$$dS = v(t)dt .$$

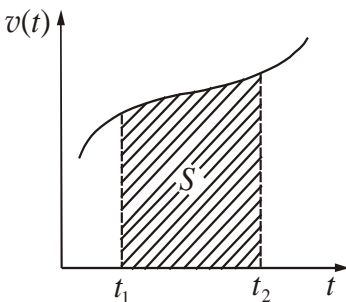


Рисунок 4.6

Путь, пройденный телом за конечный промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$ , находится интегрированием:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt . \quad (4.3)$$

Пройденный путь численно равен площади заштрихованной криволинейной трапеции (рис. 4.6). Речь идёт только о числовом равенстве! Размерности пути и площади, не совпадают.

Если направление вектора скорости не изменяется, то движение называется **прямолинейным**.

Если модуль скорости не изменяется с течением времени, то движение называется **равномерным**.

При равномерном движении скорость тела постоянна

$$v = \frac{S}{t} = \text{const.} \quad (4.4)$$

Путь, пройденный телом при равномерном движении, зависит от времени линейно:

$$S = vt. \quad (4.5)$$

Если тело движется неравномерно, то величина, равная отношению пройденного пути  $\Delta S$  к промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого был пройден путь, называется **средней скоростью** за этот промежуток времени

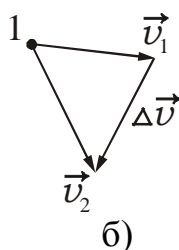
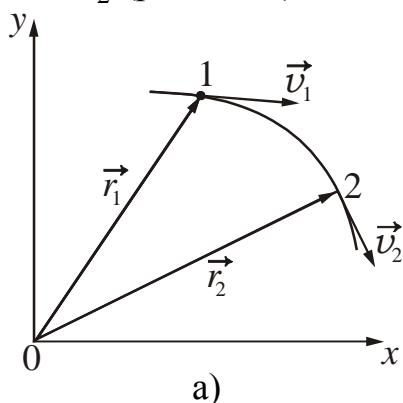
$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (4.6)$$

(Средние значения величин будем обозначать заключением этих величин в угловые скобки).

#### 4.4.2 Ускорение

Чтобы охарактеризовать изменение скорости тела с течением времени, используется величина, называемая ускорением.

Пусть в момент времени  $t$  тело находилось в точке 1, имея скорость  $\vec{v}_1$ . Через время  $\Delta t$  оно переместилось в точку 2, при этом его скорость стала равной  $\vec{v}_2$  (рис. 4.7 а).



Приращение вектора скорости равно  $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$  (рис. 4.7 б). Чтобы охарактеризовать быстроту изменения скорости, используется величина:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}'.$$

$$[a] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Рисунок 4.7

Принимая во внимание (4.1), можно записать:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \quad (4.7)$$

**Ускорение** ( $\vec{a}$ ) – **векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения вектора скорости и равная производной вектора скорости по времени.**

Ускорение направлено по вектору приращения скорости  $\Delta\vec{v}$ .

При прямолинейном движении направление скорости остается постоянным, поэтому вектор ускорения  $\vec{a}$  или совпадает с направлением скорости, или противоположен ему. Если модуль ускорения при этом не изменяется с течением времени, то в первом случае движение будет **равноускоренным**, во втором – **равнозамедленным**. Скорость движения в любой момент времени будет определяться соотношением:

$$v = v_0 \pm at, \quad (4.8)$$

где  $v_0$  – начальная скорость тела, т.е. скорость в момент времени  $t=0$ . Знак «плюс» относится к равноускоренному движению, «минус» – к равнозамедленному.

Интегрируя функцию (4.8) в пределах от 0 до произвольного момента времени  $t$ , найдём формулу для расчёта пройденного пути (см. формулу (4.3)):

$$S = \int_0^t (v_0 \pm at) dt = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \quad (4.9)$$

Отметим, что формула (4.9) даёт правильный результат для пройденного пути только в том случае, если за время  $t$  направление движения точки (знак скорости) не изменяется.

Если скорость изменяется с течением времени произвольным образом, то величина, равная отношению изменения скорости  $\Delta v$  к промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого изменялась скорость, называется **средним ускорением** за этот промежуток времени

$$\langle a \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (4.10)$$

При криволинейном движении вектор скорости  $\vec{v}$  изменяет своё направление. При этом может изменяться и его численное значение, т.е. модуль.

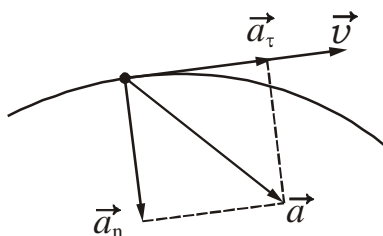


Рисунок 4.8

В этом случае вектор ускорения  $\vec{a}$  удобно раскладывать на две составляющие. Одна из них  $\vec{a}_\tau$  – касательная к траектории, вторая  $\vec{a}_n$  – перпендикулярна этой касательной (рис. 4.8). Составляющая  $\vec{a}_\tau$  называется **тангенциальным** (касательным) ускорением; составляющая  $\vec{a}_n$  – **нормальным** (центростремительным) ускорением. Из рис. 4.8 следует, что

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n. \quad (4.11)$$

Модуль полного ускорения равен

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (4.12)$$

Тангенциальное ускорение характеризует быстроту изменения скорости по величине и равно первой производной модуля скорости по времени:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}. \quad (4.13)$$

Если скорость по величине не изменяется, то  $a_\tau = 0$ .

Если  $dv > 0$  (скорость растёт по модулю), то тангенциальное ускорение  $\vec{a}_\tau$  направлено по вектору скорости, если  $dv < 0$  (скорость уменьшается по модулю), то  $\vec{a}_\tau$  направлено в сторону, противоположную вектору скорости.

Нормальное (центростремительное) ускорение характеризует быстроту изменения скорости по направлению и направлено по радиусу к центру кривизны траектории. Численное значение нормального ускорения определяется формулой:

$$a_n = \frac{v^2}{R}. \quad (4.14)$$

Если направление скорости не изменяется, то  $a_n = 0$ .

### **Примеры:**

- 1) Тело движется прямолинейно, равномерно:  $a_n = 0, \quad a_\tau = 0$ .
- 2) Тело движется прямолинейно, равноускоренно (равнозамедленно):  
 $a_n = 0, \quad a_\tau = \text{const.}$
- 3) Тело вращается по окружности с постоянной по величине скоростью:  
 $a_n = \text{const}, \quad a_\tau = 0$ .
- 4) Тело вращается по окружности равноускоренно (равнозамедленно):  
 $a_n \sim t^2, \quad a_\tau = \text{const.}$

• **Давайте подумаем!**

**4.1.** Перед конструктором межпланетной лаборатории поставлены три вопроса: 1) какова вероятность попадания в лабораторию какого-либо из холодных тел, носящихся в космосе? 2) за какое время лаборатория сможет перенестись из одной области солнечной системы в другую? 3) как сильно может разогреться оболочка лаборатории от сопротивления воздуха?

Какие из этих вопросов он сможет решить, считая лабораторию материальной точкой?

**4.2.** В субботу до возвращения в гараж автобус сделал шесть рейсов, а в воскресенье — восемь. В какой, из этих дней автобус проехал больший путь? совершил большее перемещение?

- 4.3. Какую форму должна иметь траектория точки, чтобы пройденный ею путь мог равняться перемещению?
- 4.4. Какую скорость переменного движения показывает спидометр автомобиля?
- 4.5. Во время езды на автомобиле через каждую минуту снимались показания спидометра. Можно ли по этим данным определить среднюю скорость движения автомобиля?
- 4.6. В каком случае мгновенная и средняя скорости равны между собой?
- 4.7. Все ли точки окружности катящегося колеса имеют одинаковые скорости относительно Земли?
- 4.8. Как направлен вектор полного ускорения частицы, которая движется по криволинейной траектории?
- 4.9. Три тела брошены так: первое – вниз без начальной скорости; второе – вниз с начальной скоростью; третье – вверх. Что можно сказать об ускорениях этих тел? Сопротивление воздуха не учитывать.

## §5 Кинематика вращательного движения

**Вращательное движение** – движение, при котором все точки абсолютно твёрдого тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой. Эта прямая называется осью вращения. Окружности, по которым движутся точки тела, лежат в плоскостях, перпендикулярных этой оси.

### 5.1 Характеристики вращательного движения

Рассмотрим вращение материальной точки относительно оси  $OO'$  (рис. 5.1). Вращение характеризуют угловым перемещением.

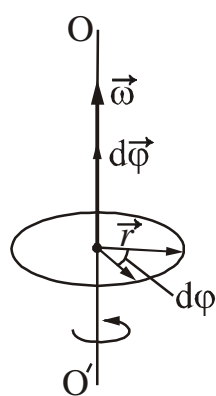


Рисунок 5.1

**Угловое перемещение ( $d\vec{\phi}$ )** – вектор, модуль которого равен углу поворота, выраженному в радианах.

Направлено угловое перемещение по оси вращения так, что если смотреть с конца вектора  $d\vec{\phi}$ , то направление вращения радиус-вектора происходит против часовой стрелки (рис. 5.1).

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Правило сложения векторов: Конечное угловое перемещение не вектор.

<http://youtube.com/watch?v=VzC9vYlmGl0>

**Угловая скорость ( $\vec{\omega}$ )** – векторная физическая величина, характеризующая быстроту вращения и равная первой производной углового перемещения по времени.

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\phi}}{dt}. \quad (5.1)$$

$$[\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Направление вектора угловой скорости совпадает с направлением вектора углового перемещения.

Вращение с постоянной угловой скоростью называется равномерным, при этом

$$\omega = \frac{\varphi}{t}. \quad (5.2)$$

Равномерное вращение принято характеризовать периодом вращения и частотой вращения.

**Период вращения ( $T$ )** – время, в течение которого совершается один полный оборот. За время, равное периоду, тело поворачивается на угол  $2\pi$ . Отсюда следует, что

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (5.3)$$

**Частота вращения ( $\nu$ )** – число оборотов за единицу времени.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \omega = 2\pi\nu. \quad (5.4)$$

$$[\nu] = \frac{1}{\text{с}}.$$

Вектор угловой скорости  $\vec{\omega}$  может изменяться как за счёт изменения величины скорости вращения, так и за счёт поворота оси вращения в пространстве (в этом случае изменяется направление угловой скорости). Изменение вектора угловой скорости со временем характеризуют угловым ускорением.

**Угловое ускорение ( $\vec{\varepsilon}$ )** – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости и равная первой производной угловой скорости по времени.

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (5.5)$$

$$[\varepsilon] = \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Рассмотрим случай, когда ось вращения неподвижна.

1. Если  $d\omega > 0$ , то движение ускоренное. При этом вектор углового ускорения  $\vec{\varepsilon}$  совпадает по направлению с вектором угловой скорости  $\vec{\omega}$  (рис. 5.2.а).
2. Если  $d\omega < 0$ , то движение замедленное. При этом вектор углового ускорения  $\vec{\varepsilon}$  направлен в сторону, противоположную вектору угловой скорости  $\vec{\omega}$  (рис. 5.2.б).



Рисунок 5.2

Векторы, направление которых связывается с направлением вращения ( $d\vec{\varphi}$ ,  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{\varepsilon}$ ) называются **аксиальными** векторами или псевдовекторами.

При равнопеременном вращательном движении имеют место соотношения, аналогичные формулам, описывающим равнопеременное прямолинейное движение (см. (4.8) и (4.9)):

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \quad (5.6)$$

$$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}. \quad (5.7)$$

## 5.2 Связь между линейными и угловыми характеристиками

Точка, отстоящая от оси вращения на расстоянии  $R$  (рис. 5.3), при повороте тела на угол  $\varphi$  (значение угла должно быть задано в радианах) за время  $dt$  проходит путь

$$S = R\varphi. \quad (5.8)$$

Продифференцируем уравнение (5.8) по времени:

$$\frac{dS}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt}. \quad (5.9)$$

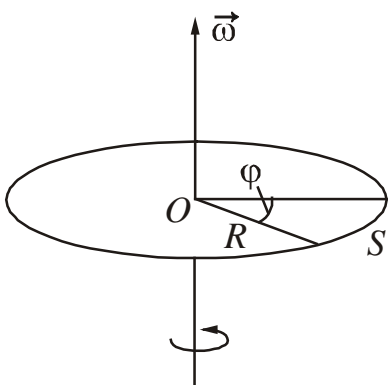


Рисунок 5.3

Отсюда следует, что

$$v = R\omega. \quad (5.10)$$

Продифференцируем уравнение (5.10) по времени

$$\frac{dv}{dt} = R \frac{d\omega}{dt}. \quad (5.11)$$

Отсюда следует, что

$$a_\tau = R\varepsilon. \quad (5.12)$$

Кинематические величины, характеризующие вращательное движение и формулы, описывающие это движение, аналогичны соответствующим величинам и формулам поступательного движения. Эта аналогия прослеживается в таблице 10.1, приведённой на с. 67.

• **Давайте подумаем!**

**5.1.** Какое направление имеют аксиальные векторы (псевдовекторы)  $d\vec{\phi}$ ,  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{\epsilon}$ , характеризующие вращательное движение?

**5.2.** Две материальные точки движутся по окружностям одинакового радиуса с одинаковыми по модулю полными ускорениями. Однако ускорение первой точки направлено под углом  $45^\circ$  к касательной, а ускорение второй точки – по радиусу. У какой из этих точек модуль скорости больше?

**5.3.** Два вращающихся шкива с разными диаметрами связаны друг с другом не проскальзывающим приводным ремнём. Имеют ли точки на соприкасающихся с ремнём поверхностях большего и меньшего шкивов одинаковые по модулю ускорения?

**5.4.** Почему обтачивание на токарных станках изделий большого диаметра производится с меньшей угловой скоростью, чем изделия малого диаметра?



## Глава 2. Динамика поступательного и вращательного движения

### §6 Динамика материальной точки и поступательного движения твёрдого тела

**Динамика** – раздел механики, изучающий движение тел с учётом причин, вызывающих это движение.

#### 6.1 Основные характеристики динамики поступательного движения

1. **Масса ( $m$ )** – скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертных и гравитационных свойств тела. Масса может служить мерой энергосодержания.

$[m] = \text{кг}$ .

Основные свойства массы:

- масса в классической механике не зависит от скорости движения;
- масса является величиной аддитивной, т.е. масса системы тел равняется сумме масс тел, входящих в систему;
- масса замкнутой системы остается величиной постоянной, т.е. выполняется закон сохранения массы.

**Плотность ( $\rho$ )** – скалярная физическая величина, характеристика вещества, численно равная массе единицы объёма.

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (6.1)$$

$[\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

2. **Импульс тела ( $\vec{p}$ )** – векторная физическая величина, динамическая характеристика интенсивности движения, равная произведению массы тела на его скорость.

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (6.2)$$

$[p] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

Направление импульса тела совпадает с направлением скорости.

3. **Сила ( $\vec{F}$ )** – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело других тел или полей.

$[F] = \text{Н}$  (ньютон)

Сила характеризуется модулем (численным значением), направлением действия, точкой приложения. Прямая, вдоль которой направлена сила, называется **линией действия силы**.

Действие силы может быть статическим и динамическим. Статическое действие проявляется в возникновении деформаций, динамическое – в возникновении ускорений. Вид формулы для расчёта силы зависит от природы взаимодействий.

## 6.2 Виды взаимодействий

В классической механике приходится иметь дело с гравитационными и электромагнитными взаимодействиями, которые проявляются по-разному, и, поэтому, могут быть представлены различными конкретными силами. Эти силы принято выражать законами действия сил.

### 1. Гравитационное взаимодействие. Закон всемирного тяготения.

Две материальные точки массами  $m_1$  и  $m_2$  притягиваются друг к другу с силой прямо пропорциональной массам этих точек и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними (рис. 6.1).

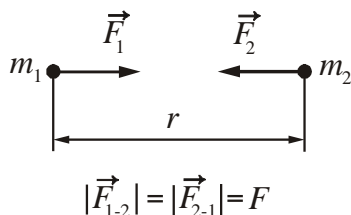


Рисунок 6.1

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (6.3)$$

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

Если одно из взаимодействующих тел – Земля, а тело массой  $m$  находится на высоте  $h$  от поверхности Земли, то закон всемирного тяготения записывается в виде

$$F = G \frac{M m}{(R + h)^2},$$

где  $M$  – масса Земли;

$R$  – средний радиус Земли.

На поверхности Земли (или вблизи поверхности)  $h \approx 0$ . В этом случае

$$F = G \frac{M m}{R^2}.$$

Можно ввести обозначение  $G \frac{M}{R^2} = g$ ,

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Величину

$$F_{\text{тяж}} = mg \quad (6.4)$$

называют силой тяжести.

Гравитационное взаимодействие осуществляется посредством гравитационного поля. **Поле** – это особая форма материи, которая проявляет себя силовым действием на другие тела. Одно тело изменяет свойства окружающего пространства, т. е. создаёт в нём гравитационное поле. Второе тело, находящееся вблизи первого, испытывает со стороны гравитационного поля некоторую силу в том месте, где оно находится. Аналогичным образом второе тело оказывает силовое воздействие на первое. Земля создает гравитационное поле, которое в каждой точке пространства вблизи её поверхности действует на тело массой  $m$  с силой, равной  $m\vec{g}$ .

## 2. Электромагнитное взаимодействие.

Частными случаями проявления электромагнитных взаимодействий являются силы упругости и силы трения. В курсе механики они не рассматриваются с атомистической точки зрения (т. е. с точки зрения внутреннего строения), так как этим занимается физика твёрдого тела. Для сил упругости и трения можно получить лишь приближённые, эмпирические (т. е. основанные на опыте) формулы.

### а) Закон Гука\*.

Под действием внешних сил возникают деформации (т. е. изменение размеров и формы тел). Если после прекращения действия сил прежняя форма и размеры тела восстанавливаются, то деформация называется *упругой*. Для упругих деформаций справедлив закон Гука:

**Сила упругости пропорциональна абсолютному удлинению.**

$$F_x = -kx, \quad (6.5)$$

где  $F_x$  – проекция силы упругости на ось  $x$ ;

$k$  – жёсткость пружины;

$x$  – абсолютное удлинение пружины.

Однородные стержни при растяжении или сжатии ведут себя подобно пружине. Для них также справедлив закон Гука, который принято формулировать следующим образом:

**Механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению.**

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (6.6)$$

Механическое напряжение:

$$\sigma = \frac{F_{\perp}}{S}, \quad (6.7)$$

где  $F_{\perp}$  – упругая сила, действующая перпендикулярно площади поперечного сечения стержня  $S$ .

Относительное удлинение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (6.8)$$

где  $\Delta l$  – приращение длины;

$l_0$  – первоначальная длина;

$E$  – модуль Юнга\*,

$$[E] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

---

\*Гук Роберт (1635–1703), английский физик.

\*Юнг Томас (1773–1829), английский ученый.

**Модуль Юнга** (модуль упругих деформаций) – физическая величина, характеризующая упругие свойства материала. Зависит от природы материала.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Закон Гука и нелинейные деформации.

<http://youtube.com/watch?v=sYjyAujrtmw&list=PL04E078C955FC10E5>

**б) Закон сухого трения.**

Трение между поверхностями двух соприкасающихся твёрдых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки, называется **сухим трением**. **Трение покоя** – трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел. **Трение скольжения** – трение при относительном движении соприкасающихся тел.

**Сила трения скольжения пропорциональна модулю силы нормальной реакции опоры и не зависит от площади соприкосновения тел** (рис. 6.2).

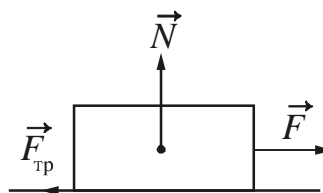


Рисунок 6.2

$$|\vec{F}_{\text{тр}}| = \mu |\vec{N}|, \quad (6.9)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения. Он зависит от природы материалов и качества обработки соприкасающихся поверхностей. Значения коэффициентов трения определяют экспериментальным путем.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Соскальзывание бруска с наклонной плоскости.

<http://youtube.com/watch?v=04gAToQ4r0U&list=PL04E078C955FC10E5>

**в) Закон вязкого трения.**

На тело, движущееся в вязкой (жидкой или газообразной) среде, действует сила, тормозящая его движение. Эта сила называется **силой вязкого трения**.

$$F = -r v, \quad (6.10)$$

где  $v$  – скорость движения тела;

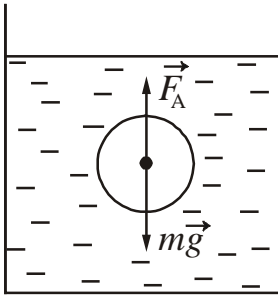
$r$  – коэффициент сопротивления.

Коэффициент  $r$  зависит от формы и размеров тела, характера его поверхности, а также от свойств среды. Знак « $-$ » указывает на то, что сила трения направлена противоположно скорости. Например, если шарик диаметром  $d$  падает в жидкости с установившейся скоростью  $v$ , то сила сопротивления выражается формулой Стокса

$$F_c = 3\pi d \eta v, \quad (6.11)$$

где  $\eta$  – вязкость жидкости.

г) **Закон Архимеда\***.



**На тело, погружённое в жидкость (газ), действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа) (рис. 6.3).**

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V, \quad (6.12)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости (газа);  
 $V$  – объём погружённой части тела.

Рисунок 6.3

### 6.3 Сложение сил

Как правило, на тело действует не одна сила, а несколько. **Равнодействующей** нескольких сил называется сила, действие которой эквивалентно одновременному действию этих сил. Равнодействующая равна векторной сумме действующих сил. Складываются силы по правилу параллелограмма (рис. 6.4).

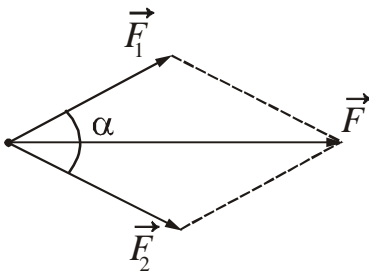


Рисунок 6.4

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2,$$

$\vec{F}$  – равнодействующая (резльтирующая) сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Из теоремы косинусов следует, что модуль равнодействующей двух сил рассчитывается по формуле:

$$F = |\vec{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}.$$

### 6.4 Разложение сил

Для упрощения анализа физических процессов и математических выкладок нередко приходится прибегать к разложению сил на составляющие по какому-либо направлению. Разложение вектора на составляющие состоит в замене вектора двумя или несколькими векторами, сумма которых равна данному вектору. Векторную величину можно полностью характеризовать проекциями данного вектора на оси прямоугольной системы координат.

Обычно при нахождении проекций вектора сначала находят его составляющие по осям. Для этого из начала и конца вектора опускают перпендикуляры на соответствующие координатные оси (рис 6.5). Если составляющая совпадает с положительным направлением оси, то проекцию берут со знаком «плюс», если нет, то со знаком «минус». На рис. 6.5 проекция силы тяжести  $m\vec{g}$  на ось  $Ox$  равна  $+mg \sin \alpha$ , а проекция на ось  $Oy$  равна  $-mg \cos \alpha$ :

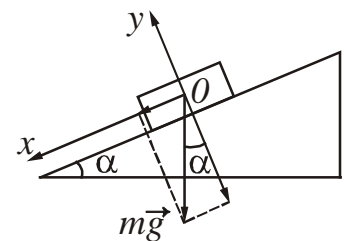


Рисунок 6.5

$$F_x = (mg)_x = +mg \sin \alpha,$$

$$F_y = (mg)_y = -mg \cos \alpha.$$

\*Архимед из Сиракуз (ок. 287–212 до н.э.), древнегреческий математик, механик и астроном.

## 6.5 Основные законы динамики материальной точки (законы Ньютона)

Динамика базируется на законах Ньютона, которые математически не выводятся, а являются обобщением опыта.

### 6.5.1 Первый закон Ньютона

Первый закон Ньютона устанавливает факт существования инерциальных систем отсчёта и описывает характер движения свободной материальной точки в инерциальной системе отсчёта.

**Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействия со стороны других тел не изменят этого состояния.**

Система отсчёта, в которой выполняется первый закон Ньютона, называется инерциальной. Свойство тел сохранять неизменным состояние своего движения по отношению к инерциальным системам отсчёта, когда внешние воздействия на тело отсутствуют или взаимно уравниваются, называется *инерцией*.

Первый закон Ньютона можно сформулировать и таким образом.

**Существуют такие системы отсчёта, относительно которых тело находится в состоянии покоя или движется прямолинейно и равномерно, если на это тело не действуют другие тела или действие этих тел скомпенсировано.**

Любая другая система отсчёта, движущаяся относительно инерциальной с постоянной скоростью также является инерциальной.

### 6.5.2 Второй закон Ньютона

**Скорость изменения импульса тела равна равнодействующей всех сил, действующих на тело.**

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (6.13)$$

Импульс тела равен  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Сделаем замену в (6.13) и продифференцируем произведение, получим:

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{dm}{dt}\vec{v} + m\frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (6.14)$$

Проведём анализ уравнения (6.14).

1. Если  $\frac{dm}{dt} \neq 0$ , то уравнение (6.14) описывает движение тела с переменной массой. Его можно применять не только в тех случаях, когда масса меняется с течением времени (например, при полете ракеты), но и при изменении массы с изменением скорости. Это бывает при больших скоростях движения, приближающихся к скорости света в вакууме.

2. Масса тела остается постоянной:  $m = \text{const}$ . В этом случае  $\frac{dm}{dt} = 0$ , а уравнение (6.14) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}, \\ \vec{F} &= m\vec{a}.\end{aligned}\quad (6.15)$$

**Равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна произведению массы тела на его ускорение.**

3. Сила является величиной постоянной:  $\vec{F} = \text{const}$ . Умножим обе части уравнения (6.13) на  $dt$ , получим:

$$\vec{F} dt = d\vec{p}.$$

Проинтегрируем полученное уравнение

$$\vec{F} \int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{p_1}^{p_2} d\vec{p},$$

или

$$\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}.\quad (6.16)$$

Величина, равная произведению силы на время действия этой силы  $\vec{F} \Delta t$ , называется **импульсом силы**. Таким образом:

**Импульс силы равен изменению импульса тела.**

На основании второго закона Ньютона можно сделать вывод, что изменения скоростей материальных точек или тел происходят не мгновенно, а в течение конечных промежутков времени.

**Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Опыт с инерцией гири.

[http://youtube.com/watch?v=f7Aahv7\\_3Is&list=PL04E078C955FC10E5](http://youtube.com/watch?v=f7Aahv7_3Is&list=PL04E078C955FC10E5)

2. Выдергивание скатерти из-под сосуда с водой.

<http://youtube.com/watch?v=xVSWuvZ8aQA&list=PL04E078C955FC10E5>

### 6.5.3 Третий закон Ньютона

**Силы, с которыми взаимодействуют два тела, равны по величине и противоположны по направлению.**

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.\quad (6.17)$$

Таким образом, силы всегда возникают попарно. Силы, фигурирующие в третьем законе Ньютона, приложены к разным телам, поэтому они не уравновешивают друг друга.

Законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчёта.

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Взаимодействие тележек. Два мотора.  
[http://youtube.com/watch?v=bAp0pWg\\_iDI&list=PL153584A2CF36B4CA](http://youtube.com/watch?v=bAp0pWg_iDI&list=PL153584A2CF36B4CA)
2. Взаимодействие тележек. Один мотор.  
<http://youtube.com/watch?v=exPXElwAcM&list=PL153584A2CF36B4CA>
3. Взаимодействие тележек. Разные массы.  
<http://youtube.com/watch?v=14LizsP4CGo&list=PL153584A2CF36B4CA>

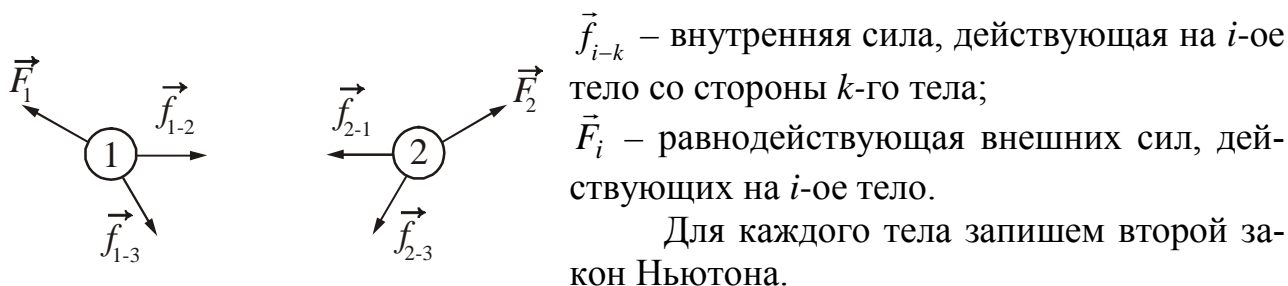
## 6.6 Динамика системы материальных точек. Закон сохранения импульса

Совокупность материальных точек (тел), выделенных для рассмотрения, называется **механической системой**. Тела системы могут взаимодействовать как между собой, так и с телами, не входящими в эту систему. Поэтому силы, которые действуют на тела системы, делят на внешние и внутренние. **Внутренние силы** обусловлены взаимодействием тел, входящих в систему. **Внешние силы** обусловлены взаимодействием с телами, не входящими в систему.

Система называется **замкнутой**, если на неё не действуют внешние силы.

Рассмотрим систему тел (рис. 6.6), которые взаимодействуют как между собой, так и с внешними телами.

Обозначим:



Для каждого тела запишем второй закон Ньютона.

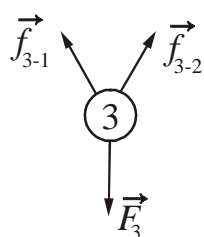


Рисунок 6.6

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{f}_{1-2} + \vec{f}_{1-3} + \vec{F}_1,$$

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{f}_{2-1} + \vec{f}_{2-3} + \vec{F}_2,$$

$$\frac{d\vec{p}_3}{dt} = \vec{f}_{3-1} + \vec{f}_{3-2} + \vec{F}_3.$$

Сложим уравнения почленно:

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3) = (\vec{f}_{1-2} + \vec{f}_{2-1}) + (\vec{f}_{1-3} + \vec{f}_{3-1}) + (\vec{f}_{2-3} + \vec{f}_{3-2}) + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3.$$

По третьему закону Ньютона

$$\vec{f}_{1-2} = -\vec{f}_{2-1}, \quad \vec{f}_{i-k} = -\vec{f}_{k-i},$$

поэтому каждая из скобок равна нулю.



Сумма внешних сил, действующих на тела системы, называется **главным вектором внешних сил**.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F},$$

где  $\vec{F}$  – главный вектор внешних сил.

Сумма импульсов тел, входящих в систему:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = \vec{p},$$

где  $\vec{p}$  – импульс системы тел.

Таким образом, для системы тел получим уравнение:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (6.18)$$

**Скорость изменения суммарного импульса системы тел равна главному вектору внешних сил.**

Предположим, что на систему не действуют внешние силы, т. е. она является замкнутой. Тогда главный вектор внешних сил равен нулю:  $\vec{F} = 0$ . В этом случае

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0.$$

Если производная некоторой величины равна нулю, то эта величина постоянна. Поэтому из последнего уравнения следует, что  $\vec{p} = \text{const}$ , или

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = \text{const}, \quad (6.19)$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 = \text{const}. \quad (6.20)$$

Формулы (6.19) и (6.20) выражают закон сохранения импульса:

**Импульс замкнутой системы материальных точек (тел) остается постоянным.**

Рассмотрим частные случаи выполнения закона сохранения импульса.

1. На систему действуют внешние силы, т.е.  $\vec{F}_i \neq 0$ , но их векторная сумма равна нулю:  $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0$ . В этом случае  $\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$ . Это означает, что импульс системы сохраняется.

2. На систему действуют внешние силы:  $\vec{F}_i \neq 0$ . Векторная сумма этих сил не равна нулю:  $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i \neq 0$ , но равна нулю сумма проекций этих сил на какое-либо

направление. Например, проекция сил на направление оси  $x$  равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N F_{ix} = 0. \text{ Из уравнения (6.18) следует, что для этой проекции } \frac{dp_x}{dt} = 0, \text{ а по-}$$

этому  $\sum_{i=1}^N p_{ix} = \text{const}$ . Таким образом, полный импульс системы не сохраняется, но сохраняется проекция импульса на направление оси  $x$ .

3. На систему действуют внешние силы:  $\vec{F}_i \neq 0$ , векторная сумма этих сил не равна нулю:  $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i \neq 0$ , но время действия сил  $dt$  очень мало, т.е.  $dt \rightarrow 0$ . При этом  $d\vec{p}$  также стремится к нулю:  $d\vec{p} \rightarrow 0$ . Отсюда следует, что  $\vec{p} = \text{const}$  – импульс системы сохраняется. Примером является взаимодействие тел при ударе, взрыве.

### **Посмотрите лекционные демонстрации:**

1. Выстрел назад с движущейся тележки.

<http://youtube.com/watch?v=HzHAj62yn5o&list=PLWM8IO-3TQjNWXvjsg3BGeErxGJdoWkUq>

2. Выстрел вперёд с движущейся тележки.

<http://youtube.com/watch?v=-Hd8UEIFD0M&list=PLWM8IO-3TQjNWXvjsg3BGeErxGJdoWkUq>

### **• Давайте подумаем!**

**6.1.** Какие из сил – притяжения, трения или упругости – являются фундаментальными?

**6.2.** При каких условиях силу притяжения можно определять по формуле  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ , если тела имеют конечные размеры?

**6.3.** Почему Земля сообщает всем телам одно и то же ускорение независимо от их массы?

**6.4.** При каких условиях тела внутри космического корабля будут находиться в состоянии невесомости, т.е. перестанут оказывать давление на стенки корабля?

**6.5.** Действуют ли силы трения между абсолютно твёрдыми телами?

**6.6.** Гвоздь сравнительно легко выдернуть из сухой доски и трудно из набухшей. Почему? Ведь, казалось бы, вода, играя роль смазки, должна уменьшать трение.

**6.7.** Тяжёлый брусок лежит на куске фанеры, находящемся на полу. К бруску прикладывают в горизонтальном направлении постепенно нарастающую силу. Что надо знать для того, чтобы предсказать, будет ли смещаться фанера по полу или брусок на фанере?

- 6.8.** Правила технической эксплуатации железных дорог требуют, чтобы двери крытых товарных вагонов, идущих порожняком, были закрыты. Почему?
- 6.9.** Шариковые подшипники обладают меньшим трением, чем роликовые. Однако крупнотоннажные вагоны строят на роликовых подшипниках. Почему?
- 6.10.** Почему шарик в цилиндрической трубке, наполненной вязкой жидкостью, падает с постоянно уменьшающимся ускорением, а при достаточной длине трубки движение шарика в дальнейшем становится равномерным?
- 6.11.** Почему равномерное движение шарика в жидкости наступает сравнительно скоро, а при падении в воздухе только после того, как шарик пролетит значительное расстояние?
- 6.12.** Зачем у динамометров делают ограничители растяжения пружин?
- 6.13.** Предложите систему отсчёта, которая точно отвечает определению инерциальной системы отсчёта.
- 6.14.** При каких условиях можно пользоваться законами Ньютона для описания взаимодействия тел конечных размеров?
- 6.15.** Почему груз, сброшенный с горизонтально летящего самолета, не падает вертикально вниз?
- 6.16.** Почему нагруженный автомобиль на булыжной мостовой движется более плавно, чем такой же автомобиль без груза?
- 6.17.** Можно ли поднять с земли тело, приложив к нему силу, равную силе тяжести?
- 6.18.** Как ослабляют силу удара тяжёлого мяча, ловя его руками?
- 6.19.** Почему опасно рывками поднимать шахтную клеть?
- 6.20.** Студенту была дана задача: «Два тела с неравными массами  $m_1$  и  $m_2$  висят на длинном легком шнуре, перекинутом через блок. С каким ускорением будет двигаться тело массой  $m_1$ ?». Студент рассуждал так: «Равнодействующая сил, действующих на оба тела, равна  $m_1g - m_2g$ . Полная масса системы  $m = m_1 + m_2$ . Следовательно, по второму закону Ньютона...». Какие ошибки допустил студент в этих рассуждениях?
- 6.21.** Выясняя влияние масс тел на силу натяжения шнура в системе тел, описанной в предыдущей задаче, студент получил:  $T = m_1 g \left( 1 - \frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} \right)$ .

Не решая задачу заново, попробуйте указать, что именно неправильно в предложенном ответе, и попытайтесь исправить этот ответ.

- 6.22.** Допустим, что реактивный самолет поднимается строго равномерно и прямолинейно. Изменяется ли при этом его импульс?
- 6.23.** Усилий нескольких человек достаточно, чтобы сдвинуть с места автобус (увеличить его импульс). Почему этот же автобус не сдвигается с места от попадания противотанкового снаряда, пробивающего его навывлет, т.е. действующего с силой, значительно большей силы, прилагаемой людьми?

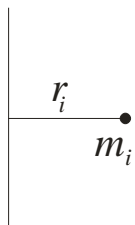
## §7 Динамика вращательного движения

Если твёрдое тело вращается, то все его точки движутся по концентрическим окружностям, центры которых лежат на одной прямой. Все эти точки движутся с одинаковой угловой скоростью  $\vec{\omega}$ , но разными линейными скоростями, так как находятся на разном расстоянии от оси вращения. Поэтому для характеристики вращательного движения вводятся новые физические величины – момент инерции, момент импульса, момент силы.

### 7.1 Основные характеристики динамики вращательного движения

#### 7.1.1 Момент инерции

Рассмотрим материальную точку массой  $m_i$ , которая находится на расстоянии  $r_i$  от неподвижной оси (рис. 7.1). **Моментом инерции ( $J$ ) материальной точки относительно оси называется скалярная физическая величина, равная произведению массы  $m_i$  на квадрат расстояния  $r_i$  до этой оси.**



$$J_i = m_i r_i^2. \quad (7.1)$$

Рисунок 7.1  $[J] = \text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Момент инерции системы материальных точек будет равен сумме моментов инерции отдельных точек

$$J = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2. \quad (7.2)$$

Момент инерции твёрдого тела находится интегрированием:

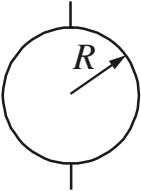
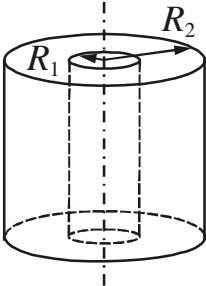
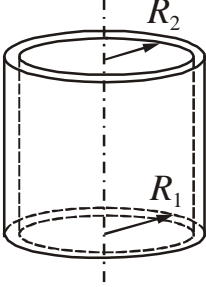
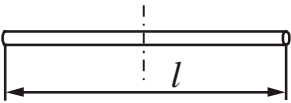

$$J = \int_m r^2 dm. \quad (7.3)$$

Вычисление интеграла (7.3) представляет собой сложную задачу, поэтому в таблице 7.1 приведены формулы для расчёта момента инерции некоторых тел правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через центр масс.

Момент инерции тела является мерой инертности тела во вращательном движении вокруг неподвижной оси, подобно тому, как масса тела является мерой его инертности при поступательном движении. Таким образом, можно дать следующее определение момента инерции.

**Момент инерции – мера инертных свойств твёрдого тела при вращательном движении, зависящая от распределения массы относительно оси вращения.** Это означает, что момент инерции зависит от массы, формы, размеров тела и положения оси вращения.

Таблица 7.1. Формулы для расчёта момента инерции тел правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через центр масс

Тело	Формула
1.  Шар	$J = \frac{2}{5}mR^2$
2.  Толстостенный цилиндр (труба)	$J = \frac{1}{2}m(R_1^2 + R_2^2)$
3.  Тонкостенный цилиндр (обруч) $R_1 = R_2$	$J = mR^2$
4.  Стержень	$J = \frac{1}{12}ml^2$
5.  Диск	$J = \frac{1}{2}mR^2$

Момент инерции тела относительно произвольной оси рассчитывается с помощью **теоремы Штейнера\***.

**Момент инерции тела относительно произвольной оси равен сумме момента инерции относительно оси, проходящей через центр масс параллельно данной, и произведения массы тела на квадрат расстояния между осями.**

$$J = J_c + md^2. \quad (7.4)$$

\*Штейнер Якоб (1796–1863), немецкий математик.

**Пример:** Найдём момент инерции стержня относительно оси, проходящей через конец перпендикулярно ему (рис. 7.2).

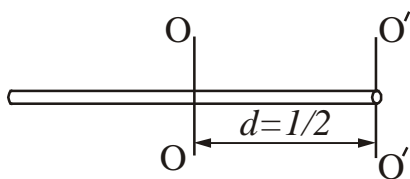


Рисунок 7.2

$$J_{O'O'} = J_c + md^2, \quad d = \frac{l}{2},$$

$$J_{O'O'} = \frac{1}{12}ml^2 + m\frac{l^2}{4} = \frac{ml^2}{3}. \quad (7.5)$$

Следует отметить, что всякое тело, независимо от того, вращается оно или покоится, обладает моментом инерции относительно любой оси, подобно тому, как тело обладает массой независимо от того, движется оно или находится в покое. Аналогично массе момент инерции является величиной аддитивной.

### 7.1.2 Момент импульса

а) Момент импульса материальной точки относительно точки вращения O.

**Моментом импульса ( $\vec{L}$ ) материальной точки относительно точки O называется векторная физическая величина, равная векторному произведению радиус-вектора  $\vec{r}$ , проведённого из точки O в место нахождения материальной точки, на вектор её импульса  $\vec{p}$ .**

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}, \quad (7.6)$$

Модуль момента импульса материальной точки:

$$L = rp \sin \alpha. \quad (7.7)$$

$$[L] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}.$$

Направлен вектор  $\vec{L}$  перпендикулярно плоскости, в которой лежат перемножаемые векторы. Если смотреть из конца вектора  $\vec{L}$ , то кратчайший поворот от  $\vec{r}$  к  $\vec{p}$  происходит против часовой стрелки (рис. 7.3).

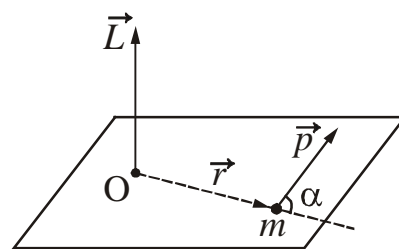


Рисунок 7.3

Если материальная точка движется по окружности радиусом  $r$ , то модуль момента импульса относительно центра окружности равен

$$L = mvr, \quad (7.8)$$

так как угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{r}$  равен  $\alpha = 90^\circ$ .

б) Момент импульса тела относительно неподвижной оси вращения z.

Момент импульса ( $L_z$ ) тела относительно оси z равен сумме проекций моментов импульсов отдельных точек на эту ось.

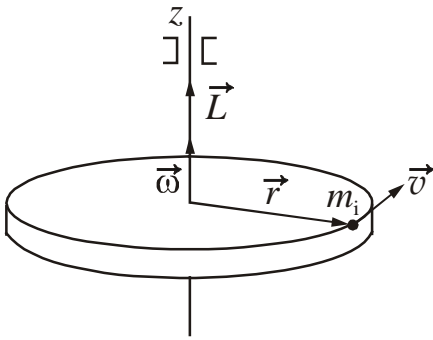


Рисунок 7.4

$$L_z = \sum_{i=1}^N L_{iz} . \quad (7.9)$$

Рассмотрим однородное твёрдое тело (рис. 7.4), вращающееся относительно неподвижной оси  $z$  (для простоты изображения выбран диск). Диск можно рассматривать как систему материальных точек массой  $m_i$ . В соответствии с (7.8) момент импульса материальной точки:

$$L_i = m_i v_i r_i .$$

Линейная скорость  $v_i$  связана с угловой скоростью  $\omega$  соотношением

$$v_i = \omega r_i .$$

Сделав замену в (7.9), получим

$$L_z = \sum m_i r_i^2 \cdot \omega = \omega \sum m_i r_i^2 .$$

$$\sum m_i r_i^2 = J_z ,$$

где  $J_z$  – момент инерции тела относительно оси  $z$ .

Тогда

$$L_z = J_z \omega . \quad (7.10)$$

Так как вектор угловой скорости  $\vec{\omega}$  направлен по оси вращения, то вектор момента импульса  $\vec{L}$  также будет направлен по оси вращения. Поэтому формулу (7.10) можно переписать в векторном виде

$$\vec{L} = J \vec{\omega} . \quad (7.11)$$

Из (7.11) следует, **что вектор момента импульса твёрдого тела, вращающегося относительно неподвижной оси, равен произведению момента инерции тела относительно этой оси, на угловую скорость.**

### 7.1.3 Момент силы

Внешнее механическое воздействие изменяет вращательное движение тела.

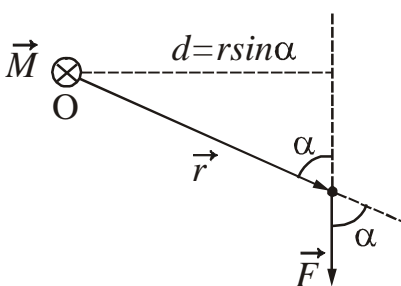


Рисунок 7.5

Чтобы охарактеризовать это воздействие, вводят понятие момента силы. Различают момент силы относительно неподвижной точки и относительно неподвижной оси.

а) Момент силы относительно неподвижной точки  $O$ .

**Моментом силы ( $\vec{M}$ ) относительно точки  $O$  называется векторная физическая величина, равная векторному произведению радиус-вектора  $\vec{r}$ , проведённого из точки  $O$  в точку приложения**

**силы, на силу  $\vec{F}$  (рис. 7.5).**

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (7.12)$$

Модуль момента силы определяется соотношением:

$$M = rF \sin \alpha = Fd. \quad (7.13)$$

$$[M] = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Величина  $d = r \sin \alpha$  называется плечом силы. **Плечо силы** – это длина перпендикуляра, опущенного из точки О на линию действия силы (рис. 7.5).

Направлен вектор  $\vec{M}$  перпендикулярно к плоскости, в которой лежат перемноженные векторы, причём так, что направление вращения, обусловленного силой, и направление вектора  $\vec{M}$  образуют правовинтовую систему.

б) Момент силы относительно неподвижной оси  $z$ .

Рассмотрим тело, вращающееся вокруг неподвижной оси  $z$  под действием силы  $\vec{F}$ . Сила  $\vec{F}$  лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения (рис. 7.6).

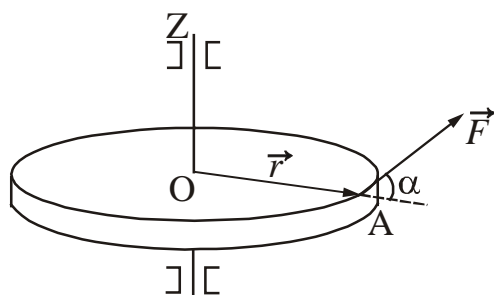


Рисунок 7.6

**Моментом силы ( $M$ ) относительно оси называется скалярная физическая величина, равная произведению модуля силы на плечо силы.**

$$M_z = Fd, \quad (7.14)$$

где  $d = r \sin \alpha$  – плечо силы. Если линия действия силы пересекает ось, то момент силы будет равен нулю, так как плечо силы при

этом равно нулю.

в) Момент пары сил.

Две равные по модулю противоположно направленные силы, не действующие вдоль одной прямой, называются **парой сил**. Расстояние  $d$  между прямыми, вдоль которых действуют силы, называется **плечом пары** (рис 7.7). Модуль момента пары сил равен произведению модуля силы на плечо пары

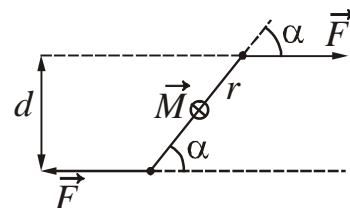


Рисунок 7.7

$$M = rF \sin \alpha = Fd. \quad (7.15)$$

Вектор  $\vec{M}$  момента пары сил перпендикулярен к плоскости, в которой лежат силы.



## 7.2 Основное уравнение динамики вращательного движения

Продифференцируем по времени уравнение (7.6), записанное для материальной точки:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{r} \times \vec{p}) = \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{p} + \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt},$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad \vec{p} = m\vec{v}, \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}.$$

Выполнив замену, получим

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{v} \times m\vec{v} + \vec{r} \times \vec{F}.$$

Векторное произведение двух коллинеарных (параллельных одной и той же прямой) векторов равно нулю, т. е.  $\vec{v} \times m\vec{v} = 0$ .

Векторное произведение  $\vec{r} \times \vec{F} = \vec{M}$ . Таким образом:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (7.16)$$

**Скорость изменения момента импульса материальной точки равна суммарному моменту сил, действующих на точку.**

Твёрдое тело является системой материальных точек. На них действуют как внутренние, так и внешние силы. Для каждой из этих точек можно записать равенство

$$\frac{d\vec{L}_i}{dt} = \vec{M}_{i \text{ внутр}} + \vec{M}_{i \text{ внешн}},$$

где  $\vec{M}_{i \text{ внутр}}$  – момент внутренних сил,  $\vec{M}_{i \text{ внешн}}$  – момент внешних сил.

Для твёрдого тела

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \vec{L}_i = \sum_{i=1}^N \vec{M}_{i \text{ внутр}} + \sum_{i=1}^N \vec{M}_{i \text{ внешн}}.$$

$\sum_{i=1}^N \vec{L}_i = \vec{L}$  – момент импульса тела.

Из третьего закона Ньютона следует, что суммарный момент внутренних сил равен нулю. Следовательно,

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{M}_{i \text{ внешн}}. \quad (7.17)$$

**Скорость изменения момента импульса тела равна суммарному моменту внешних сил, действующих на тело.**

Полученное выражение называется **основным уравнением** динамики вращательного движения. Спроецируем уравнение (7.17) на ось  $z$ . Тогда

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z,$$

$$L_z = J_z \omega,$$

Если  $J_z = \text{const}$ , то можно записать

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = M_z.$$

Учитывая, что производная угловой скорости по времени даёт угловое ускорение  $\varepsilon$ , получим:

$$J_z \varepsilon = M_z.$$

Векторы  $\vec{M}$  и  $\vec{\varepsilon}$  направлены вдоль оси вращения, поэтому, опустив индексы, это уравнение можно переписать в векторном виде

$$\vec{M} = J \vec{\varepsilon}. \quad (7.18)$$

**Суммарный момент внешних сил, действующих на тело, вращающееся вокруг неподвижной оси, равен произведению момента инерции на угловое ускорение.**

Уравнение (7.18) называется **основным законом** динамики твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси.

### Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Зависимость углового ускорения от момента сил 1

<http://youtube.com/watch?v=P5BpHp-b6qg>

2. Зависимость углового ускорения от момента сил 2

<http://youtube.com/watch?v=3toovcYtKCw>

3. Зависимость углового ускорения от момента инерции

<http://youtube.com/watch?v=msfnzjkoVws>

## 7.3 Закон сохранения момента импульса

Основное уравнение динамики вращательного движения, записанное в виде

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt},$$

может быть применено как к телу, момент инерции которого меняется в процессе движения, так и к системе тел, вращающихся вокруг данной неподвижной оси.

Если на твёрдое тело не действуют внешние силы или равнодействующая этих сил не создает вращающего момента относительно оси вращения, то  $M = 0$ .

В этом случае изменение момента импульса  $dL = d(J\omega)$  равно нулю. Отсюда вытекает закон сохранения момента импульса твёрдого тела.

*Если на тело не действуют внешние силы или действуют так, что равнодействующая этих сил не создает вращающего момента относительно оси вращения, то момент импульса тела относительно этой оси остается постоянным.*

$$J\vec{\omega} = \text{const}. \quad (7.19)$$

Уравнению (7.19) можно придать следующую форму:

$$J_1\vec{\omega}_1 = J_2\vec{\omega}_2. \quad (7.20)$$

Из (7.20) следует, что угловая скорость тела в этом случае обратно пропорциональна его моменту инерции.

Закон сохранения момента импульса можно записать для системы тел. Если система тел, вращающихся относительно некоторой оси, замкнута, то внешние силы не действуют. В этом случае  $M = 0$ . Изменение момента импульса системы тел тоже будет равно нулю. Это означает, что момент импульса системы тел остается постоянным. Мы получили закон сохранения момента импульса для системы тел.

*Момент импульса замкнутой системы тел остается постоянным.*

$$\vec{L} = \text{const}. \quad (7.21)$$

Соотношение (7.21) означает, что в замкнутой системе сумма моментов импульсов всех тел системы в любые два момента времени одинакова:

$$J_1\vec{\omega}_1 + J_2\vec{\omega}_2 + \dots + J_n\vec{\omega}_n = J'_1\vec{\omega}'_1 + J'_2\vec{\omega}'_2 + \dots + J'_n\vec{\omega}'_n, \quad (7.22)$$

где  $J$  и  $J'$  – моменты инерции тел в произвольные моменты времени  $t$  и  $t'$ ,  $\omega$  и  $\omega'$  – соответствующие им угловые скорости.

Закон сохранения момента импульса можно применять и для незамкнутых систем, если алгебраическая сумма моментов внешних сил относительно

оси вращения равна нулю, т. е.  $\sum_{i=1}^N M_z = 0$ .

**Посмотрите лекционные демонстрации:**

1. Человек с гантелями на скамье Жуковского.  
<http://youtube.com/watch?v=8BB5sWXBKos>
2. Человек на скамье Жуковского с велосипедным колесом.  
[http://youtube.com/watch?v=nR\\_E-Zmqg4M](http://youtube.com/watch?v=nR_E-Zmqg4M)

**Давайте подумаем!**

- 7.1.** Обладает ли импульсом однородный диск, вращающийся вокруг своей оси? Ось диска неподвижна.
- 7.2.** Конькобежец вращается вокруг вертикальной оси с вытянутыми в сторону руками. Как изменится частота вращения спортсмена, если он поднимет руки вверх? Силой трения пренебречь.
- 7.3.** Почему в практике машиностроения особое внимание обращают на уравновешивание и центрирование вращающихся тел, т. е. на то, чтобы центр тяжести ротора лежал на его оси вращения?
- 7.4.** Присохшую пробку с резьбой легче отвернуть, если предварительно плотно обмотать её несколькими слоями ткани. Только ли улучшением условий захватывания пробки объясняется это явление?

## Глава 3. Работа, мощность, энергия

### §8 Механическая работа. Мощность

#### 8.1 Работа

Пусть в некоторый момент времени на тело действует сила  $\vec{F}$ , под действием которой тело совершает перемещение  $d\vec{r}$  (рис. 8.1).

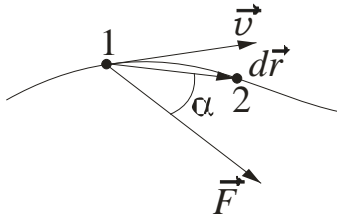


Рисунок 8.1

**Элементарной работой ( $\delta A$ ) называется скалярная физическая величина, равная скалярному произведению силы  $\vec{F}$  на элементарное перемещение  $d\vec{r}$  точки приложения силы.**

$$\delta A = \vec{F} d\vec{r}. \quad (8.1)$$

В скалярном виде:

$$\delta A = F dr \cos \alpha, \quad (8.2)$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями силы и перемещения.

$[A] = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$  (джоуль\*).

Работа на конечном перемещении равна

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} d\vec{r}. \quad (8.3)$$

Если в процессе перемещения (рис. 8.2) сила не меняется ни по модулю, ни по направлению ( $\vec{F} = \text{const}$ ), то её можно вынести за знак интеграла:

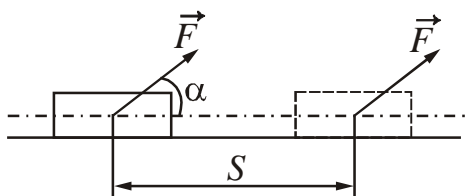


Рисунок 8.2

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} F dr \cos \alpha = F \cos \alpha \int_{r_1}^{r_2} dr = F(r_2 - r_1) \cos \alpha$$

Так как при прямолинейном движении

$$r_2 - r_1 = S,$$

где  $S$  – пройденный путь (рис. 8.2), то

$$A = FS \cos \alpha. \quad (8.4)$$

Проанализируем уравнение (8.4).

1. Работа является величиной алгебраической, т. е. она может быть положительной и отрицательной. Если угол  $\alpha$  между  $\vec{F}$  и  $d\vec{r}$  острый ( $0 < \alpha < \pi/2$ ), то работа положительна, если угол  $\alpha$  тупой ( $\pi/2 < \alpha < \pi$ ), то работа отрицательна. Например, работа силы трения отрицательна, так как сила трения направлена против перемещения.

\*Джоуль Джеймс Прескотт (1818–1889), английский физик.

2. Сила не совершает работы: а) если тело покоится ( $d\vec{r}=0$ ); б) если направление силы  $\vec{F}$  перпендикулярно направлению перемещения  $d\vec{r}$  ( $\alpha = \pi/2$ ). Например, центростремительные силы работы не совершают, так как  $\vec{F} \perp d\vec{r}$ .

## 8.2 Графическое представление работы

Работу можно вычислить графически.

1. Рассмотрим случай, когда  $\vec{F} = \text{const}$ . Проекция силы  $\vec{F}$  на заданное направление  $\vec{r}$  (рис. 8.3) равна:

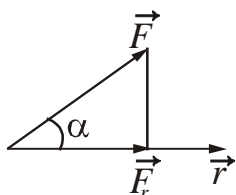


Рисунок 8.3

$$F \cos \alpha = F_r$$

График зависимости проекции  $F_r$  от  $r$  представляет собой прямую линию (рис.8.4). Найдём работу

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F_r \cdot dr = F_r(r_2 - r_1) = F_r \cdot S.$$

Очевидно, что работа постоянной силы равна площади заштрихованного прямоугольника (рис. 8.4).

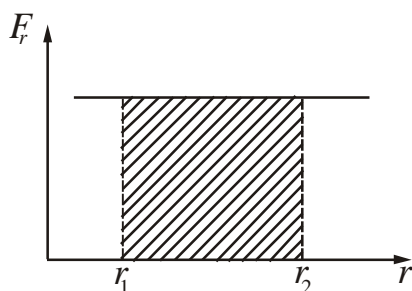


Рисунок 8.4

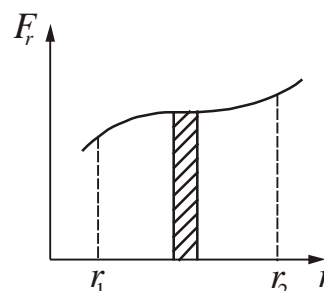


Рисунок 8.5

2. Если  $\vec{F} \neq \text{const}$ , то график зависимости проекции  $F_r$  от  $r$  представляет собой некоторую кривую (рис.8.5). Элементарная работа  $\delta A$  равна площади узкой заштрихованной полоски

$$\delta A = F_r dr.$$

Работа на конечном перемещении

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F_r dr$$

будет изображаться площадью криволинейной трапеции (рис. 8.5).

## 8.3 Мощность

**Мощность (N)** – скалярная физическая величина, характеризующая быстроту совершения работы и численно равная работе, совершаемой за единицу времени.

$$N = \frac{dA}{dt}. \quad (8.5)$$

$$[N] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт (ватт}^* \text{)}.$$

Формула (8.5) даёт значение мгновенной мощности. Подставив в (8.5)  $\delta A = \vec{F} d\vec{r}$ , получим

$$N = \frac{\vec{F} d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \vec{v}. \quad (8.6)$$

Мгновенная мощность равна скалярному произведению силы на скорость тела.

Если работа совершается за время  $t$ , то средняя мощность

$$\langle N \rangle = \frac{A}{t}. \quad (8.7)$$

Эффективность работы принято характеризовать коэффициентом полезного действия (кпд).

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{затр}}} \cdot 100\%, \quad (8.8)$$

где  $A_{\text{п}}$  – полезная работа;  
 $A_{\text{затр}}$  – затраченная работа.

#### 8.4 Работа и мощность при вращательном движении

Рассмотрим вращение твёрдого тела относительно неподвижной оси под действием силы, направленной по касательной к окружности (рис. 8.6). Элементарная работа, совершаемая при повороте на угол  $d\varphi$

$$\delta A = F dS \cos \alpha.$$

Сила  $\vec{F}$  и перемещение  $d\vec{S}$  параллельны,  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ .

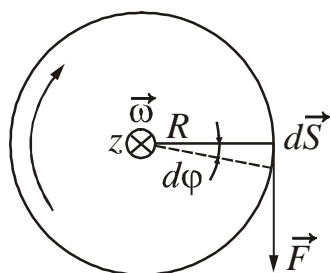


Рисунок 8.6

Тогда

$$dS = R d\varphi,$$

$$\delta A = FR d\varphi.$$

Произведение  $FR$  даёт момент силы относительно оси вращения:  $FR = M$ . Окончательно получим:

$$\delta A = M d\varphi, \quad (8.9)$$

$$A_{12} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d\varphi. \quad (8.10)$$

Если  $M = \text{const}$ , то

$$A = M\varphi. \quad (8.11)$$

\*Уатт Джеймс (1736–1819), английский изобретатель.

Разделив работу на время  $dt$ , за которое тело повернулось на угол  $d\varphi$ , получим мощность, развиваемую силой  $F$ :

$$N = \frac{\delta A}{dt} = M \frac{d\varphi}{dt} = M\omega,$$

$$N = M\omega,$$
(8.12)

где  $\omega$  – угловая скорость.

### • Давайте подумаем!

**8.1.** Совершается ли работа: 1) при равномерном движении тела под действием силы, перпендикулярной к перемещению? 2) при перемещении тела по инерции? 3) при перемещении тела под действием взаимно уравновешивающих сил?

**8.2.** Под действием силы  $F$ , совпадающей с направлением движения, тело перемещается на расстояние  $S$ . Одинакова ли работа данной силы при равномерном и ускоренном перемещении тела на этом пути?

**8.3.** При перетягивании каната одна из команд слегка отстывает перед усилиями другой. Какая работа и какой из команд при этом совершается?

**8.4.** Четверо рабочих на двух санях перевезли по одному и тому же пути металлолом. Веревки они натягивали с одинаковой силой, но рабочие первой пары шли рядом, а другой – поодаль друг от друга. Которая из пар совершила большую работу?

**8.5.** Как должна измениться мощность насоса, чтобы он стал перекачивать через узкое отверстие вдвое большее количество воды в единицу времени?

**8.6.** Если автомобиль въезжает на гору при неизменной мощности двигателя, то он уменьшает скорость движения. Почему?

**8.7.** Для подъёма грузов можно применять и наклонную плоскость, и наклонный транспортёр (бесконечную ленту, движущуюся по роликам). Какое из этих устройств имеет больший коэффициент полезного действия?

## §9 Энергия. Закон сохранения энергии

*Энергия – это единая мера всех форм движения материи и типов взаимодействия материальных объектов.* Понятие энергии связывает воедино все явления природы. В соответствии с различными формами движения материи рассматривают различные виды энергии: механическую, внутреннюю, электромагнитную, ядерную.

Механическая энергия бывает двух видов: кинетическая и потенциальная.

### 9.1 Кинетическая энергия

Пусть на материальную точку массой  $m$  действует сила  $\vec{F}$ . Найдём работу этой силы за время, в течение которого скорость точки изменится от  $v_1$  до  $v_2$ .



Элементарная работа силы  $\vec{F}$  на перемещении  $d\vec{r}$

$$\delta A = \vec{F} d\vec{r}.$$

По второму закону Ньютона  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ ,  $d\vec{p} = m d\vec{v}$ . Приняв, что  $m = \text{const}$ , сделаем замену. В результате получим:

$$\delta A = \frac{d\vec{p} d\vec{r}}{dt} = m \vec{v} d\vec{v}.$$

Проинтегрируем полученное выражение с учётом того, что скалярное произведение  $\vec{v} d\vec{v} = v dv$ .

$$A = \int_{v_1}^{v_2} m \vec{v} d\vec{v} = m \int_{v_1}^{v_2} v dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (9.1)$$

Величину  $\frac{mv^2}{2}$  обозначим через  $W_k$  и назовём кинетической энергией

$$W_k = \frac{mv^2}{2} \quad (9.2)$$

**Кинетическая энергия (или энергия движения) – часть механической энергии, которая определяется массой и скоростью материальной точки (тела).**

Таким образом, **изменение кинетической энергии тела равно работе всех сил, действующих на тело.**

$$A = \Delta W_k = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (9.3)$$

Выражение (9.3) называется теоремой об изменении кинетической энергии.

#### **Свойства кинетической энергии:**

1. Кинетическая энергия – величина скалярная.
2. Кинетическая энергия – величина положительная.
3. Кинетическая энергия – величина относительная, т.к. скорость зависит от выбора системы отсчёта.
4. Кинетическая энергия – величина аддитивная. Это означает, что кинетическая энергия системы равна сумме кинетических энергий частиц (тел), входящих в систему.

Энергия, которой обладает твёрдое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси, проходящей через центр масс тела, называется **кинетической энергией вращательного движения** этого тела. Эта энергия складывается из кинетических энергий материальных точек, составляющих тело:

$$W_k^{\text{вп}} = \sum_{i=1}^N W_i = \sum_{i=1}^N \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum_{i=1}^N \frac{m_i \omega^2 r_i^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^N m_i r_i^2,$$

где линейная скорость  $v_i = \omega r_i$ , а  $\sum_{i=1}^N m_i r_i^2 = J$  – момент инерции твёрдого тела.

Тогда кинетическая энергия вращающегося тела

$$W_{\text{к}}^{\text{вр}} = \frac{J\omega^2}{2} \quad (9.4)$$

Для вращательного движения также справедлива теорема об изменении кинетической энергии:

$$A = \frac{J\omega_2^2}{2} - \frac{J\omega_1^2}{2}. \quad (9.5)$$

Если все точки твёрдого тела перемещаются параллельно некоторой неподвижной плоскости, то движение называется **плоским**. Плоское движение разбивается на поступательное движение со скоростью центра масс и вращение вокруг оси, проходящей через центр масс. Кинетическая энергия в этом случае представляется в виде суммы двух независимых слагаемых, одно из которых определяется величинами, характеризующими поступательное движение, а другое – величинами, характеризующими вращательное движение.

$$W_{\text{к}} = W_{\text{к}}^{\text{пост}} + W_{\text{к}}^{\text{вр}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (9.6)$$

где  $v$  – скорость поступательного движения центра масс;

$\omega$  – угловая скорость относительно оси, проходящей через центр масс.

## 9.2 Потенциальная энергия

**Потенциальная энергия – часть механической энергии, которая зависит от природы сил, действующих между телами, а также от взаимного расположения тел или частей тела.**

### 9.2.1 Консервативные и неконсервативные силы

Силы, работа которых не зависит от формы траектории, а определяется лишь конечным и начальным положением тела, называют **консервативными**, а их поля – **потенциальными**. Работа консервативных сил на замкнутом пути равна нулю. Примеры консервативных сил: гравитационные, упругие, кулоновские.

Силы, работа которых зависит от формы траектории, называют **неконсервативными** или **диссипативными**, а их поля – **непотенциальными**. Работа неконсервативных сил на замкнутом пути не равна нулю. Примеры неконсервативных сил: силы сухого и вязкого трения, силы сопротивления, силы давления газа, силы вихревого электрического поля; силы, развиваемые какими-либо «источниками» сил (машинами, двигателями и т.д.).

### 9.2.2 Работа и потенциальная энергия

Рассчитаем работу некоторых консервативных сил.

#### 1. Работа силы упругости.

Для того чтобы растянуть пружину, надо приложить к ней некоторую силу  $F$ . При этом возникает сила упругости, равная по модулю приложенной силе. По закону Гука  $F_{\text{упр}} = -kx$ . Найдём работу, совершаемую силой упругости при растяжении пружины от  $x_1$  до  $x_2$ :

$$A = \int_1^2 \vec{F}_{\text{упр}} \cdot d\vec{r} = \int_{x_1}^{x_2} (-kx) dx = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right),$$

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (9.7)$$

Величину  $\frac{kx^2}{2}$  обозначим через  $W_{\text{п}}$  и назовём **потенциальной энергией упругого взаимодействия (упруго деформированной пружины)**.

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}. \quad (9.8)$$

Тогда

$$A = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = -\Delta W_{\text{п}}, \quad (9.9)$$

т. е. работа сил упругости равна убыли потенциальной энергии.

Работа сил упругости не зависит от промежуточного значения координаты и определяется лишь её конечным и начальным значениями. Следовательно, сила упругости – консервативная.

#### 2. Работа силы гравитационного взаимодействия.

В случае гравитационного притяжения двух тел массами  $m_1$  и  $m_2$  сила определяется законом всемирного тяготения (см. формулу (6.3)):

$$F(r) = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Работа, совершаемая при изменении расстояния  $r_1$  до  $r_2$ , равна:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} G \frac{m_1 m_2}{r^2} = -\left(\frac{Gm_1 m_2}{r_2} - \frac{Gm_1 m_2}{r_1}\right). \quad (9.10)$$

Величину  $-\frac{Gm_1 m_2}{r}$  обозначим через  $W_{\text{п}}$  и назовём **потенциальной энергией гравитационного взаимодействия двух тел**:

$$W_{\pi} = -G \frac{m_1 m_2}{r}. \quad (9.11)$$

Работа силы гравитационного взаимодействия равна убыли потенциальной энергии. Она определяется только начальным и конечным положением тела. Следовательно, сила гравитационного взаимодействия является консервативной.

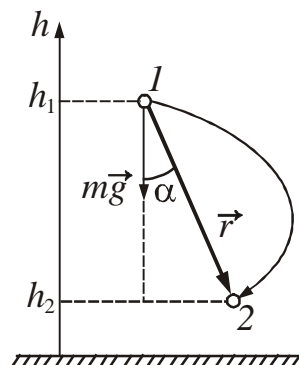


Рисунок 9.1

### 3. Работа силы тяжести.

Пусть материальная точка массой  $m$  переместилась по произвольной траектории вблизи поверхности Земли из точки 1 в точку 2 (рис. 9.1). Точки отстоят от поверхности Земли соответственно на расстояниях  $h_1$  и  $h_2$ . Работа, совершаемая силой тяжести

$$A = m\vec{g} \vec{r} = mgr \cos \alpha.$$

Из рис. 9.1 следует, что  $r \cos \alpha = h_1 - h_2$ . Таким образом,

$$A = mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1) \quad (9.10)$$

Величину  $mgh$  обозначим через  $W_{\pi}$  и назовём **потенциальной энергией материальной точки (тела) в поле силы тяжести Земли**.

$$W_{\pi} = mgh. \quad (9.11)$$

Работа силы тяжести также равна убыли потенциальной энергии. Она определяется только начальным и конечным положением тела. Следовательно, сила тяжести является консервативной.

### **Свойства потенциальной энергии:**

1. Потенциальная энергия может быть только взаимной: она в одинаковой степени характеризует оба взаимодействующих тела. Однако эту энергию часто приписывают одному из тел. Например, говорят о потенциальной энергии поднятого над Землёй тела. Так поступают для удобства анализа.
2. Числовое значение потенциальной энергии зависит от выбора **нулевого уровня** (начала отсчёта) потенциальной энергии. Выбрать нулевой уровень – значит выбрать такое относительное расположение взаимодействующих тел, при котором их взаимную потенциальную энергию можно условно принять равной нулю.
3. Потенциальная энергия может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это связано с произвольностью выбора начала отсчёта.
4. Состояние взаимодействующих тел можно описать потенциальной энергией только в том случае, если между телами действуют консервативные силы.

Из формул для расчёта работы можно сделать вывод, что **работа является мерой изменения механической энергии**. Это в одинаковой степени справедливо как для кинетической, так и для потенциальной энергии.

Если известно выражение для потенциальной энергии, то можно найти силу, действующую на материальную точку, в каждой точке поля. Для этого используют понятие градиента скалярной величины. Это понятие было введено в §3.

**Градиент скалярной величины** – это вектор, направленный в сторону максимального возрастания величины и численно равный изменению величины, приходящемуся на единицу длины в этом направлении.

**Консервативная сила равна градиенту потенциальной энергии частицы, взятому с обратным знаком.**

$$\vec{F} = -\text{grad } W_{\text{п}} . \quad (9.12)$$

Знак «минус» указывает на то, что сила направлена в сторону максимально быстрого убывания потенциальной энергии, т. е. против вектора градиента. Модуль силы равен изменению потенциальной энергии, приходящемуся на единицу длины.

Если при движении материальной точки (тела) изменяются все три координаты, то градиент потенциальной энергии расписывается следующим образом:

$$\text{grad } W_{\text{п}} = \vec{i} \frac{\partial W_{\text{п}}}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial W_{\text{п}}}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial W_{\text{п}}}{\partial z} ,$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – единичные векторы, имеющие направления прямоугольных координатных осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ .

Если движение происходит вдоль одной координатной оси, то модуль силы рассчитывается следующим образом:

$$F_x = -\frac{\partial W_{\text{п}}}{\partial x} . \quad (9.13)$$

### 9.2.3 Графическое представление потенциальной энергии

График зависимости потенциальной энергии от координат называется **потенциальной кривой**. Рассмотрим одну из возможных потенциальных кривых для двух материальных точек (рис. 9.2). Одна из этих точек находится в начале координат, а вторая перемещается вдоль направления  $r$ .

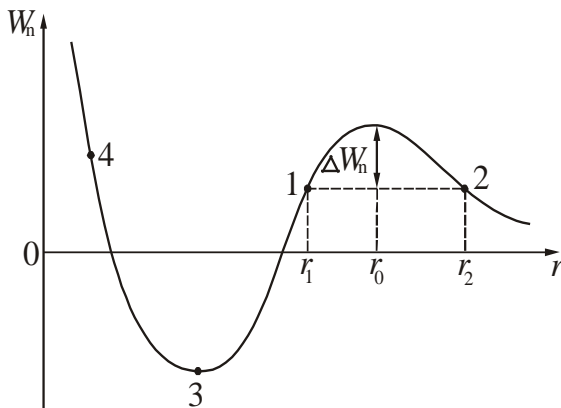


Рисунок 9.2

Если при движении материальной точки её потенциальная энергия резко возрастает, то говорят о существовании **потенциального барьера**, о высоте барьера, его ширине, наклоне стенок и т. д.

Например, для точки, находящейся в положении 1 с координатой  $r_1$  высота барьера  $\Delta W_{\text{п}}$ , а ширина барьера  $r_2 - r_1$ . Если потенциальный барьер встречается на пути точки как в положительном, так и в отрицательном направлениях оси  $r$ , то говорят, что точка находится в потенциальной яме.

**Потенциальная яма** – ограниченная область пространства, в котором потенциальная энергия частицы меньше, чем вне её. На рис. 9.2 – это участок 4-3-1. Форму и глубину потенциальной ямы определяет вид зависимости потенциальной энергии от координат. Приведём примеры реальных потенциальных кривых.

На рис. 9.3 а изображена потенциальная кривая материальной точки, совершающей колебания на пружине. Её потенциальная энергия

$$W_{\text{п}} = \frac{kr^2}{2}.$$

Как следует из рисунка, материальная точка находится в потенциальной яме с симметричными стенками.

На рис. 9.3 б изображена потенциальная кривая взаимодействия двух молекул реального газа. Особенностью кривой является её асимметрия: один край крутой, а другой – пологий.

Кривая на рис. 9.3 в изображает потенциальную энергию свободных электронов в ме-

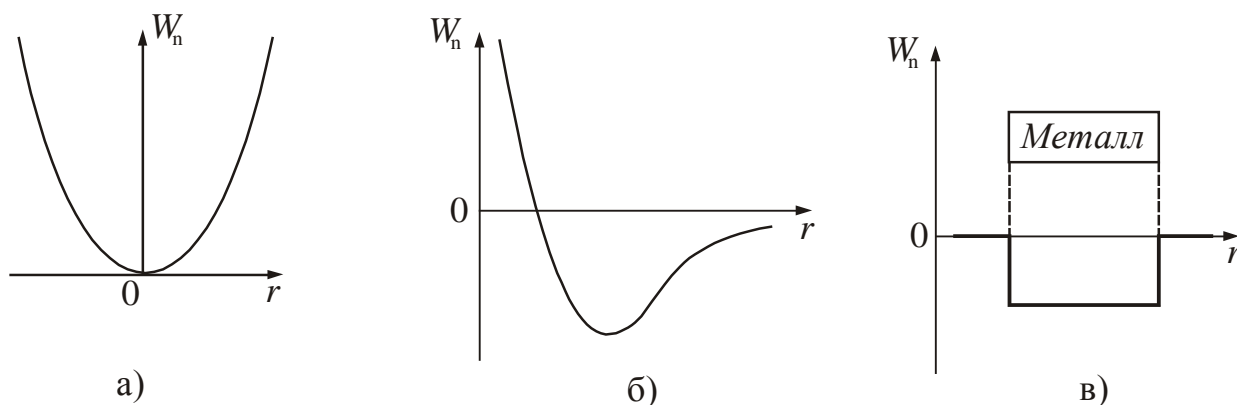


Рисунок 9.3

талле и за его пределами. Свободные электроны в металле находятся в потенциальной яме. Стенки ямы почти вертикальны. Это означает, что электрическая сила, действующая на электроны на границе металла с вакуумом очень велика. Гладкое горизонтальное дно ямы означает, что на свободные электроны внутри металла сила не действует.

Анализ потенциальных кривых взаимодействия частиц в твёрдом теле позволяет установить характер и границы движения частиц, объяснить причины теплового расширения и т. д. Рассмотрение потенциальных кривых свободных электронов в металлах позволяет понять и объяснить такие явления, как термоэлектронная эмиссия, возникновение контактной разности потенциалов, термоэлектродвижущей силы и т. д.

### 9.3 Закон сохранения механической энергии

Материальная точка может одновременно обладать и кинетической, и потенциальной энергией. Сумма кинетической и потенциальной энергий точки называется её полной механической энергией  $W$ .

$$W = W_{\text{к}} + W_{\text{п}} \quad (9.14)$$

Рассмотрим систему, которая состоит из  $N$  материальных точек, взаимодействующих друг с другом. Силы взаимодействия между точками будем считать консервативными. Система также находится под воздействием внешних

сил, как консервативных, так и неконсервативных. Определим работу, совершаемую этими силами. Суммарная работа всех сил по теореме об изменении кинетической энергии:

$$A = W_{K_2} - W_{K_1}.$$

С другой стороны, работа  $A$  равна сумме работ, совершаемых внешними консервативными и неконсервативными силами, а также внутренними консервативными:

$$A = A_{\text{конс}}^{\text{внеш}} + A_{\text{неконс}}^{\text{внеш}} + A_{\text{конс}}^{\text{внутр}}.$$

Работа внутренних консервативных сил равна убыли взаимной потенциальной энергии тел

$$A_{\text{конс}}^{\text{внутр}} = -(W_{\Pi_2} - W_{\Pi_1}).$$

Если система является замкнутой (см. п. 6.6), то  $A_{\text{конс}}^{\text{внеш}} = 0$ ,  $A_{\text{неконс}}^{\text{внеш}} = 0$ .

В этом случае

$$-(W_{\Pi_2} - W_{\Pi_1}) = W_{K_2} - W_{K_1}.$$

Сгруппируем члены уравнения следующим образом:

$$W_{K_1} + W_{\Pi_1} = W_{K_2} + W_{\Pi_2}.$$

Это означает, что для любых двух состояний:

$$W_K + W_{\Pi} = \text{const}. \quad (9.15)$$

Мы пришли к закону сохранения механической энергии.

***Полная механическая энергия замкнутой системы материальных точек (тел), между которыми действуют только консервативные силы, остается постоянной.***

Действие неконсервативных сил (например, сил трения) уменьшает механическую энергию системы. Такой процесс называется **диссипацией** энергии («диссипация» означает «рассеяние»). Силы, приводящие к диссипации энергии, называются диссипативными. При диссипации энергии механическая энергия системы преобразуется в другие виды энергии (например, во внутреннюю энергию). Преобразование идёт в соответствии со всеобщим законом природы – законом сохранения энергии.

Закон сохранения энергии применим ко всем без исключения процессам в природе. Его можно сформулировать следующим образом:

***Полная энергия изолированной системы всегда остается постоянной, энергия лишь переходит из одной формы в другую.***

**Посмотрите лекционные демонстрации:**

1. Маятник Максвелла.

<http://youtube.com/watch?v=4ynUF1Jy2sE&list=PL32C81AC7B5EA0E12>

2. Шарик в мёртвой петле.

<http://youtube.com/watch?v=roFrbTwvKxg&list=PL32C81AC7B5EA0E12>

• Давайте подумаем!

**9.1.** Может ли кинетическая энергия тела изменяться, если на него не действуют силы?

**9.2.** Может ли кинетическая энергия тела оставаться неизменной, если равнодействующая приложенных к этому телу сил отлична от нуля?

**9.3.** Всегда ли потенциальная энергия тела, поднятого над землей, может определяться по формуле  $W_{\text{п}} = mgh$ ?

**9.4.** Вода, попадающая в турбину гидроэлектростанции, вращает рабочее колесо турбины. 1) Вся ли энергия падающей воды преобразуется в механическую энергию вращения колеса? 2) Полной или полезной является мощность, развиваемая падающей водой и турбиной?

**9.5.** Что происходит с потенциальной энергией лифта, когда он опускается с верхнего этажа здания и останавливается на нижнем?

**9.6.** Решая задачу об окончательной скорости тела, брошенного вертикально вниз с высоты  $h$ , студент написал закон сохранения энергии так:  $\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} - mgh = A$ . Затем он подставил вместо работы  $A$  произведение  $mgh$ .

Какая ошибка при этом была допущена?

**9.7.** Как узнать, какой из двух одинаковых по величине цилиндров полый, если они сделаны из неизвестных материалов разной плотности? Массы цилиндров равны.

**9.8.** Конькобежец вращается вокруг вертикальной оси с вытянутыми в сторону руками. Как и за счёт чего изменится кинетическая энергия спортсмена, если он поднимет руки вверх? Силой трения пренебречь.

## §10 Соударение тел

Предельными, идеализированными видами соударений являются абсолютно неупругий и абсолютно упругий удары. **Абсолютно неупругим называется удар, при котором потенциальная энергия упругой деформации не возникает; кинетическая энергия тел частично или полностью переходит во внутреннюю.** После удара тела движутся с одинаковой скоростью (т. е. как одно тело) или покоятся. При таком ударе выполняется только закон сохранения импульса. Механическая энергия не сохраняется – она частично или полностью переходит во внутреннюю.

**Абсолютно упругим называется удар, при котором полная механическая энергия тел сохраняется.** Сначала кинетическая энергия частично или



полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Затем тела возвращаются к первоначальной форме, отталкивая друг друга. В итоге потенциальная энергия снова переходит в кинетическую, и тела разлетаются. При таком ударе выполняются закон сохранения механической энергии и закон сохранения импульса.

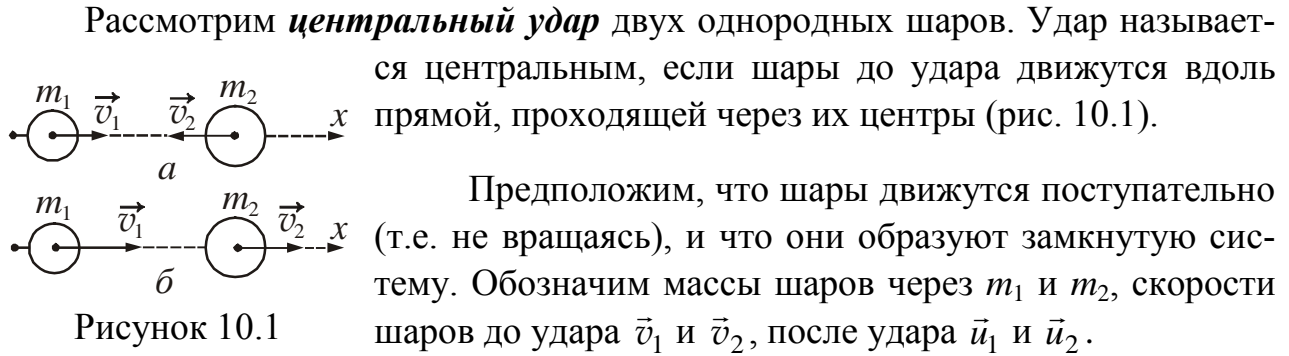


Рисунок 10.1

### 1. Абсолютно неупругий удар.

По закону сохранения импульса

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{u} \quad (10.1)$$

где  $\vec{u}$  – общая скорость шаров после удара.

Отсюда

$$\vec{u} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (10.2)$$

Для числовых расчётов все векторы проецируются на ось  $x$  (рис. 10.1).

### 2. Абсолютно упругий удар.

Запишем закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 \quad (10.3 \text{ а})$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} \quad (10.3 \text{ б})$$

Решив полученную систему уравнений (попробуйте выполнить это самостоятельно), найдём скорости шаров после удара.

$$\vec{u}_1 = \frac{2m_2 \vec{v}_2 + (m_1 - m_2) \vec{v}_1}{m_1 + m_2}. \quad (10.4)$$

$$\vec{u}_2 = \frac{2m_1\vec{v}_1 + (m_2 - m_1)\vec{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad (10.5)$$

Чтобы выполнить расчёты, необходимо спроецировать векторы скоростей на ось  $x$  (рис. 10.1). Если при расчёте какая-то проекция скорости окажется отрицательной, то это означает, что вектор этой скорости направлен в сторону, противоположную направлению оси  $x$ .

### Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Удар шаров (абсолютно упругий)  
[http://youtube.com/watch?v=\\_0y\\_J5KqQA8&list=PLWM8IO-3TQjNCIENKwsbTo1TVUsMk8jzT](http://youtube.com/watch?v=_0y_J5KqQA8&list=PLWM8IO-3TQjNCIENKwsbTo1TVUsMk8jzT)
2. Удар шаров (абсолютно неупругий) <http://youtube.com/watch?v=RWeF1r-Epbw&list=PLWM8IO-3TQjNCIENKwsbTo1TVUsMk8jzT>

В заключение отметим, что величины, характеризующие динамику вращательного движения, и формулы, описывающие это движение, аналогичны соответствующим величинам и формулам поступательного движения. Эта аналогия прослеживается в таблице 10.1.

### • Давайте подумаем!

**10.1.** Когда покоящийся шар приобретает большую скорость от другого такого же шара: при упругом или неупругом центральном ударе?

**10.2.** Товарный вагон, движущийся по горизонтальному пути с небольшой скоростью, сталкивается с другим вагоном и останавливается. При этом пружина буфера сжимается. Какое преобразование энергии происходит при этом процессе?

**10.3.** Решение задач о скорости тел, испытывающих неупругий удар, не удаётся довести до числового ответа, если пользоваться законом сохранения энергии. Можно ли, несмотря на это, считать закон сохранения энергии верным для всех известных нам процессов?

Таблица 10.1. Сопоставление формул кинематики и динамики поступательного и вращательного движения

Поступательное движение	Вращательное движение
<i>Основные характеристики кинематики</i>	
$S$ – путь $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ – линейная скорость $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ – линейное ускорение	$\varphi$ – угол поворота $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$ – угловая скорость $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ – угловое ускорение
<i>Уравнения движения</i>	
<i>Равномерное движение</i> $v = \text{const}, \quad S = vt$	<i>Равномерное вращение</i> $\omega = \text{const}, \quad \varphi = \omega t$
<i>Равнопеременное движение</i> $a = \text{const}, \quad v = v_0 \pm at$ $S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$	<i>Равнопеременное вращение</i> $\varepsilon = \text{const}, \quad \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$ $\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}$
<i>Основные характеристики динамики</i>	
$m$ – масса тела $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс тела $\vec{F}$ – сила	$J$ – момент инерции $\vec{L} = J\vec{\omega}$ – момент импульса твёрдого тела относительно оси вращения $\vec{M}$ – момент силы
<i>Основное уравнение</i>	
$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ Если $m = \text{const}$ , то $\vec{F} = m\vec{a}$	$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ Если $J = \text{const}$ , то $\vec{M} = J\vec{\varepsilon}$
<i>Энергия, работа, мощность</i>	
$W_{\text{к}}^{\text{пост}} = \frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия	$W_{\text{к}}^{\text{вр}} = \frac{J\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия
$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ – теорема об изменении кинетической энергии	$A = \frac{J\omega_2^2}{2} - \frac{J\omega_1^2}{2}$ – теорема об изменении кинетической энергии
$\delta A = F_r dr$ – работа	$\delta A = M d\varphi$ – работа
$N = Fv$ – мощность	$N = M\omega$ – мощность
<i>Законы сохранения</i>	
$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + \dots = \text{const}$ – закон сохранения импульса	$J_1\vec{\omega}_1 + J_2\vec{\omega}_2 + \dots = J_1'\vec{\omega}_1' + J_2'\vec{\omega}_2' + \dots$ – закон сохранения момента импульса

## §11 Элементы гидромеханики

**Гидромеханика** – раздел физики, в котором изучаются условия равновесия и законы движения жидкостей. Гидромеханику в соответствии с этим подразделяют на гидростатику и гидродинамику. При изучении движения жидкостей их рассматривают как сплошную непрерывную среду, не вдаваясь в молекулярное строение. Перечислим основные свойства жидкостей.

Отличительной особенностью жидкостей является их **текучесть**, которая объясняется тем, что силы трения, возникающие при относительном движении соприкасающихся слоёв жидкости, малы.

Жидкости, в отличие от твёрдых тел, не сохраняют своей формы, а принимают форму того сосуда, в котором находятся.

Жидкости, в отличие от газов, имеют поверхностный слой (свободную поверхность), а также бóльшую плотность при одинаковых условиях.

Плотность жидкостей практически не зависит от давления. Жидкость, плотность которой повсюду одинакова и изменяться не может, называется **несжимаемой**.

### 11.1 Гидростатика

Взаимодействия между слоями жидкости и газа, жидкости и твёрдого тела осуществляются не в отдельных точках, а по площади соприкосновения. Возникающие при этом силы упругости препятствуют изменению объёма, и всегда направлены перпендикулярно рассматриваемым площадкам. Поэтому в гидростатике (гидродинамике) эти взаимодействия характеризуют давлением.

**Давление** – скалярная физическая величина, равная отношению силы давления  $F_{\perp}$  к площади поверхности  $S$ .

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}, \quad (11.1)$$

$$[p] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па (паскаль*)}.$$

Любая частица сплошной среды находится в равновесии, если равна нулю равнодействующая сил, действующих на неё со стороны соседних частиц. Отсюда вытекает **закон Паскаля**:

**Неподвижная жидкость передаёт внешнее давление одинаково по всем направлениям.**

При выяснении условий равновесия какой-то частицы жидкости надо учитывать не только силы её упругого взаимодействия с соседними частицами, но и силу тяжести данной частицы. Это приводит к тому, что давление жидкости на разных уровнях будет неодинаковым.

Пусть на уровне поверхности жидкости давление равно  $p_0$  (рис. 11.1).

---

\*Паскаль Блез (1623–1662), французский математик и физик.

Это может быть атмосферное давление, давление поршня, прилегающего к поверхности жидкости и т. д. Давление  $p$  на произвольной глубине  $h$  будет равно:

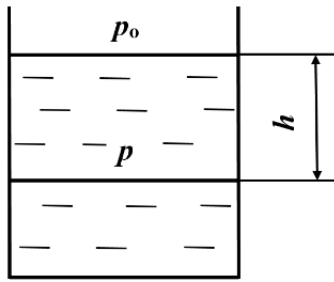


Рисунок 11.1

$$p = p_0 + \rho gh \quad (11.2)$$

и в данной точке по закону Паскаля будет одним и тем же по всем направлениям.

Давление, вызванное силой тяжести и зависящее от глубины под поверхностью жидкости, называется **гидростатическим**.

Гидростатическое давление учитывают при расчёте сил, с которыми жидкость действует на дно и стенки сосуда, при выводе условий равновесия столбов жидкости в сообщающихся сосудах и т. д.

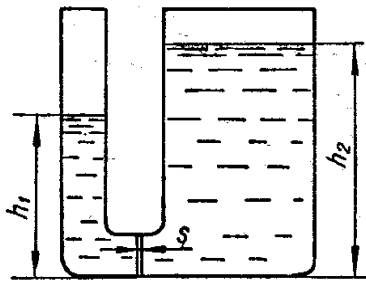


Рисунок 11.2

В основе гидростатики лежат следующие законы.

*Закон сообщающихся сосудов (рис. 11.2).*

**В сообщающихся сосудах уровни однородной жидкости одинаковы. Если жидкости разнородные, то высоты столбов жидкости обратно пропорциональны плотностям этих жидкостей.**

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (11.3)$$

*Закон Архимеда\**. (Этот закон уже рассматривался в §6, п. 6.2)

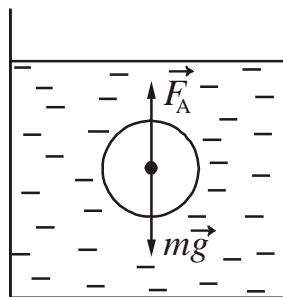


Рисунок 11.3

**На тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости** (рис. 11.3).

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V, \quad (11.4)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;

$V$  – объём погружённой части тела.

Причиной появления выталкивающей силы является то, что на разных глубинах гидростатическое давление неодинаково.

Если сила тяжести будет меньше, чем выталкивающая сила ( $mg < F_A$ ), то тело всплывёт. Тело всплывает до тех пор, пока не будет выполнено условие равенства сил:  $mg = F_A$ . Если сила тяжести больше выталкивающей силы ( $mg > F_A$ ), то тело тонет.

## 11.2 Гидродинамика

При изучении движения жидкости, как правило, следят не за частицами, а за отдельными точками пространства и отмечают скорость, с которой проходят через эти точки частицы жидкости. Движение жидкости, при котором скорость

частиц жидкости в фиксированных точках не зависит от времени, называется **стационарным**. Если же в фиксированных точках пространства скорость жидкости с течением времени изменяется, то движение жидкости называется **нестационарным**.

Течение жидкости, при котором её соприкасающиеся слои движутся без перемешивания, называется **ламинарным**. Если слои жидкости перемешиваются, то течение называется **турбулентным**. Ламинарное течение может быть как стационарным, так и не стационарным. Турбулентное движение всегда нестационарно.

При перемещении слоёв жидкости относительно друг друга возникают силы, препятствующие этому перемещению. Эти силы называются силами внутреннего трения, а явление их возникновения – **вязкостью или внутренним трением**. Направлены силы внутреннего трения вдоль соприкасающихся слоёв (а не перпендикулярно слоям, как силы упругости). При рассмотрении движения жидкости в ряде случаев можно считать, что силы трения пренебрежимо малы. Такая абсолютно несжимаемая и абсолютно невязкая жидкость на-

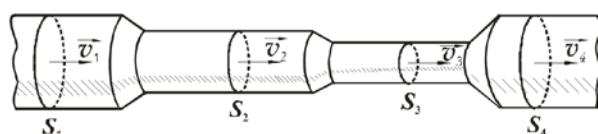


Рисунок 11.4

зывается **идеальной**. Надо понимать, что идеальная жидкость является физической моделью и служит лишь более или менее хорошим приближением к реальным жидкостям.

Предположим, что идеальная жидкость течёт по горизонтальной трубе, сечение которой в разных местах различное (рис. 11.4). Объём жидкости, проходящей через поперечное сечение трубы за время  $t$ , будет равным

$$V = S v t, \quad (11.5)$$

где  $v$  – скорость частиц жидкости,  $S$  – площадь поперечного сечения трубы.

Жидкость не скапливается в отдельных частях трубы и не образует в ней пустот, поэтому при стационарном течении объёмы жидкости, протекающие в единицу времени через произвольные сечения  $S_1$  и  $S_2$  должны быть одинаковыми:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2. \quad (11.6)$$

**Для несжимаемой жидкости при стационарном течении произведение  $Sv$  в любом сечении данной трубки имеет одинаковое значение.**

$$Sv = \text{const} \quad (11.7)$$

Уравнение (11.7) называется **уравнением неразрывности** для стационарного течения жидкости. При стационарном течении несжимаемой невязкой жидкости в тех местах, **где труба шире, жидкость течёт медленнее, а в тех местах, где труба уже, жидкость течёт быстрее.**

При переходе жидкости с участка трубы с большей площадью сечения, на участок с меньшей площадью сечения, скорость увеличивается, т. е. жидкость

движется с ускорением (рис. 11.5). По второму закону Ньютона это означает, что на жидкость действует сила. Этой силой является разность между силами давления в широком и узком участках трубы. Таким образом, **давление жидкости должно быть больше там, где больше сечение**. При этом должен выполняться закон сохранения энергии. Из него вытекает **уравнение Д. Бернулли\***.

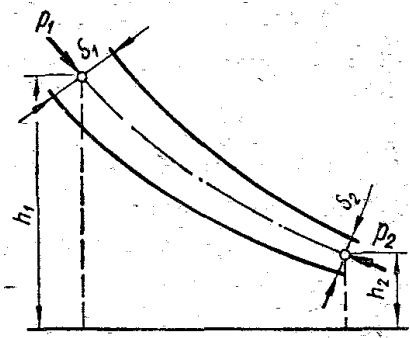


Рисунок 11.5

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2, \quad (11.8)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – модуль скорости течения жидкости в сечении трубки, находящемся на высоте  $h$  от условно выбранного уровня,  $p$  – давление, вызванное силами упругости, в том же сечении трубки.

При горизонтальном течении жидкости ( $h_1 = h_2 = \text{const}$ ) уравнение Бернулли упрощается:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2. \quad (11.9)$$

Давление  $p$  в этом уравнении называется статическим давлением, величина  $\frac{\rho v^2}{2}$  – динамическим давлением, сумма  $(\frac{\rho v^2}{2} + p)$  – полным давлением.

Если вдоль трубы установить ряд манометрических трубок (рис. 11.6), то по высоте уровня жидкости в этих трубках можно определить давление. Опыт

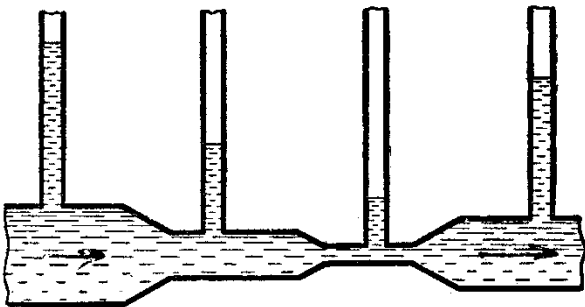


Рисунок 11.6

показывает, что в манометре, прикрепленном к самой широкой части трубы, наблюдается самый высокий уровень жидкости, а в манометре, прикрепленном к узкой части трубы, – самый низкий. Это подтверждает то, что **давление жидкости больше там, где больше сечение**.

Уравнение Бернулли нельзя применять к вязким жидкостям, так как в результате работы сил трения часть энергии превращается в тепло. Но для такой жидкости как вода, уравнение Бернулли выполняется достаточно точно.

\*Бернулли Даниил (1700–1782), швейцарский учёный.

### 11.3 Измерение давления в потоке жидкости

Поместим в поток жидкости неподвижную трубку, загнутую нижним открытым концом против потока и соединённую с манометром (рис. 11.7). Такая трубка называется **трубкой Пито\***.

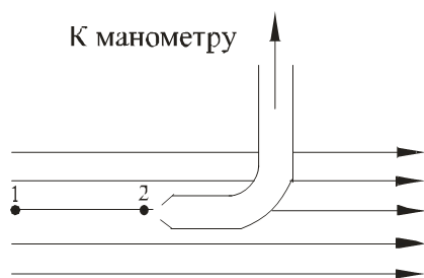


Рисунок 11.7

Трубка нарушит характер движения жидкости. В точке 1 давление равно давлению в невозмущённом потоке, в точке 2 непосредственно перед отверстием давление равно нулю. Напишем уравнение (11.9) для точек 1 и 2 с учётом того что  $v_2 = 0$ :

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = p_2, \quad (11.10)$$

где  $p_1$  равно давлению в невозмущённом потоке,  $p_2$  – давлению, измеряемому манометром. Таким образом, трубка Пито измеряет полное давление.

Теперь поместим в поток изогнутую трубку с закрытым концом и боковыми отверстиями (рис. 11.8). Такая трубка называется **зондом**. Скорость жидкости вблизи отверстий будет мало отличаться от скорости в невозмущённом потоке. Это же можно сказать и о давлениях. Поэтому манометр, присоединённый к зонду, покажет статическое давление  $p$ .

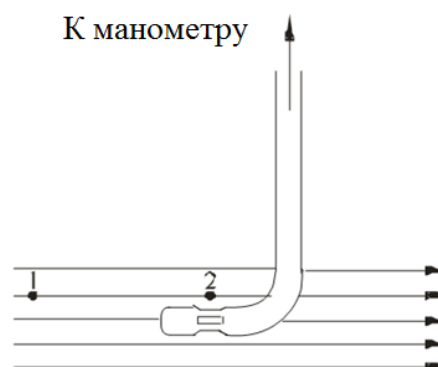


Рисунок 11.8

Для измерения динамического давления используют трубку **Пито – Прандтля\*** (рис. 11.9). Оно определяется по разности уровней, а манометр, присоединённый к такой трубке, непосредственно даёт значение динамического давления. Для заданной плотности жидкости манометр можно проградуировать в значениях скорости. Таким образом, трубку Пито – Прандтля можно использовать для измерения скорости течения жидкости.

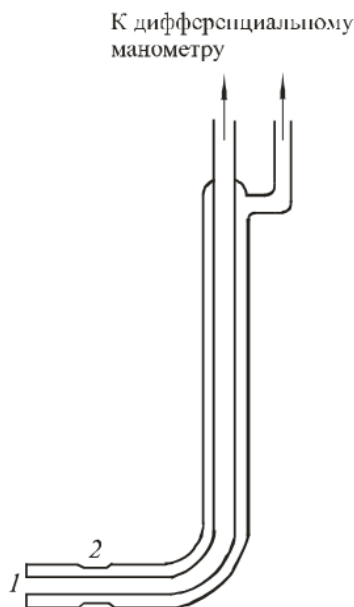


Рисунок 11.9

### 11.4 Расчёт скорости истечения жидкости

Покажем, как можно рассчитать скорость истечения невязкой несжимаемой жидкости из малого отверстия в открытом сосуде. Запишем уравнение Бернулли для поверхности  $S_1$  жидкости в сосуде и поперечного сечения  $S_2$  выходного отверстия (рис. 11.10):

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2, \quad (11.11)$$

\*Пито Анри (1695–1771), французский инженер-гидравлик и геометр.

\*Прандтль Людвиг (1875–1953), немецкий физик и механик.



где  $p_1$  и  $p_2$  – атмосферное давление на высоте  $h_1$  и  $h_2$  соответственно. Так как в пределах столба жидкости оно практически не меняется, то можно считать, что  $p_1 = p_2$ . Следовательно,

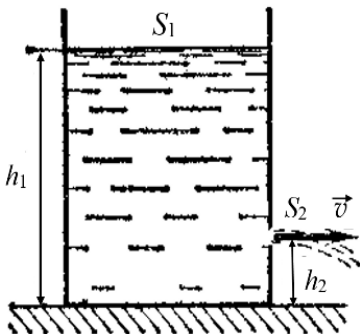


Рисунок 11.10

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2, \quad (11.12)$$

Площадь свободной поверхности жидкости  $S_1$  намного больше площади поперечного сечения отверстия  $S_2$ . Тогда из уравнения неразрывности  $S_1 v_1 = S_2 v_2$  следует, что  $v_1 \ll v_2$ . В этом случае можно пренебречь первым слагаемым в уравнении (11.12). Получим:

$$\rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2, \quad (11.13)$$

Из (11.13) получим формулу для расчёта скорости истечения жидкости из отверстия:

$$v = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}. \quad (11.13)$$

Данную формулу называют формулой Торричелли\*. Это исследование заложило основу теоретического фундамента гидравлики, построение которого сто лет спустя завершил Бернулли.

Обратите внимание на то, что скорость истечения жидкости из отверстия, находящегося на глубине  $h = h_1 - h_2$  под открытой поверхностью жидкости, совпадает со скоростью, которое приобретает тело, падая с высоты  $h$ . Для реальных жидкостей скорость будет меньше. Причём, чем больше вязкость жидкости, тем меньше скорость.

### • Давайте подумаем!

**11.1.** В каком случае применение уравнения Бернулли связано с меньшей погрешностью: при расчёте водопровода или при расчёте нефтепровода?

**11.2.** При выводе уравнения Бернулли предполагается, что движущееся вещество несжимаемо и не обладает вязкостью. Какое из этих требований более полно выполняется для жидкости? для газа?

**11.3.** Почему струя жидкости, вытекая из дна сосуда, сужается книзу?

**11.4.** Для чего брандспойт делают сужающимся на конце?

**11.5.** Если вблизи нас проходит скорый поезд, то мы чувствуем, как нас притягивает нему. Объясните почему.

**11.6.** Почему при выпуске воды из ванны над сливным отверстием образуется воронка, а иногда и воздушный канал?

\*Торричелли Эванджелиста (1608–1647), итальянский математик и физик.

## Глава 4. Элементы специальной теории относительности

## §12 Элементы специальной теории относительности

**Теория относительности** – физическая теория, рассматривающая пространственно-временные закономерности, справедливые для любых физических процессов.

Специальная теория относительности (СТО) изучает свойства пространства и времени в инерциальных системах отсчёта при отсутствии полей тяготения. Напоминаем, что инерциальными называются системы отсчёта, относительно которых тело находится в состоянии покоя или движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела или действие этих тел скомпенсировано.

Специальную теорию относительности также называют релятивистской теорией.

## 12.1 Принцип относительности Галилея

Галилей первым обратил внимание на то, что никакими механическими опытами, проведёнными внутри инерциальной системы отсчёта, невозможно установить покоится она или движется прямолинейно и равномерно. Вероятно, что многие из вас попадали в такую ситуацию: смотришь на поезд, стоящий на соседнем пути и вдруг начинает казаться, что вагон, в котором находишься, начинает двигаться. А на самом деле начинает двигаться соседний вагон. Приведённый пример является проявлением **принципа относительности Галилея\***. Его положения заключаются в следующем:

1. Все механические явления во всех инерциальных системах отсчёта протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.
2. Законы механики во всех инерциальных системах отсчёта формулируются одинаково.

Покажем это. Сопоставим описания движения частицы в инерциальных системах отсчёта  $K$  и  $K'$ . Система  $K'$  движется относительно  $K$  с постоянной скоростью  $v$  в направлении оси  $x$  (рис. 12.1). Координаты точки  $M$  в системе  $K$  и  $K'$  будут связаны соотношениями:

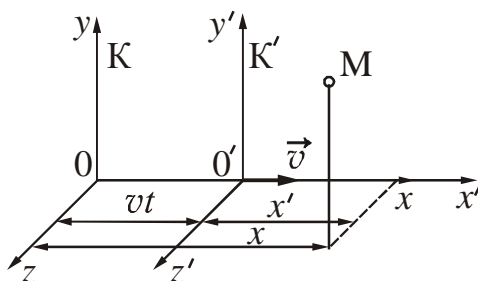


Рисунок 12.1

$$\begin{aligned}
 x &= x' + vt & x' &= x - vt \\
 y &= y' & y' &= y \\
 z &= z' & z' &= z \\
 t &= t' & t' &= t
 \end{aligned}
 \tag{12.1}$$

Совокупность уравнений (12.1) называется **преобразованиями Галилея**. Равенство  $t' = t$ , означает, что время в обеих системах течёт одинаково.

\*Галилей Галилео (1564–1642), итальянский физик и математик.

Таким образом, преобразования Галилея позволяют, зная координаты в одной инерциальной системе отсчёта, определить координаты в другой инерциальной системе отсчёта.

Продифференцируем первое из уравнений (12.1) по времени, учтя, что  $t' = t$ .

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v,$$

$\frac{dx}{dt} = V_x$  – скорость точки М вдоль оси  $x$  в системе К.

$\frac{dx'}{dt} = v'_x$  – скорость точки М вдоль оси  $x'$  в системе К'.

Следовательно:

$$V_x = v'_x + v \quad (12.2)$$

Аналогичные уравнения можно было бы получить для  $v_y$  и  $v_z$ . Уравнение (12.2) в этом случае можно записать в векторном виде.

$$\vec{V} = \vec{v}' + \vec{v} \quad (12.3)$$

Уравнение (12.3) представляет собой классический закон сложения скоростей: скорость частицы относительно системы К равна сумме скорости частицы относительно системы К' и скорости системы К' относительно системы К. Продифференцируем по времени (12.3) и придём к равенству:

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (12.4)$$

( $v = \text{const}$ ,  $dv/dt = 0$ )

Таким образом, ускорения точки относительно систем К и К' одинаковы. Масса тела при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой не меняется, следовательно

$$m\vec{a} = m'\vec{a}', \text{ или } \vec{F} = \vec{F}'. \quad (12.5)$$

Это означает, что сила, действующая на частицу в системе К, равна силе, действующей на частицу в системе К'. Системы К и К' были взяты произвольно, поэтому можно утверждать, что полученный результат будет выполняться во всех инерциальных системах отсчёта.

Величины, которые имеют одно и то же значение во всех системах отсчёта, называются **инвариантными** (*invariantis – неизменяющийся*). В преобразованиях Галилея инвариантными величинами являются масса, ускорение, сила, время. Неинвариантные: скорость, импульс, кинетическая энергия.

## 12.2 Постулаты специальной теории относительности

В основе специальной теории относительности лежат два постулата (принципа): принцип относительности Эйнштейна и принцип постоянства скорости света. Принцип относительности Эйнштейна является распространением механического принципа Галилея на все без исключения физические явления.

1. Во всех инерциальных системах отсчёта все физические явления (механические, оптические, тепловые и т. д.) протекают одинаково (при одинаковых условиях). Это означает, что уравнения, выражающие законы природы, инвариантны по отношению к преобразованиям координат и времени при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой.

2. Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта, не зависит от скорости движения источника и приёмника света, является предельным значением скорости передачи сигнала.

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Справедливость этого утверждения была доказана в 1887 году опытом Майкельсона\* и Морли\*. В этом опыте определялась разность времён, которую затрачивает свет на прохождение одного и того же пути туда и обратно в направлении скорости движения Земли и в перпендикулярном ему направлении. Никакого различия времён обнаружено не было. Таким образом, было установлено, что скорость света является одинаковой во всех инерциальных системах отсчёта.

Тем не менее, попытки опровержения или существенного пересмотра СТО не прекращаются. Эти попытки мотивируются недостаточной убедительностью экспериментальных подтверждений её основ. За последние несколько десятков лет учёными неоднократно предпринимались различные попытки экспериментального доказательства второго постулата СТО. Так академик С. И. Вавилов\* предложил спроектировать установку, в которой источником света был бы пучок быстрых возбуждённых атомов. В процессе детальной проработки плана эксперимента оказалось, что нет шансов получить надёжный результат, поскольку при технике тех дней нельзя было рассчитывать на пучки нужной скорости и плотности: опыт не был осуществлён.

Эксперимент Вавилова удалось осуществить на базе Курчатовского центра синхротронного излучения в 2011 году. Источником света служил сгусток электронов, двигающийся по искривлённой траектории со скоростью, очень близкой к скорости света. Впервые было осуществлено прямое измерение скорости света, испущенного ультрарелятивистским источником. В данном случае не ставилась цель уточнить скорость света. Была восполнена историческая недоработка в экспериментальном обосновании второго постулата СТО.

### 12.3 Преобразования Лоренца

Преобразования, которые удовлетворяют постулатам Эйнштейна, называются **преобразованиями Лоренца\***. Если система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v$ , направленной вдоль оси  $x$  (рис.12.1), то эти преобразования имеют вид:

\*Майкельсон Альберт Абрахам (1852–1931), американский физик, лауреат Нобелевской премии 1907 г.

\*Морли Эдвард Уильямс (1838–1923), американский физик и химик.

\*Вавилов Сергей Иванович (1891–1951), российский физик

\*Лоренц Хендрик Антон (1853–1928), нидерландский физик.

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad (12.6)$$

Проанализируем преобразования Лоренца:

1. Если  $v \ll c$ , то  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1$ .

Преобразования Лоренца при этом перейдут в преобразования Галилея. Это означает, что выполняется **принцип соответствия**. Принцип соответствия состоит в том, что всякая новая теория содержит в себе старую теорию в качестве частного случая.

2. Предположим, что  $v > c$ . При этом  $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) < 0$ .

Это означает, что преобразования не имеют смысла. Отсюда следует, что движение со скоростью  $v > c$  невозможно.

3. Из преобразований Лоренца видно, что временные и пространственные координаты взаимосвязаны.

Используя преобразования Лоренца можно получить релятивистский закон сложения скоростей:

$$V = \frac{v' + v}{1 + \frac{v}{c^2} v'} \quad (12.7)$$

Если  $v$  и  $v'$  много меньше скорости света, то

$$V = v' + v$$

Это означает, что уравнение (12.7) переходит в классический закон сложения скоростей (см. формулу (12.3)).

## 12.4 Следствия из преобразований Лоренца

Из преобразований Лоренца вытекает ряд необычных с точки зрения классической ньютоновской механики следствий.

1. Понятие одновременности событий относительно, а не абсолютно, как это считается в классической механике. Это означает, что события, одновременные,

но происходящие в разных точках пространства системы  $K'$ , будут неодновременными в системе  $K$ .

## 2. Относительность промежутка времени между событиями

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (12.8)$$

где  $\Delta\tau_0$  – промежуток времени, измеренный по часам, движущимся вместе с телом (собственное время);

$\Delta\tau$  – промежуток времени в системе отсчёта, движущейся со скоростью  $v$ .

Из полученной формулы следует, что собственное время меньше времени, отсчитанного по часам, движущимся относительно тела.

Подтверждением формулы (12.8) служит следующее явление. В составе космического излучения имеются нестабильные частицы, которые называются мюонами. Мюоны рождаются на высоте 20-30 км, затем распадаются на электрон (или позитрон) и два нейтрино. Время жизни мюонов, измеренное в системе, в которой они неподвижны, составляет примерно 2 мкс. Даже двигаясь со скоростью, близкой скорости света, они могут пройти путь равный  $3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 600$  м. Но как показывают измерения, мюоны успевают в значительном количестве достигнуть поверхности Земли. Это объясняется тем, что мюоны движутся со скоростью, близкой к  $c$ . Их время жизни, отсчитанное по часам, неподвижным относительно Земли, оказывается значительно бóльшим, чем собственное время жизни этих частиц. Поэтому экспериментаторы наблюдают пробег мюонов намного бóльший, чем 600 м.

## 3. Сокращение линейных размеров в направлении движения (лоренцево сокращение)

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (12.9)$$

где  $l_0$  – длина тела в системе отсчёта, относительно которой оно покоится (собственный размер);

$l$  – длина тела в системе отсчёта, относительно которой оно движется со скоростью  $v$ .

Изменяются только продольные размеры, поперечные остаются постоянными.

## 12.5 Основные соотношения релятивистской динамики

### 1. Масса тела зависит от скорости движения:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (12.10)$$

где  $m_0$  – масса тела в покоящейся системе отсчёта (масса покоя);

$m$  – масса движущегося тела.

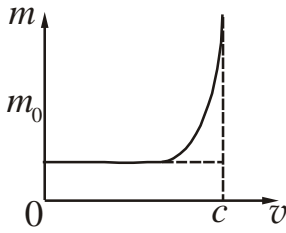


Рисунок 12.2

График зависимости массы тела от скорости представлен на рис. 12.2. Из (12.10) следует, что если скорость тела стремится к скорости света ( $v \rightarrow c$ ), то его масса устремляется к бесконечности. Следовательно, никакое тело, обладающее массой покоя, не может двигаться со скоростью света. Со скоростью света могут двигаться лишь частицы, не обладающие массой покоя (фотоны).

Впервые зависимость массы от скорости была экспериментально обнаружена на примере электрона. Дж. Дж. Томсону\* с помощью катодных трубок удалось получить электроны очень больших скоростей, а в 1908 г. Бухерер\* экспериментально установил факт увеличения массы электрона. Эксперименты Бухерера подтверждали правильность выводов теории относительности и способствовали её признанию.

Увеличение массы частиц при движении со скоростью, близкой к скорости света, наблюдается в ускорителях.

## 2. Релятивистский импульс.

$$\vec{p} = m\vec{v},$$

Заменим массу по формуле (12.10), получим

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (12.11)$$

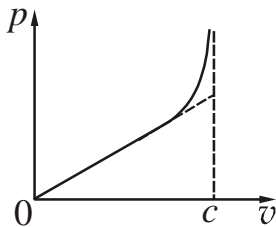


Рисунок 12.3

График зависимости импульса от скорости представлен на рис. 12.3.

Релятивистское выражение второго закона Ньютона имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \vec{F}. \quad (12.12)$$

В отличие от классической механики сила в релятивистской механике в разных системах отсчёта имеет различные модули и направления. Ускорение, как правило, не совпадает по направлению с силой.

## 3. Взаимосвязь массы и энергии.

Величину

$$E = mc^2 \quad (12.13)$$

\*Томсон Джозеф Джон (1856–1940) английский физик, лауреат Нобелевской премии 1906 г.

\*Бухерер Альфред Генрих (1863–1972), немецкий физик-экспериментатор

называют полной (релятивистской) энергией, а величину

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (12.14)$$

энергией покоя.

Выражение (12.13) представляет собой закон взаимосвязи энергии и массы.

***Полная энергия материального объекта равна произведению его релятивистской массы на квадрат скорости света в вакууме.***

Отсюда следует, что всякое изменение массы тела на  $\Delta m$  сопровождается изменением его энергии на величину

$$\Delta E = \Delta m c^2. \quad (12.15)$$

4. Релятивистское выражение для кинетической энергии имеет вид:

$$W_k = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2,$$

$$W_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right). \quad (12.16)$$

В случае малых скоростей  $v \ll c$  формулу (12.16) можно преобразовать следующим образом:

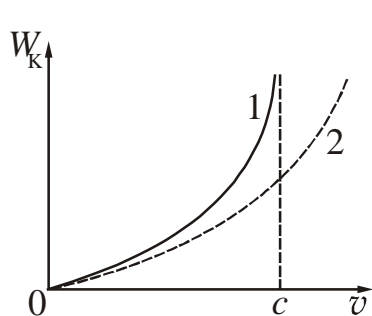


Рисунок 12.4

$$W_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \approx mc^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} - 1 \right) = \frac{mv^2}{2},$$

то есть получить классическое выражение для кинетической энергии. На рис. 12.4 график 1 соответствует релятивистской зависимости, график 2 — классической.

5. Связь кинетической энергии с импульсом релятивистской частицы:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{W_k (W_k + 2E_0)}. \quad (12.17)$$

В заключение следует отметить, что теория относительности не отрицает существования абсолютных величин и понятий. Она лишь устанавливает, что



ряд понятий и величин, считавшихся в классической физике абсолютными, в действительности являются относительными.

Не следует также думать, что с появлением теории относительности классическая физика утратила свое значение. Релятивистские эффекты для обычных макроскопических тел и обычных скоростей столь незначительны, что оказываются далеко за пределами практической точности. В большинстве отраслей техники классическая физика «работает» также хорошо, как и прежде.

### Сравнение ньютоновской (классической) и релятивистской механики

Ньютоновская механика	Релятивистская механика
<b>Основные постулаты</b>	
1. <i>Принцип относительности Галилея</i> Во всех инерциальных системах отсчёта все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.	1. <i>Принцип относительности Эйнштейна</i> Во всех инерциальных системах отсчёта все физические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.
2. <i>Принцип инвариантности времени</i> Во всех инерциальных системах отсчёта время течёт одинаково.	2. <i>Принцип инвариантности скорости света</i> Во всех инерциальных системах отсчёта скорость света в вакууме одинакова.
<b>Следствия из постулатов</b>	
<i>Закон сложения скоростей</i>	
$\vec{V}$ – скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта, $\vec{v}'$ – скорость тела в подвижной системе отсчёта, $\vec{v}$ – скорость подвижной системы относительно неподвижной.	
$\vec{V} = \vec{v}' + \vec{v}$	$\vec{V} = \frac{\vec{v}' + \vec{v}}{1 + \frac{v}{c^2} v'}$
<i>Длина тела в различных системах отсчёта</i>	
$l = l_0$ Длина $l$ тела в подвижной системе отсчёта равна длине $l_0$ тела в неподвижной системе отсчёта.	$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ Длина $l$ тела в системе отсчёта, относительно которой оно движется, меньше его длины $l_0$ в системе отсчёта, относительно которой тело неподвижно.
<i>Длительность событий в различных системах отсчёта</i>	
$\Delta\tau = \Delta\tau_0$ Длительность события в различных системах отсчёта одинакова и не зависит от скорости относительного движения систем отсчёта.	$\Delta\tau = \frac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ Длительность $\Delta\tau$ события в движущейся системе отсчёта, больше его длительности $\Delta\tau_0$ в неподвижной системе отсчёта.

Основные соотношения динамики	
Масса в различных системах отсчёта	
$m = m_0$ <p>Масса тела в различных системах отсчёта одинакова и не зависит от скорости относительного движения систем отсчёта.</p>	$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ <p>Масса <math>m</math> тела в системе отсчёта, относительно которой оно движется, больше его массы <math>m_0</math> в системе отсчёта, относительно которой тело неподвижно.</p>
Импульс тела	
$\vec{p} = m\vec{v}$ <p>Импульс тела линейно зависит от скорости.</p>	$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ <p>Импульс тела нелинейно зависит от скорости.</p>
Взаимосвязь массы и энергии	
<p>Ньютоновская механика не учитывает энергию покоя, которая включает в себя все виды энергии, присущие покоящемуся телу, в том числе энергию взаимодействия и теплового движения атомов и молекул, а также ядерного взаимодействия.</p>	<p>Энергия покоя <math>E_0 = m_0 c^2</math></p> <p>Полная энергия <math>E = mc^2</math></p>
Кинетическая энергия	
$W_k = \frac{mv^2}{2}$	$W_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$
Связь между импульсом и кинетической энергией	
$p = \sqrt{2mW_k}$	$p = \frac{1}{c} \sqrt{W_k (W_k + 2E_0)}$

- **Давайте подумаем!**

**12.1.** При каких условиях справедливы преобразования Галилея? преобразования Лоренца?

**12.2.** Зависит ли от скорости движения системы отсчёта скорость тела? скорость света?

**12.3.** Существует ли в механике Галилея – Ньютона предельная скорость распространения сигналов?

**12.4.** Можно ли утверждать, что события, одновременные в одной системе отсчёта, одновременны и во всех других инерциальных системах отсчёта?

**12.5.** Самолет движется со скоростью  $v$  навстречу свету, излучаемому неподвижным источником. С какой скоростью фотоны движутся относительно самолета?

**12.6.** Будет ли ускорение тела под действием постоянной силы оставаться постоянным, если тело движется со скоростью, близкой к скорости света?

- **Обратите внимание!**

Исторически сложилось так, что в учебных и научных текстах по физике могут наблюдаться следующие ситуации:

1. Одним и тем же термином обозначаются различные явления или понятия.
2. Одно и то же понятие называется разными терминами.
3. Термин применяется к объектам, к которым его применять нельзя.
4. Различные по смыслу понятия обозначаются близкими по звучанию терминами.

Для того чтобы учебный материал воспринимался адекватно, в конце каждого раздела вводится рубрика «Обратите внимание!», в которой даются специальные пояснения.

***Различайте следующие, близкие по звучанию, термины:***

***Инертность*** – свойство различных материальных объектов приобретать разные ускорения при одинаковых внешних воздействиях со стороны других тел. Инертность присуща разным телам в разной степени. Мерой инертности тела в поступательном движении является масса, а при вращательном движении – момент инерции.

***Инерция*** – свойство тел сохранять неизменным состояние своего движения по отношению к инерциальным системам отсчёта, когда внешние воздействия на тело отсутствуют или взаимно уравновешиваются. Инерция свойственна всем материальным объектам в равной степени.

***Момент инерции*** – мера инертных свойств твёрдого тела при вращательном движении, характеризующая распределение массы относительно оси вращения и зависящая от массы, формы и размеров тела.

- Изучив раздел «Физические основы механики», студент должен **ЗНАТЬ:**

***Суть понятий:***

Физическое явление, физическая величина, физическая модель, физический закон, система единиц измерения. Материальная точка. Абсолютно твёрдое тело, абсолютно упругое тело, абсолютно неупругое тело. Система отсчёта, тело отсчёта, траектория, радиус-вектор.

***Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:***

Путь, перемещение, скорость, ускорение. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение, период, частота вращения. Масса, плотность, импульс тела, сила, импульс силы. Момент инерции, момент силы, момент импульса. Работа, мощность, энергия.

***Законы:***

Закон всемирного тяготения. Законы Гука, Архимеда, сухого и вязкого трения. Законы Ньютона. Основной закон динамики вращательного движения. Законы сохранения импульса, момента импульса, механической энергии. Классический закон сложения скоростей, закон сложения скоростей в релятивистской механике.

***Теоремы:***

Теорема Штейнера. Теорема об изменении кинетической энергии.

***Уравнения:***

Уравнения скорости и перемещения для равномерного и равнопеременного движения.

***Формулы:***

Связь между линейными и угловыми характеристиками. Потенциальная энергия, кинетическая энергия поступательного и вращательного движения. Расчёт работы и мощности при поступательном и вращательном движении. Преобразования Галилея, преобразования Лоренца, следствия из преобразований Лоренца, основные соотношения релятивистской динамики.

***Графики:***

Графическое представление движения (график зависимости координаты тела от времени, график зависимости скорости, ускорения от времени для различных видов движения).

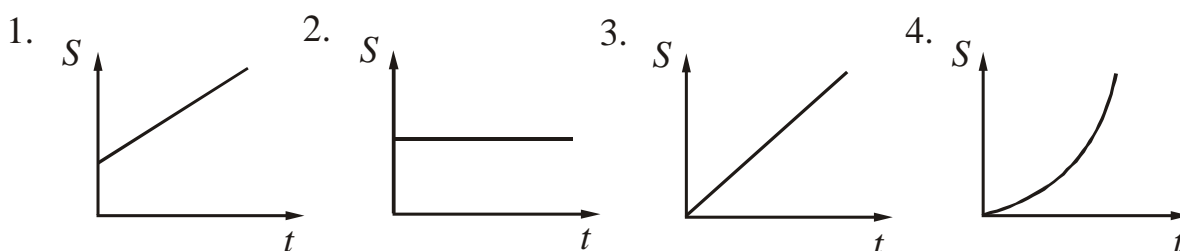
Графическое представление пройденного пути, работы, потенциальной энергии.

## ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ»

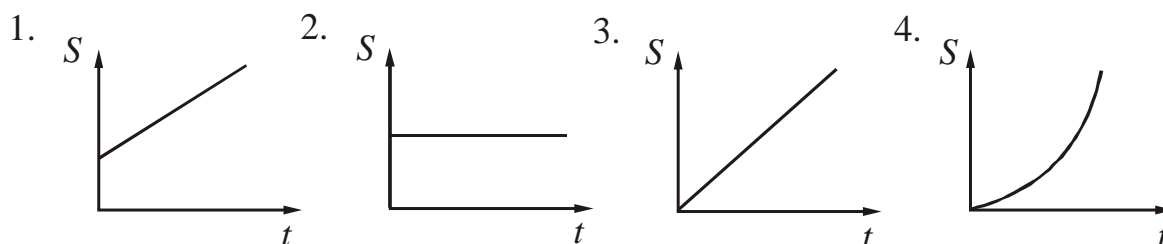
**Инструкция.** Данный тест предназначен для проверки знаний по теме “*Физические основы механики*”. Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 41-50 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
  - 2) 31-40 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
  - 3) 20-30 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
  - 4) меньше 20 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте его ещё раз.

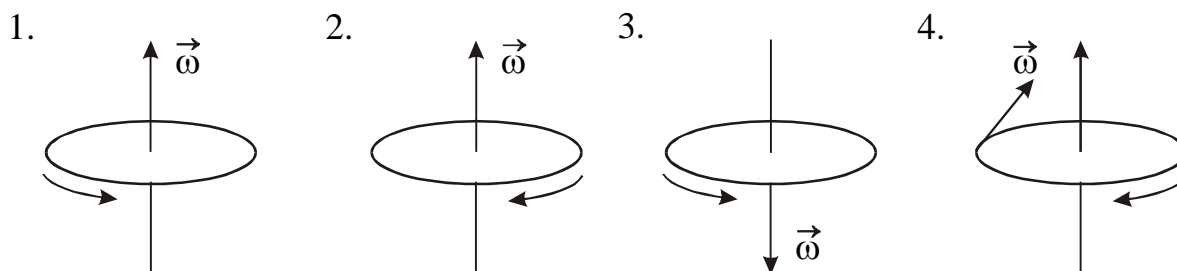
1. Укажите график, соответствующий графику пути равномерного движения. Начальная координата тела равна нулю.



2. Укажите график, соответствующий графику пути равноускоренного движения. Начальная скорость  $v_0$  тела равна нулю.



3. Материальная точка движется по окружности. Укажите направление вектора угловой скорости.



4. Укажите кинематическое соотношение, в котором допущена ошибка.

1.  $v = \omega r$       2.  $a_\tau = \varepsilon r$       3.  $a_\tau = \frac{\varepsilon}{r}$       4.  $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$

5. Зависимость скорости тела от времени имеет вид  $v = 5 - t$  (м/с). Укажите значения начальной скорости и ускорения точки.

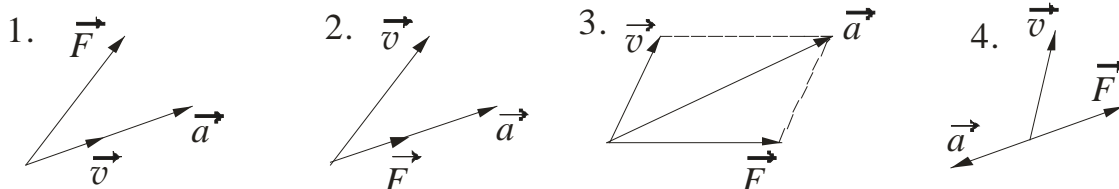
1.  $v_0 = 1$  м/с      2.  $v_0 = 5$  м/с      3.  $v_0 = -5$  м/с      4.  $v_0 = 5$  м/с  
 $a = 1$  м/с<sup>2</sup>       $a = 1$  м/с<sup>2</sup>       $a = -1$  м/с<sup>2</sup>       $a = -1$  м/с<sup>2</sup>

6. Зависимость пройденного телом пути  $S$  от времени  $t$  имеет вид  $S = 3t - t^2$  (м). Укажите значения начальной скорости и ускорения точки.
- |                          |                          |                           |                          |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1. $v_0 = 2 \text{ м/с}$ | 2. $v_0 = 3 \text{ м/с}$ | 3. $v_0 = -2 \text{ м/с}$ | 4. $v_0 = 3 \text{ м/с}$ |
| $a = 3 \text{ м/с}^2$    | $a = -2 \text{ м/с}^2$   | $a = -3 \text{ м/с}^2$    | $a = 2 \text{ м/с}^2$    |
7. Тангенциальное ускорение характеризует ...
- 1) изменение положения тела в пространстве.
  - 2) изменение скорости по величине и направлению.
  - 3) изменение скорости по величине.
  - 4) изменение скорости по направлению.
8. Нормальное ускорение характеризует ...
- 1) изменение скорости по величине.
  - 2) изменение скорости по величине и направлению.
  - 3) изменение скорости по направлению.
  - 4) изменение положения тела в пространстве.
9. Укажите случай, соответствующий равноускоренному движению точки по окружности.
- |                          |                          |                    |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| 1. $a_n = \text{const};$ | $a_\tau = \text{const}.$ | 2. $a_n \sim t;$   | $a_\tau = \text{const}.$ |
| 3. $a_n = 0;$            | $a_\tau = \text{const}.$ | 4. $a_n \sim t^2;$ | $a_\tau = \text{const}.$ |
10. Нормальное ускорение точек тела  $a_n = \text{const}$ , тангенциальное ускорение  $a_\tau = 0$ . Укажите характер движения.
- |                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Равномерное прямолинейное.     | 2. Равномерное вращательное.     |
| 3. Равноускоренное прямолинейное. | 4. Равноускоренное вращательное. |
11. Нормальное ускорение точек тела  $a_n = 0$ , тангенциальное ускорение  $a_\tau = \text{const}$ . Укажите характер движения.
- |                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Равномерное прямолинейное.     | 2. Равномерное вращательное.     |
| 3. Равноускоренное прямолинейное. | 4. Равноускоренное вращательное. |
12. Вектор полного ускорения при равномерном движении точки по окружности ...
- 1) постоянен по модулю и направлению.
  - 2) равен нулю.
  - 3) постоянен по модулю, но непрерывно изменяется по направлению.
13. При частоте вращения  $2 \text{ с}^{-1}$  ...
- 1) тело совершает один оборот за 2 с.
  - 2) тело совершает 2 оборота за 1 с.
  - 3) проходит путь, равный 2 радиусам окружности, за 1 с.
  - 4) проходит путь, равный 1 радиусу окружности, за 2 с.
14. Материальная точка движется по окружности радиусом  $R=1 \text{ м}$ . Она перемещается из точки А в точку В, совершив при этом  $1/3$  полного оборота ( $\alpha = 2\pi/3$ ). Точка прошла путь ...
- |        |                         |        |                       |
|--------|-------------------------|--------|-----------------------|
| 1) 1 м | 2) $\sqrt{3} \text{ м}$ | 3) 2 м | 4) $2\pi/3 \text{ м}$ |
|--------|-------------------------|--------|-----------------------|

15. Укажите буквенное обозначение и единицу измерения каждой из перечисленных величин. *Пример:* Сила тока –  $I$  – А (ампер).

Скорость, ускорение, угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение, частота вращения, период вращения.

16. На каком рисунке правильно указано направление ускорения движущейся точки? ( $\vec{v}$  – скорость,  $\vec{F}$  – равнодействующая приложенных сил).



17. Укажите формулу, которая является наиболее общим выражением второго закона Ньютона.

1.  $\vec{F} = m\vec{a}$       2.  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$       3.  $\vec{L} = J\vec{\omega}$       4.  $\vec{p} = m\vec{v}$

18. Укажите форму записи второго закона Ньютона, справедливую лишь в случае, когда  $m = \text{const}$ .

1.  $\vec{F} = m\vec{a}$       2.  $Fdt = mdv + vdm$   
3.  $F = m\frac{dv}{dt} + v\frac{dm}{dt}$       4.  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$

19. На тело, движущееся с постоянной скоростью в инерциальной системе отсчёта, одновременно начинают действовать две силы, равные по модулю и не совпадающие по направлению. В результате тело...

- 1) не изменит скорости.
- 2) изменит модуль скорости, но не изменит направления движения.
- 3) изменит направление движения.
- 4) может изменить и модуль, и направление скорости. Ответ зависит от величины угла между равнодействующей сил и направлением скорости.

20. Укажите формулу, которая является наиболее общим выражением закона динамики вращательного движения.

1.  $\vec{F} = m\vec{a}$       2.  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$       3.  $\vec{L} = J\vec{\omega}$       4.  $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$

21. Укажите формулу, которая выражает основной закон динамики вращательного движения в том случае, если момент инерции системы не меняется.

1.  $J\vec{\epsilon} = \vec{M}$       2.  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$       3.  $M_i = F_i d_i \sin \alpha$       4.  $\vec{L} = J\vec{\omega}$

22. Укажите правильную запись формулы для момента импульса тела относительно точки.

$$1. \vec{L}_i = \vec{r}_i \times \vec{F}_i \quad 2. \vec{L}_i = m_i(\vec{r}_i \times \vec{v}_i) \quad 3. \vec{L}_i = m\vec{v}_i \times \vec{r}_i \quad 4. \vec{L}_i = \vec{r}_i \times m\vec{v}_i$$

23. Момент инерции твёрдого тела зависит от ...

- 1) момента силы и углового ускорения.
- 2) момента импульса и угловой скорости.
- 3) массы, формы тела и выбора оси вращения.
- 4) величины действующей силы и её плеча.

24. Шар катится по горизонтальной поверхности. Укажите формулу, выражающую полную кинетическую энергию этого шара.

$$1. W_k = \frac{mv^2}{2} \quad 2. W_k = \frac{J\omega^2}{2} \quad 3. W_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} \quad 4. W_k = \frac{kx^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$$

25. Импульсом тела называется ...

- 1) произведение массы тела на его ускорение.
- 2) произведение массы тела на его скорость.
- 3) произведение массы тела на его объём.
- 4) произведение силы, действующей на тело, на время ее действия.

26. Импульс тела зависит ...

- 1) только от модуля скорости.
- 2) только от массы тела.
- 3) только от направления скорости тела.
- 4) от массы тела, от скорости и направления скорости.

27. Укажите правильную формулировку закона сохранения импульса.

1. Импульс системы тел есть величина постоянная.
2. Полный импульс всех тел, входящих в систему, не изменяется во времени.
3. Импульс системы тел равен нулю.
4. Суммарный импульс замкнутой системы материальных точек остается постоянным.

28. Укажите формулу, которая выражает закон сохранения импульса.

$$1. m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n = \text{const} \quad 2. W_k + W_{\text{п}} = \text{const}$$

$$3. J_1\vec{\omega}_1 + J_2\vec{\omega}_2 + \dots + J_n\vec{\omega}_n = \text{const} \quad 4. \frac{m_1\vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2\vec{v}_2^2}{2} + \dots + \frac{m_n\vec{v}_n^2}{2} = \text{const}$$

29. Пластилиновый шарик массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , налетает на покоящийся пластилиновый шарик массой  $2m$ . После удара шарики, слипшись, движутся вместе. Скорость их движения после удара ...

- 1)  $v/3$
- 2)  $2v/3$
- 3)  $v/2$
- 4) для ответа не хватает данных

30. Укажите правильную формулировку закона сохранения момента импульса.

1. Момент импульса тела есть величина постоянная.
2. Полный момент импульса всех тел системы не изменяется со временем.
3. Момент импульса замкнутой системы материальных точек остается постоянным.



31. Укажите формулу, которая выражает закон сохранения момента импульса.
1.  $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n = \text{const}$
  2.  $W_k + W_{\text{п}} = \text{const}$
  3.  $J_1 \vec{\omega}_1 + J_2 \vec{\omega}_2 + \dots + J_n \vec{\omega}_n = \text{const}$
  4.  $\frac{m_1 \vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2^2}{2} + \dots + \frac{m_n \vec{v}_n^2}{2} = \text{const}$
32. Человек, свободно вращаясь на круглой горизонтальной платформе, развёл руки в стороны. Укажите, как при этом изменились момент инерции  $J$ , угловая скорость  $\omega$ , момент импульса  $L$ .
1.  $J \uparrow \omega \uparrow L = \uparrow$
  2.  $J \downarrow \omega \downarrow L = \downarrow$
  3.  $J \downarrow \omega \uparrow L = \text{const}$
  4.  $J \uparrow \omega \downarrow L = \text{const}$
- $\uparrow$  – увеличится  
 $\downarrow$  – уменьшится
33. Однородную пружину жёсткостью  $k_0$  разрезали пополам. Жёсткость каждой из двух новых пружин равна ...
- 1)  $k_0$
  - 2)  $2k_0$
  - 3)  $4k_0$
  - 4)  $k_0/2$
  - 5)  $k_0/4$
34. Груз массой  $m$  под действием силы  $F$ , направленной вертикально вверх, поднимается на высоту  $h$ . Изменение кинетической энергии груза при этом равно ...
- 1)  $\Delta W_k = mgh$
  - 2)  $\Delta W_k = Fh$
  - 3)  $\Delta W_k = Fh - mgh$
  - 4)  $\Delta W_k = Fh + mgh$
35. Укажите формулу, которая представляет собой определение механической работы.
1.  $A = FS \cos \alpha$
  2.  $dA = N dt$
  3.  $dA = \vec{F} d\vec{s}$
  4.  $A_{12} = W_{k2} - W_{k1}$
36. Укажите, в каком из приведённых случаев работу силы по перемещению тела можно определить по формуле  $A = FS \cos \alpha$ ?
1.  $F = \text{const}; \alpha = f(S)$ ;
  2.  $F = f(t); \alpha = \text{const}$ ;
  3.  $F = \text{const}; \alpha = \text{const}$ ;
  4.  $F = \text{const}; \alpha = f(t)$ .
- 
37. Укажите формулу, по которой вычисляется работа переменной силы  $F$  на пути  $S$ .
1.  $A = \int_0^S \vec{F} d\vec{S}$
  2.  $A = FS \cos \alpha$
  3.  $\delta A = F dS$
  4.  $A = FS$
38. Материальная точка равномерно вращается по окружности радиуса  $R$ . Работа центростремительной силы за один оборот равна ...
- 1)  $A = M\phi$ ;
  - 2)  $A = \frac{J\omega^2}{2}$ ;
  - 3)  $A = 0$ ;
  - 4)  $A = \frac{mv^2}{R} \cdot 2\pi R$ .
39. Тело массой  $m$  проезжает расстояние  $L$  вниз вдоль склона, наклонённого под углом  $\alpha$  к горизонту. Работа силы тяжести при этом равна ...
- 1)  $A = mgL$
  - 2)  $A = mgL \sin \alpha$
  - 3)  $A = mgL \cos \alpha$

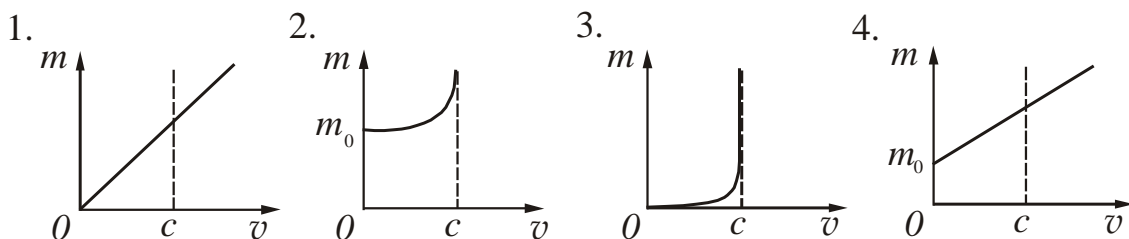
- 4) не может быть вычислена, так как неизвестен коэффициент трения тела о плоскость.
40. С увеличением угла наклона наклонной плоскости от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  кпд этого простейшего механизма ...
- 1) увеличивается.
  - 2) уменьшается.
  - 3) не изменяется.
  - 4) сначала растет, потом уменьшается.
41. Укажите формулировку закона сохранения механической энергии.
1. Энергия системы не возникает и не исчезает, она только переходит от одного тела к другому.
  2. В неконсервативной системе тел полная механическая энергия остается постоянной.
  3. Полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют только консервативные силы, остается постоянной.
  4. В замкнутой системе энергия всех тел не изменяется во времени.
42. Мощность представляет собой ...
- 1) работу силы на участке пути.
  - 2) работу переменной силы за конечный промежуток времени.
  - 3) работу, совершаемую за единицу времени.
  - 4) изменение кинетической энергии тела.
43. Происходит абсолютно упругий удар. При этом ударе выполняется ...
- 1) только закон сохранения механической энергии.
  - 2) только закон сохранения импульса.
  - 3) закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.
44. Происходит абсолютно неупругий удар. При этом ударе выполняется ...
- 1) закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.
  - 2) только закон сохранения импульса.
  - 3) только общий закон сохранения энергии.
  - 4) закон сохранения импульса и общий закон сохранения энергии.
45. Укажите буквенное обозначение и единицу измерения каждой из перечисленных величин. *Пример:* Сила тока –  $I$  – А (ампер).

Мощность, энергия, момент силы, момент инерции, момент импульса.

46. Укажите формулу, которая выражает зависимость массы от скорости в специальной теории относительности.

$$1. \vec{p} = m\vec{v} \quad 2. m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad 3. m = m_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad 4. m = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

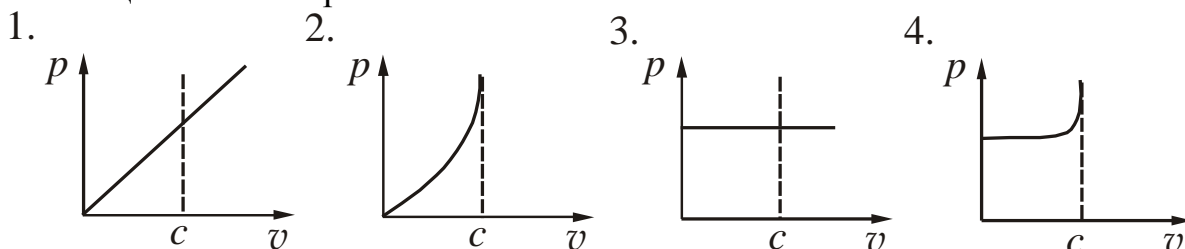
47. Укажите график, на котором приведена зависимость массы от скорости в специальной теории относительности.



48. Укажите формулу, которая выражает зависимость импульса частицы от скорости в специальной теории относительности.

1.  $\vec{p} = m\vec{v}$     2.  $p = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$     3.  $p = m_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$     4.  $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

49. Укажите график, на котором приведена зависимость импульса от скорости в специальной теории относительности.



50. Укажите формулу, которая выражает кинетическую энергию частицы в специальной теории относительности.

1.  $W_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ ; 2.  $W_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$ ; 3.  $W_k = \frac{m_0 v^2}{2}$ ; 4.  $W_k = m_0 c^2$

### Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!»

**1.1.** Дифференциал в математике – бесконечно малая величина. Дифференциал физической величины не обязательно является малой величиной. Нужно только, чтобы в пределах дифференциала изменением физических величин можно было бы пренебрегать.

**4.1.** Только второй. Для решения остальных существенны размеры и форма лаборатории.

**4.2.** Большой путь автобус проехал в воскресенье, а перемещение его и в субботу, и в воскресенье равнялось нулю, так как начальная и конечная точки траекторий совпадали.

**4.3.** Траектория должна быть прямолинейной.

**4.4.** При движении автомобиля спидометр показывает скорость, близкую к мгновенной.

**4.5.** Нельзя, так как в общем случае величина средней скорости не равна среднему арифметическому значению величин мгновенных скоростей. А так как неизвестен характер движения, то  $v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}$ , где  $s$  – пройденный путь;  $t$  – время, в течение которого был пройден путь  $s$ .

**4.6.** Мгновенная и средняя скорости равны между собой при равномерном прямолинейном движении.

**4.7.** Нет, не все: точка колеса, соприкасающаяся с землей, имеет скорость, равную нулю. Наибольшую скорость имеет самая верхняя точка колеса.

**4.8.** Если частица движется по криволинейной траектории, то вектор полного ускорения в общем случае не совпадает по направлению с вектором скорости и направлен под некоторым углом к касательной к траектории движения.

**4.9.** Ускорения движений тел одинаковы и равны ускорению свободного падения, если пренебречь зависимостью его от расстояния до центра Земли.

**5.1.** Они направлены вдоль оси вращения, согласно правилу правого винта.

**5.2.** У второй точки нормальное (центростремительное) ускорение больше. Следовательно, больше и модуль скорости, так как  $a_n = \frac{v^2}{R}$  ( $R_1=R_2$ ).

**5.3.** Точки на поверхностях шкивов обладают нормальным ускорением  $a_n = \frac{v^2}{R}$ . Ремень не проскальзывает, следовательно, все его точки должны иметь одинаковую линейную скорость. Отсюда следует, что точки на ободе шкива большего диаметра имеют меньшее ускорение.

**5.4.** Линейная скорость связана с угловой скоростью соотношением  $v = \omega R$ . Обработку детали резанием на токарном станке производят при определенной (фиксированной) линейной скорости движения детали относительно резца. Поэтому при увеличении диаметра обрабатываемой детали необходимо уменьшать угловую скорость.

**6.1.** Фундаментальной является лишь сила притяжения. Силы трения и упругости являются проявлением фундаментального электромагнитного взаимодействия.

**6.2.** Если тела можно рассматривать как материальные точки, а также в том случае, если тела являются сферами с симметричным распределением плотности.

**6.3.** По второму закону Ньютона  $m_i g = F$ , где  $m_i$  – инертная масса. Инертная масса характеризует способность тел приобретать то или иное ускорение под действием определенной силы. С другой стороны, по закону всемирного тяготения  $F = G \frac{m_g M_g}{R^2}$ , где  $G$  – гравитацион-

ная постоянная,  $m_g$  и  $M_g$  – гравитационные массы взаимодействующих тел. Гравитационная масса определяет силу гравитационного притяжения. Заранее не очевидно, что  $m_i = m_g$ .

Однако лишь при выполнении этого равенства ускорение свободного падения одинаково для всех тел, так как при подстановке силы тяготения во второй закон Ньютона массы  $m_i$  и  $m_g$

можно сократить и  $g = G \frac{M}{R^2}$ . Только сила тяготения сообщает всем телам одинаковое ускорение, не зависящее от их масс.

**6.4.** Тела внутри космического корабля перестанут оказывать давление на его стенки, если они будут иметь такое же ускорение, как и корабль. Одинаковое ускорение в данном участке пространства всем телам, независимо от их массы, может сообщить сила тяготения. Следовательно, необходимо, чтобы двигатель корабля был выключен и сопротивление внешней среды отсутствовало. Движение же корабля может происходить в любом направлении по отношению к направлению сил тяготения.

**6.5.** Да, потому что действуют силы сцепления неровностей поверхностей и силы межмолекулярного притяжения.

**6.6.** Сила трения зависит не только от коэффициента трения, но и от прижимающей силы, которая в случае набухшей доски значительно больше, чем в случае ссохшейся.

**6.7.** Нужно знать коэффициенты трения бруска о фанеру и фанеры о пол, Если первый окажется больше второго, то фанера должна смещаться относительно пола; если же большим будет второй из коэффициентов трения, то двигаться будет брусок по фанере.

**6.8.** Чтобы улучшить обтекаемость вагонов и уменьшить силу трения. При этом уменьшается необходимая сила тяги локомотива и экономится топливо.

**6.9.** Роликовые подшипники выдерживают значительно большие нагрузки, так как имеют большую опорную площадь.

**6.10.** Сила вязкого трения, действующая на шарик, пропорциональна скорости его движения. При некоторой скорости падения сумма силы тяжести и архимедовой силы уравнивается силой вязкого трения, и шарик движется равномерно.

**6.11.** Коэффициент вязкости жидкости значительно больше коэффициента вязкости газа.

**6.12.** Ограничители делают потому; что в случае действия сил, превышающих по модулю паспортные значения, деформации, становятся неупругими и динамометр портится.

**6.13.** Такой системы не существует. С большой степенью точности условию инерциальности удовлетворяет система отсчёта, связанная с Солнцем.

**6.14.** Если тела можно рассматривать как материальные точки.

**6.15.** Потому что он имеет скорость в горизонтальном направлении и вследствие инерции продолжает двигаться в этом направлении.

**6.16.** Увеличение массы автомобиля уменьшает ускорения, сообщаемые ему толчками камней булыжной мостовой.

**6.17.** Нет. Чтобы тело двигалось вверх, надо сообщить ему ускорение. Поэтому вначале действующая на тело сила должна быть больше силы тяжести.

**6.18.** Сила удара зависит от времени, в течение которого скорость его падает до нуля. Это время определяется длиной пути, на котором происходит уменьшение скорости. Если, коснувшись мяча, равномерно двигать руку по направлению его полета, то можно ослабить силу удара.

**6.19.** В системе отсчёта «клеть» при рывке на трос действует большая сила инерции, вызывающая его деформацию растяжения. При определенных условиях не исключен даже разрыв троса.

**6.20.** Студент забыл о том, что второй закон Ньютона применим только к одному телу, и неправильно применил его сразу к двум телам, движущимся с разными (по направлению) скоростями и ускорениями. Кроме того, нельзя находить равнодействующую двух сил, приложенных к разным телам.

**6.21.** Перепутаны знаки + и – в числителе и знаменателе дроби, стоящей в скобках (при указанных знаках  $T \rightarrow \infty$ , если  $m_1 \rightarrow m_2$ ). Обсуждаемая формула становится правдоподобной после такого исправления:

$$T = m_1 g \left( 1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right).$$

**6.22.** Импульс реактивного самолета уменьшается, поскольку вследствие расхода горючего уменьшается масса самолета.

**6.23.** Изменение импульса тела равно импульсу илы:  $\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}$ . Снаряд действует с большей силой, но очень коротковременно, поэтому он не изменяет импульса автобуса. Люди же действуют длительное время и могут сообщить автобусу больший импульс.

**7.1.** Разобьём массу диска на пары одинаковых элементов, лежащих на одном диаметре на равных расстояниях от центра. Импульс каждой пары равен нулю, так как импульсы обеих масс равны, но направлены в противоположные стороны. Следовательно, импульс всего диска равен нулю.

**7.2.** Момент импульса  $\vec{L} = J\vec{\omega}$  конькобежца не изменяется, так как момент внешних сил равен нулю. Если поднять руки вверх, то момент инерции уменьшится. Из закона сохранения

момента импульса следует, что частота вращения ( $\omega = 2\pi\nu$ ) увеличится в  $J_1/J_2$  раз, где  $J_1, J_2$  – моменты инерции спортсмена до и после поднятие рук,  $\nu$  – частота вращения.

**7.3.** Если центр тяжести ротора не лежит на оси вращения, то ось начинает колебаться, а ротор биться о подшипник. Это приводит к аварии машины.

**7.4.** Не только. Слой материи, намотанной на пробку, увеличивает плечо силы, отвертывающей пробку, и увеличивает вращающий момент  $M = Fd$ . Момент сил сцепления пробки со стенками пузырька при этом не изменяется, поэтому пробка отворачивается легче.

**8.1.** Работа постоянной силы определяется соотношением:  $A = FS \cos \alpha$ . 1. Если сила перпендикулярна перемещению, то  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos 90^\circ = 0$ . Работа не совершается. 2. При перемещении по инерции  $F=0$ , работа не совершается; 3. Каждая из сил совершает работу, но суммарная работа равна нулю.

**8.2.** Работа постоянной силы определяется соотношением:  $A = FS \cos \alpha$ . Так как по условию задачи направление силы и перемещения совпадают ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\cos 0^\circ = 1$ ), то работа данной силы при равномерном и ускоренном перемещениях тела совпадают.

**8.3.** Направленное усилие, под действием которого происходит некоторое перемещение тел, приложено здесь к каждой из команд. Но в одном случае направление перемещения совпадает с направлением силы, а в другом – эти направления противоположны друг другу, т.е. в первом случае работа положительна, а в другом – отрицательна.

**8.4.** Работа постоянной силы определяется соотношением:  $A = FS \cos \alpha$ . В случае параллельного расположения верёвок была совершена большая работа, так как при этом направление силы и перемещения совпадают:  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\cos 0^\circ = 1$ .

**8.5.** Для того, чтобы прокачивать за единицу времени вдвое большее количество воды, нужно сообщить вдвое большей массе воды вдвое большую скорость. Работа мотора идет на сообщение воде кинетической энергии  $\frac{mv^2}{2}$ . Поэтому мощность мотора должна быть увеличена в восемь раз.

**8.6.** Мощность двигателя  $N = Fv$ . При постоянной мощности двигателя увеличить силу тяги можно, уменьшив скорость движения автомобиля.

**8.7.** При небольших углах наклона транспортёр должен быть экономичнее, так как коэффициент трения качения меньше коэффициента трения скольжения.

**9.1.** Изменение кинетической энергии тела равно работе всех сил, действующих на тело. Если силы не действуют, то работа не совершается. Следовательно, кинетическая энергия изменяться не может.

**9.2.** Для увеличения кинетической энергии отдельного тела необходимо, чтобы действующие на него силы совершали работу. Но, если равнодействующая сила, отличная от нуля, образует угол  $90^\circ$  с направлением перемещения тела (именно так бывает, например, при равномерном движении тела по окружности), то работа не совершается и кинетическая энергия остается неизменной.

**9.3.** Потенциальную энергию тела можно рассчитывать по формуле  $W_{\text{п}} = mgh$  только когда  $h \ll R_{\text{земли}}$ , т.е. в тех случаях, когда ускорение свободного падения  $g$  можно считать постоянным.

**9.4.** Часть энергии падающей воды переходит во внутреннюю и расходуется на нагревание турбины и воды.

Мощность, развиваемая падающей водой, в данном случае является полной (общей). Мощность, развиваемая турбиной, является по отношению к мощности падающей воды полезной.

**9.5.** Согласно закону сохранения и превращения энергии вся механическая энергия лифта при его торможении превращается в теплоту.

**9.6.** Изменение полной механической энергии системы равно работе внешних сил. В данном случае это работа силы сопротивления воздуха.

**9.7.** Цилиндры надо поместить на наклонную плоскость и предоставить им возможность скатиться с нее без проскальзывания. Полная кинетическая энергия цилиндров складывается из кинетической энергии поступательного и вращательного движения. В конце пути полные кинетические энергии обоих цилиндров одинаковы, так они имели в начале пути одинаковую потенциальную энергию (массы цилиндров одинаковы). Кинетическая энергия вращательного движения будет больше у полого цилиндра, так как он имеет больший момент инерции (частицы его массы дальше отстоят от центра). Поэтому при скатывании без проскальзывания с наклонной плоскости полый цилиндр приобретет меньшую скорость, так как он будет иметь меньшую кинетическую энергию поступательного движения.

**9.8.** Система является замкнутой. Момент импульса  $\vec{L} = J\vec{\omega}$  конькобежца не изменяется. Кинетическая энергия вращательного движения  $W = J\omega^2/2 = L\omega/2$ . Если поднять руки вверх, то момент инерции уменьшится, а угловая скорость вращения увеличится. Следовательно, кинетическая энергия увеличится в  $J_1/J_2$  раз за счёт работы, которую спортсмен выполняет во время поднятия рук.

**10.1.** Большую скорость шар приобретает при упругом ударе, так как при неупругом ударе часть механической энергии переходит во внутреннюю.

**10.2.** Кинетическая энергия вагона преобразуется в потенциальную энергию сжатой пружины.

**10.3.** Можно. Факт неуничтожимости энергии в этом случае подтверждается наблюдениями за температурой тел: оказывается, что часть механической энергии переходит во внутреннюю энергию, что и затрудняет расчёт.

**11.1.** Уравнение Бернулли выводится в предположении, что жидкость является идеальной, т.е. абсолютно несжимаемой и абсолютно невязкой. Вода по сравнению с нефтью является менее вязкой, следовательно, погрешность расчётов будет меньше.

**11.2.** Для жидкости выполняется требование несжимаемости, для газов – требование отсутствия вязкости.

**11.3** Струя жидкости неразрывна:  $Sv = \text{const}$ . По мере падения скорость частиц жидкости возрастает, поэтому площадь поперечного сечения струи уменьшается.

**11.4.** Из уравнения неразрывности струи следует, что  $S_1 v_1 = S_2 v_2$ . Поэтому скорость воды в сужении брандспойта будет выше, чем в самом брандспойте. А чем больше начальная скорость частиц воды, тем больше дальность их полёта.

**11.5.** Проходящий поезд увлекает за собой воздух. Движущийся между человеком и поездом воздух производит на человека меньшее давление, чем неподвижный. Эта разность давлений создаёт силу, влекущую человека к поезду.

**11.6.** В сливной трубе вода движется с большой скоростью, поэтому давление в ней меньше. При соответствующей скорости течения воды давление может стать меньше атмосферного.

**12.1.** Преобразования Галилея справедливы для скоростей, малых по сравнению со скоростью света в вакууме, а преобразования Лоренца справедливы и для скоростей, близких к скорости света в вакууме.

**12.2.** Скорость тела зависит от выбора системы отсчёта; скорость света в вакууме не зависит от выбора системы отсчёта и во всех инерциальных системах отсчёта одинакова.

**12.3.** Нет, не существует.

**12.4.** Нет, события одновременные в одной системе отсчёта могут быть неодновременными в другой инерциальной системе отсчёта.

**12.5.** Скорость движения фотонов не зависит от скорости движения приёмника (или источника) света и равна скорости света  $c$ .

**12.6.** При больших скоростях масса тела меняется (увеличивается) при изменении скорости. Так как  $a = F/m$ , то, следовательно, ускорение при больших скоростях (близких к скорости света) и при  $F = \text{const}$  не будет оставаться постоянным, а будет уменьшаться.

### КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Физические основы механики»

№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа
1	3	11	3	21	1	31	3	41	3
2	4	12	3	22	4	32	4	42	3
3	1	13	2	23	3	33	2	43	3
4	3	14	4	24	3	34	3	44	4
5	4	15	-	25	2	35	3	45	-
6	2	16	2	26	4	36	3	46	2
7	3	17	2	27	4	37	1	47	2
8	3	18	1	28	1	38	3	48	4
9	4	19	4	29	1	39	2	49	2
10	2	20	4	30	3	40	3	50	2



## ЧАСТЬ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Глава 5. Молекулярно-кинетическая теория

*"Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это – атомная гипотеза (можете называть её не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): все тела состоят из атомов – маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них прижать друг к другу. В этой фразе, как вы убедились, содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения".*

*Р. Фейнман*

**Молекулярная физика** – раздел физики, изучающий свойства тел в различных агрегатных состояниях на основе рассмотрения их молекулярного строения. Молекулярная физика основывается на молекулярно-кинетической теории строения вещества. В основе молекулярно-кинетической теории лежат три важнейших положения.

1. Все тела состоят из частиц – молекул, атомов и ионов. В свою очередь атомы состоят из более мелких элементарных частиц.
2. Атомы, молекулы и ионы находятся в непрерывном хаотическом движении, которое называется тепловым.
3. Между частицами любого тела существуют силы взаимодействия – притяжения и отталкивания.

Экспериментальным подтверждением молекулярно-кинетической теории являются броуновское движение, диффузия, теплопроводность и другие физические явления. На основе этой теории объясняется механизм электропроводности различных по своей природе проводников электрического тока, электрические и магнитные свойства вещества.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Модель броуновского движения.

<http://www.youtube.com/watch?v=Xj2rBljcZyU>

• **Давайте подумаем!**

**13.1.** Почему броуновское движение особенно заметно у наиболее мелких взвешенных в жидкости частиц?

### §13 Статистический и термодинамический методы исследования

Число атомов (молекул) в любом теле огромно. Например, в  $1 \text{ см}^3$  газа при нормальных условиях содержится порядка  $3 \cdot 10^{19}$  молекул. Если считать, что движение каждого атома (молекулы) подчиняется второму закону Ньютона, то написать такое количество уравнений просто невозможно. Поэтому поведение отдельного атома (молекулы) не может быть изучено методами классической механики.

Материальный объект, состоящий из большого количества частиц, называется **макроскопической системой** или просто **макросистемой**. В термодинамике макросистему называют термодинамической системой, в статистической физике – статистической системой.

Соответственно, для описания процессов, происходящих в макросистемах, используют два метода – **статистический и термодинамический**.

Математическим аппаратом статистического метода являются теория вероятности и статистика. При применении этого метода учитывается внутреннее строение системы. В системе, состоящей из большого количества частиц, существуют некоторые средние значения физических величин, характеризующих всю совокупность частиц в целом. В газе существуют средние значения скоростей **теплового движения** молекул и их энергий. В твёрдом теле существует средняя энергия, приходящаяся на одну степень свободы колебательного движения частицы. Свойства тел, непосредственно наблюдаемые на опыте (такие как давление и температура) рассматриваются как суммарный, усреднённый результат действия отдельных молекул.

Нахождение средних и наиболее вероятных величин, характеризующих движение частиц системы, является важной задачей, так как между этими величинами и макроскопическими свойствами системы имеется прямая связь.

С помощью термодинамического метода изучаются свойства системы, без учёта её внутреннего строения. Он основан на изучении различных превращений энергии, происходящих в системе. Раздел физики, изучающий физические свойства макросистем с помощью термодинамического метода, называется термодинамикой. Термодинамика основана на трёх началах, которые не выводятся, а получены на основе экспериментальных данных.

## §14 Характеристики атомов и молекул

1. **Относительная атомная масса ( $A_r$ ) химического элемента** – отношение массы атома этого элемента к  $1/12$  массы атома  $^{12}_6\text{C}$  (изотопа углерода с массовым числом 12).

2. **Относительная молекулярная масса ( $M_r$ ) вещества** – отношение массы молекулы этого вещества к  $1/12$  массы атома  $^{12}_6\text{C}$ .

Относительные атомная и молекулярная массы являются величинами безразмерными. Масса, равная  $1/12$  массы  $^{12}_6\text{C}$ , называется **атомной единицей массы** (а.е.м.).  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

3. **Моль** – количество вещества, в котором содержится число частиц (атомов, молекул, ионов, электронов или других структурных единиц), равное числу атомов в  $0,012 \text{ кг}$  изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ .

Число частиц, содержащихся в 1 моле вещества, называется **постоянной Авогадро**  $N_A$ . Численное значение постоянной Авогадро –  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

---

\*Авогадро Амедео (1776–1856), итальянский физик и химик.

4. **Молярная масса** ( $M$ ) – масса одного моля.  $M$  измеряется в кг/моль. Молярная масса и относительная молекулярная масса связаны соотношением:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ (кг/моль)}. \quad (14.1)$$

Число молей, содержащихся в массе  $m$  вещества, определяется формулой:

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (14.2)$$

Если вещество представляет собой смесь, то молярная масса смеси рассчитывается как отношение массы смеси к количеству вещества всех компонентов, входящих в состав этой смеси:

$$M_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{\nu_{\text{см}}} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n}, \quad (14.3)$$

где  $n$  – число компонентов.

5. Размеры атомов и молекул принято характеризовать эффективным диаметром  $d_{\text{эф}}$ , зависящим от химической природы вещества ( $d_{\text{эф}} \approx 10^{-10}$  м).

**Эффективный диаметр** – это наименьшее расстояние, на которое сближаются центры двух молекул при столкновении. Его наличие говорит о том, что между молекулами действуют силы взаимного отталкивания.

## §15 Параметры состояния

Для описания поведения макросистем вводят физические величины, которые называют **параметрами состояния системы**. Основными параметрами являются давление ( $p$ ), объём ( $V$ ), температура ( $T$ ).

**Давление** – скалярная физическая величина, равная отношению нормальной составляющей силы давления  $F_{\perp}$  к площади поверхности  $S$ .

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}, \quad (15.1)$$

$$[p] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па (паскаль*)}.$$

В технике широко используется внесистемная единица измерения давления – техническая атмосфера (ат):

$$1 \text{ ат} = 98066,5 \text{ Па} \approx 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Для практических целей (измерение атмосферного давления, в медицине) используют миллиметры ртутного столба (мм рт. ст.):

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па},$$

а также физическую атмосферу (атм):

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

---

\*Паскаль Блез (1623–1662), французский математик и физик.

Измеряют давление манометрами, барометрами, вакуумметрами, а также различными датчиками давления.

Барометрами измеряют атмосферное давление. Манометры используют для измерения давления выше атмосферного. Их обычно градуируют так, что они измеряют не полное давление газа в баллоне, а избыточное над атмосферным. Поэтому давление в баллоне, если оно измерено манометром, равно сумме атмосферного и того, что показывает манометр:

$$p = p_0 + p_m,$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $p_m$  – показание манометра.

Вакуумметры используют для измерения давлений ниже атмосферного. Их градуируют так, что они показывают разность между атмосферным давлением и давлением внутри баллона. Поэтому давление в баллоне, если оно измерено вакуумметром, равно разности атмосферного и того, что показывает вакуумметр:

$$p = p_0 - p_v,$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $p_v$  – показание вакуумметра.

**Объём – область пространства, занимаемая системой.**

$$[V] = \text{м}^3.$$

Понятие температуры имеет смысл для равновесных состояний системы. Равновесным состоянием (состоянием термодинамического равновесия) называется состояние системы, не изменяющееся с течением времени.

**Температура равновесного состояния – мера интенсивности теплового движения её молекул (атомов, ионов).** В термодинамике **температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.**

Температурные шкалы устанавливаются опытным путём. В международной стоградусной шкале температура измеряется в градусах Цельсия\* ( $^{\circ}\text{C}$ ) и обозначается  $t$ . Считается, что при нормальном давлении в  $1,01325 \cdot 10^5$  Па температура плавления льда равна  $0^{\circ}\text{C}$ , кипения воды –  $100^{\circ}\text{C}$ . В термодинамической шкале температур температура измеряется в кельвинах\* (К) и обозначается  $T$ . Абсолютная температура  $T$  и температура  $t$  по стоградусной шкале связаны соотношением:

$$T = t + 273,15.$$

Температура  $T = 0$  ( $t = -273,15^{\circ}\text{C}$ ) называется **абсолютным нулём температуры**. За абсолютный нуль температуры принимается температура, при которой прекращается тепловое движение молекул.

Физические условия, определяемые температурой  $0^{\circ}\text{C}$  (273,15 К) и давлением в одну физическую атмосферу ( $1,013 \cdot 10^5$  Па) считаются **нормальными условиями**.

\*Цельсий Андерс (1701–1744), шведский астроном и физик.

\*Томсон Уильям (лорд Кельвин) (1824–1907), английский физик.

Параметры состояния равновесной системы зависят друг от друга. Соотношение, устанавливающее зависимость давления  $p$  в системе от объёма  $V$  и температуры  $T$ , называется **уравнением состояния**.

Уравнения состояния в термодинамике получают опытным путём, а в статистической физике – выводятся теоретически. В этом состоит взаимосвязь статистического метода исследования с термодинамическим.

### • Давайте подумаем!

**15.1.** Надувной матрац заполнен воздухом до некоторого давления, превышающего атмосферное. В каком случае давление воздуха в матраце будет больше: когда человек станет на него или ляжет?

**15.2.** Как изменилось бы давление внутри газа или жидкости, если бы силы притяжения между молекулами внезапно исчезли?

**15.3.** Соответствует ли наше ощущение температуры её абсолютному значению? Другими словами, обязательно ли «более горячее» означает более высокую температуру тела или здесь имеет место чисто условное соглашение?

## §16 Уравнение состояния идеального газа

Простейшей макроскопической системой является идеальный газ. Следует понимать, что идеальный газ – это физическая модель. Чем разреженнее газ, тем он ближе по своим свойствам к идеальному. Некоторые газы, такие, как воздух, азот, кислород, а особенно гелий и водород, при комнатной температуре и атмосферном давлении очень близки к идеальному газу. Но, если эти же газы поместить в сосуд под высоким давлением при низких температурах, то их свойства будут резко отличаться от свойств идеального газа, т. е. поведение этих газов будет подчиняться законам реальных газов.

В идеальном газе отсутствует взаимодействие между молекулами, поэтому они движутся равномерно и прямолинейно до тех пор, пока не произойдет столкновения между данной и какой-либо другой молекулой или соударения со стенкой сосуда. При столкновениях молекулы можно считать недеформируемыми. Это означает, что столкновения между молекулами происходят по законам упругих соударений. В процессе столкновения между молекулами газа, а также между молекулами газа и молекулами вещества стенок сосуда происходит обмен кинетической энергией и импульсом.

Таким образом, с точки зрения молекулярно-кинетической теории **идеальный газ – это система молекул, которые можно считать материальными точками, взаимодействующими друг с другом только в процессе столкновений.**

### **Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Хаотичность движения в газе. Модель газа:

<http://www.youtube.com/watch?v=kXT73kEgVKQ>

2. Хаотичность движения в газе. Распространение молекул на весь сосуд через отверстие в перегородке.

<http://www.youtube.com/watch?v=cMu84YJSzrE&list=PL1B0ABC56C7781840>

Экспериментально установлено, что параметры состояния идеального газа связаны между собой соотношением:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (16.1)$$

где  $p$  – давление, производимое газом;  $V$  – объём газа;  $m$  – масса газа;  $M$  – молярная масса;  $T$  – термодинамическая температура;  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – **молярная газовая постоянная**.

Уравнение (16.1) называется **уравнением состояния идеального газа** или **уравнением Менделеева\*–Клапейрона\***. Умножим и разделим правую часть уравнения (16.1) на число Авогадро  $N_A$ :

$$pV = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{R}{N_A} T. \quad (16.2)$$

Величина  $\frac{m}{M} N_A = N$  определяет число молекул, содержащихся в массе  $m$  газа.

Величина  $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  называется **постоянной Больцмана\***. Тогда уравнению (16.2) можно придать вид:

$$pV = NkT. \quad (16.3)$$

Обе части этого уравнения разделим на объём  $V$ . Отношение  $\frac{N}{V} = n$  дает число молекул в единице объёма и называется **концентрацией** молекул.

Следовательно,

$$p = nkT. \quad (16.4)$$

Это означает, что **давление идеального газа пропорционально его абсолютной температуре и концентрации молекул**.

Уравнения (16.3) и (16.4) представляют собой различные формы записи уравнения состояния идеального газа.

Если имеется несколько газов, то согласно (16.4) давление, производимое газом, будет равно:

$$p = (n_1 + n_2 + \dots + n_n) kT = n_1 kT + n_2 kT + n_n kT. \quad (16.5)$$

Но  $n_1 kT$  – это давление  $p_1$ , которое было бы в сосуде, если бы в нём находились только молекулы первого газа;  $n_2 kT$  – давление  $p_2$ , которое было бы при наличии в сосуде только молекул второго газа и т. д.

---

\*Менделеев Дмитрий Иванович (1834–1907), русский химик.

\*Клапейрон Бенуа Эмиль (1799–1864), французский физик и инженер.

\*Больцман Людвиг (1844–1906), австрийский физик.

*Давление, которое производил бы газ, при условии, что он один присутствует в сосуде в том количестве, в каком он содержится в смеси, называется парциальным.*

На основании (16.5) можно записать:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (16.6)$$

Уравнение (16.6) представляет собой закон Дальтона\*:

*Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений газов, образующих смесь.*

• Давайте подумаем!

**16.1.** Какой газ считается идеальным: 1) с точки зрения молекулярно-кинетической теории? 2) с точки зрения его макропараметров?

**16.2.** Одинаково ли парциальное давление азота в безветренную тёплую погоду над участками влажной и сухой почвы?

## §17 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов связывает макроскопический параметр системы – давление, с характеристиками частиц. При выводе этого уравнения предполагается, что массы всех молекул одинаковы, скорости всех молекул одинаковы по модулю, а все направления движения молекул равновероятны.

Опыт показывает, что газ, заключённый в некоторый сосуд производит давление на его стенки. Это явление объясняется на основе молекулярно-кинетической теории следующим образом. Молекулы, двигаясь совершенно беспорядочно, ударяются о стенки сосуда. Суммарный импульс, который молекулы передают за единицу времени единице площади, – это и есть давление, производимое газом.

Приведём общую схему расчёта (при желании можно провести расчёты самостоятельно). Для нахождения давления надо найти изменение импульса всех молекул, которые ударяются о единицу поверхности сосуда за единицу времени. Удар молекул при этом считается абсолютно упругим. Это изменение импульса будет равно изменению импульса в одном соударении, умноженному на число ударов, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности за 1 с.

В результате расчёта получается уравнение следующего вида:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle, \quad (17.1)$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы;  $n$  – концентрация молекул;  $\langle v^2 \rangle$  – среднее значение квадрата скорости молекул.

---

\*Дальтон Джон (1766–1844), английский физик и химик

Понятие среднего значения квадрата скорости вводится в связи с тем, что реально все молекулы обладают разными скоростями. Оно определяется следующим образом:

$$\langle v^2 \rangle = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}, \quad (17.2)$$

где  $N$  – число молекул.

Уравнение (17.1) называется **основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов**.

Величина

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$$

является средней кинетической энергией теплового движения одной молекулы. С учётом этого уравнение (17.1) можно переписать в виде:

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle. \quad (17.3)$$

*Давление, производимое идеальным газом, равно двум третьим средней кинетической энергии поступательного теплового движения всех молекул, содержащихся в единице объёма.*

**Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Модель давления газа на стенку сосуда.

[http://www.youtube.com/watch?v=ts\\_h2vuU2x0&list=PL1B0ABC56C7781840](http://www.youtube.com/watch?v=ts_h2vuU2x0&list=PL1B0ABC56C7781840)

2. "Мы Вас приветствуем!": Опыт с перчаткой.

<http://www.youtube.com/watch?v=4amkKu21nq4&list=PL1B0ABC56C7781840>

• Давайте подумаем!

**17.1.** Как объяснить возникновение давления в газе на основании молекулярно-кинетической теории?

## §18 Молекулярно-кинетическая трактовка термодинамической температуры

Приравняем левые части уравнений (16.4) и (17.3)

$$\frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle = nkT,$$

и выразим среднюю кинетическую энергию теплового движения молекулы:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (18.1)$$



Отсюда следует очень важный вывод: **термодинамическая температура – величина, пропорциональная средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа.**

Этот вывод справедлив не только для газов, но и для вещества в любом состоянии. Из (18.1) следует, что средняя энергия  $\langle \varepsilon \rangle$  зависит только от температуры и не зависит от массы молекулы. Из (18.1) также следует, что если  $\langle \varepsilon \rangle = 0$ , то  $T = 0$ . Температура, при которой прекращается тепловое движение частиц вещества, называется **абсолютным нулём**.

Обращаем особое внимание на то, что при  $T = 0$  К прекращается только тепловое движение. Другие формы движения, имеющие квантовую природу, будут иметь место и при абсолютном нуле.

• Давайте подумаем!

**18.1.** Микро- или макроскопическим понятием является температура?

## Глава 6. Статистические распределения

Особенностью статистического метода исследования является то, что с его помощью определяются не конкретные величины, а вероятностный характер их распределения. Поэтому в статистической физике пользуются понятием «функция распределения». **Функция распределения** – закон распределения величин, который даёт возможность определить некоторые статистически усреднённые величины. Например, среднюю скорость движения молекул или их среднюю кинетическую энергию. При выводе распределений исходят из следующих общих положений классической статистической физики:

- 1) все частицы системы являются различимыми, т. е. предполагается возможность их нумеровать, следить за поведением;
- 2) в системе частиц выполняются законы сохранения импульса, момента импульса, энергии и числа частиц;
- 3) в одном и том же тождественном состоянии, то есть в состоянии с одинаковыми значениями энергии, импульса, может находиться сколько угодно частиц;
- 4) скорости частиц могут принимать значения от нуля до бесконечности.

### §19 Распределение Максвелла

Газ, как целое, является системой, качественно отличающейся от отдельной молекулы, и его поведение подчиняется статистическим закономерностям. Например, свойства газа совершенно не зависят от того, как заполнялся сосуд: или втекал через одно отверстие быстро, или через два – постепенно. Через некоторое время после впуска газ придёт в состояние равновесия, и будет находиться в нём в дальнейшем. Независимость состояния газа от начальных скоростей и начального положения его молекул приводит к тому, что не нужно рас-

считывать траектории отдельных молекул. Вместо этого мы будем искать средние значения величин, характеризующих состояние газа как целого.

При столкновении молекул их скорости изменяются. Нельзя заранее предсказать, какой численно скоростью будет обладать данная молекула: эта скорость случайна. Но если многократно подсчитать, сколько молекул обладает скоростями, лежащими в том или ином интервале скоростей, то обнаружится, что эти числа подчиняются определённым зависимостям.

Рассмотрим газ, находящийся в замкнутом сосуде. Из опыта известно, что плотность газа, находящегося в замкнутом сосуде одинакова по всему объёму. Это означает, что число молекул, движущихся по всем направлениям, одинаково. Иными словами, распределение молекул по направлениям равномерное.

Иначе обстоит дело с численными значениями скоростей. Беспорядочные столкновения приводят к тому, что часть молекул получает избыточную кинетическую энергию за счёт других молекул, потерявших часть энергии. Благодаря этому равенство численных значений скоростей нарушается, и в газе появляется некоторое число молекул, имеющих большие скорости, и некоторое число молекул со средними и малыми скоростями. Иными словами возникает распределение молекул по модулям скорости. Это распределение характеризуется средним числом молекул, имеющих скорость, близкую к данной.

Изменение скорости молекул происходит случайным образом. Может случиться, что какая-то молекула при столкновениях всегда получает энергию, и в результате её скорость станет больше среднего значения. Но можно утверждать, что слишком большие значения скорости по сравнению со средним наблюдаются очень редко. Также практически исключено, что в результате столкновений скорость молекулы станет равной нулю. Следовательно, очень малые и очень большие скорости по сравнению со средним значением маловероятны. Из вышесказанного следует, что скорости молекул группируются вблизи некоторого наиболее вероятного значения.

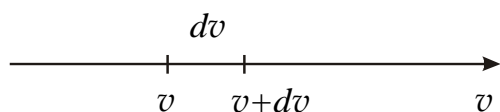


Рисунок 19.1

Пусть газ занимает объём  $V$ , а число частиц в нём  $N$ . Определим число молекул, обладающих скоростями, лежащими в некотором интервале скоростей  $dv$  вблизи заданной скорости  $v$  (рис. 19.1). Обозначим

$dN_v$  – число молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $v + dv$ . Отношение  $\frac{dN_v}{N}$  даст долю молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $v + dv$ . Это отношение разделим на ширину интервала  $dv$ . Величину  $\frac{dN_v}{N dv}$  обозначим через  $f(v)$ :

$$\frac{dN_v}{N dv} = f(v) \quad (19.1)$$

Определённая таким образом функция  $f(v)$  характеризует распределение молекул по скоростям и называется **функцией распределения**. Зная вид  $f(v)$ , можно найти число молекул  $\Delta N_v$  из числа данных молекул  $N$ , скорости которых попадают внутрь интервала скоростей от  $v$  до  $v+\Delta v$ .

Отношение

$$\frac{dN_v}{N} = f(v) dv \quad (19.2)$$

даёт вероятность того, что скорость молекулы будет иметь значение в пределах данного интервала скоростей  $dv$ .

Функция  $f(v)$  должна удовлетворять условию нормировки, то есть должно выполняться условие:

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1. \quad (19.3)$$

Пояснить его можно следующим образом. Левая часть выражения (19.3) даёт вероятность того, что скорость молекулы будет иметь одно из значений от 0 до  $\infty$ . Поскольку скорость молекулы обязательно имеет какое-то значение, то указанная вероятность есть вероятность достоверного события и, следовательно, равна 1.

Функция распределения была найдена теоретически Дж. Максвеллом\*. Она имеет следующий вид:

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}, \quad (19.4)$$

где  $m_0$  – масса молекулы.

Выражение (19.4) называется **функцией распределения Максвелла**.

Из (19.4) следует, что вид распределения молекул по скоростям зависит от природы газа (массы молекулы) и температуры  $T$ . Обратите внимание на то, что давление и объём на распределение молекул по скоростям не влияют.

Схематичный график функции распределения Максвелла дан на рис. 19.2.

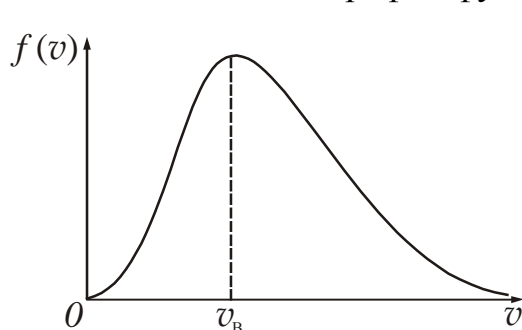


Рисунок 19.2

Проведём анализ графика.

1. При скоростях стремящихся к нулю ( $v \rightarrow 0$ ) и к бесконечности ( $v \rightarrow \infty$ ) функция распределения также стремится к нулю. Это означает, что очень большие и очень маленькие скорости молекул маловероятны.

Скорость  $v_B$ , отвечающая максимуму функции распределения, будет **наиболее вероятной**. Это означает, что основная часть молекул обладает скоростями близкими к вероятной.

\*Максвелл Джеймс Клерк (1831–1879), английский физик.

Продифференцировав (19.4) по  $v$  и приравняв полученное выражение к нулю (попробуйте выполнить это самостоятельно), можно получить формулу для расчёта наиболее вероятной скорости:

$$f(v) \quad \begin{array}{c} T_2 > T_1 \\ m_{01} = m_{02} \end{array} \quad v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}, \quad (19.5)$$

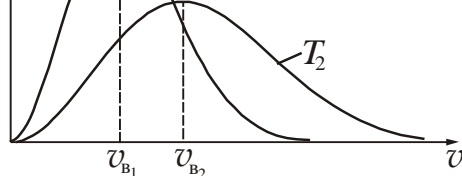


Рисунок 19.3

где  $k$  – постоянная Больцмана;  
 $m_0$  – масса молекулы.

2. В соответствии с условием нормировки (18.3) площадь, ограниченная кривой  $f(v)$  и осью абсцисс равна единице.

3. Кривая распределения имеет асимметричный характер. Это означает, что доля молекул, имеющих скорости больше наиболее вероятной, больше доли молекул, имеющих скорости меньше наиболее вероятной.

4. Вид кривой зависит от температуры и природы газа. На рис. 19.3 приведена функция распределения для одного и того же газа, находящегося при разных температурах. При нагревании максимум кривой понижается и смещается вправо, так как доля «быстрых» молекул возрастает, а доля «медленных» – уменьшается. Площадь под обеими кривыми остается постоянной и равной единице.

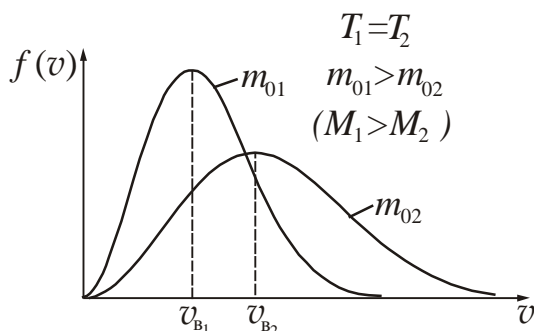


Рисунок 19.4

При нагревании максимум кривой понижается и смещается вправо, так как доля «быстрых» молекул возрастает, а доля «медленных» – уменьшается. Площадь под обеими кривыми остается постоянной и равной единице.

Пример функции распределения для разных газов при одинаковой температуре дан на рис. 19.4.

Необходимо подчеркнуть, что установленный Максвеллом закон распределения молекул по скоростям и вытекающие из него следствия справедливы только для газа, находящегося в равновесном состоянии. Закон Максвелла – статистический, применять его можно только к большому числу частиц. При малом числе частиц могут наблюдаться значительные отклонения (флуктуации) от предсказаний статистики.

• Давайте подумаем!

**19.1.** Как оправдать допущение, что сила воздействия молекул газа на стенки сосуда может быть постоянна во времени?

## §20 Средние скорости

Пользуясь функцией распределения Максвелла  $f(v)$ , можно найти ряд средних величин, характеризующих состояние молекул. Мы опустим математические преобразования и дадим лишь конечный результат.

1. **Средняя арифметическая скорость** – сумма скоростей всех молекул, делённая на число молекул:

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_N}{N}. \quad (20.1)$$

Вывод с использованием распределения Максвелла даёт следующую формулу для расчёта средней арифметической скорости:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}. \quad (20.2)$$

2. **Средняя квадратичная скорость**, определяющая среднюю кинетическую энергию молекул (см. §16), по определению равна

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}}. \quad (20.3)$$

Вывод с использованием распределения Максвелла даёт следующую формулу для расчёта:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (20.4)$$

Если учесть, что масса одной молекулы равна  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ ,

где  $M$  – молярная масса;  $N_A$  – число Авогадро, а также то, что  $kN_A = R$ , то выражения для наиболее вероятной, средней арифметической и средней квадратичной скоростей можно переписать следующим образом:

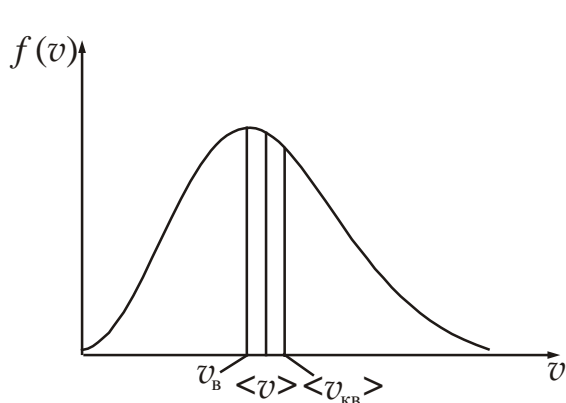


Рисунок 20.1

$$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{M}}; \quad (20.5)$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}; \quad (20.6)$$

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (20.7)$$

Сопоставляя (20.5), (20.6) и (20.7), можно заметить, что  $v_B$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle v_{\text{кв}} \rangle$  одинаково зависят от температуры газа и молярной массы, отличаясь только множителем. Их отношение выглядит следующим образом (рис. 20.1):

$$v_B : \langle v \rangle : \langle v_{\text{кв}} \rangle = 1 : 1,13 : 1,22.$$

• Давайте подумаем!

**20.1.** Скорости теплового движения многих молекул близки к скорости пули. Почему же даже очень чуткое обоняние диких животных не улавливает запах охотника, если он подкрадывается к ним против ветра?

**20.2.** По данным современной молекулярно-кинетической теории среди молекул атмосферы должно быть некоторое количество таких, скорость которых должна превышать вторую космическую. К каким геофизическим последствиям должно это приводить?

## §21 Экспериментальная проверка закона распределения Максвелла

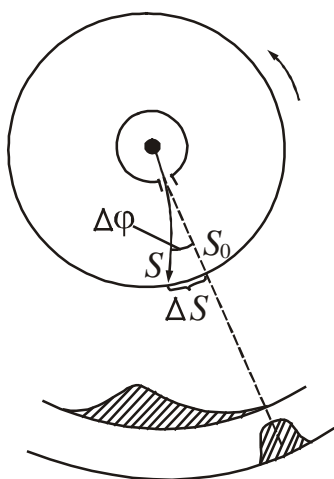


Рисунок 21.1

Первое экспериментальное определение скоростей молекул было осуществлено О. Штерном\* в 1920 году. Прибор состоял из двух коаксиальных цилиндров, по оси которых натягивалась платиновая нить, покрытая серебром (рис. 21.1). При нагревании нити электрическим током с её поверхности испарялись атомы серебра, которые после этого двигались в радиальном направлении. Внутренний цилиндр имел узкую продольную щель, через которую проходил наружу узкий пучок атомов. Воздух из прибора был удалён для того, чтобы атомы серебра не сталкивались с молекулами воздуха. Достигнув поверхности внешнего цилиндра, атомы серебра оседали на нём, образуя узкую полоску.

Если привести прибор во вращение, то след оставленный пучком, сместится по поверхности цилиндра на некоторую величину  $\Delta S$  (см. рис. 21.1). Это произойдёт потому, что за время, пока атомы серебра пролетают зазор между цилиндрами, прибор успеет повернуться на некоторый угол  $\Delta\varphi$ .

В результате против пучка окажется другой участок наружного цилиндра, смещённый относительно первоначального следа  $S_0$  на величину  $\Delta S$ . Измеряя смещение следа  $\Delta S$  и скорость вращения прибора, можно рассчитать скорость атомов  $v$ . Исследуя профиль следа (рис. 21.1), можно было составить примерное представление о распределении атомов по скоростям.

Результаты опыта Штерна подтвердили правильность оценки средней скорости атомов, вытекающей из распределения Максвелла. О характере самого распределения этот опыт смог дать лишь приближённые представления.

• Давайте подумаем!

**21.1.** В опыте Штерна налёт серебра также был обнаружен близко от следа, оставленного молекулярным пучком на покоящемся цилиндре; однако этот налёт был несравненно тоньше, чем в средней части блестящей полосы. На какие особенности теплового движения молекул указывает этот факт?

**21.2.** Можно ли по методу Штерна определить скорость одной молекулы?

\*Штерн Отто (1888–1969), немецкий физик-экспериментатор.

## §22 Идеальный газ в однородном поле тяготения

Молекулы любого газа всегда находятся в поле тяготения Земли. На распределение молекул атмосферного воздуха влияют два фактора: тепловое движение молекул и земное тяготение. Если бы не было теплового движения, то все молекулы упали бы на Землю; если бы не было тяготения, то молекулы рассеялись бы по всей Вселенной.

Совместные действия теплового движения и земного тяготения приводят к такому состоянию атмосферы, при котором концентрация молекул и давление газа убывают с возрастанием высоты над Землёй.

### 22.1 Барометрическая формула

Закон изменения давления  $p$  идеального газа с высотой  $h$  в однородном поле тяготения описывается **барометрической формулой Лапласа**\*:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (22.1)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление на высоте  $h = 0$ , т. е. высоте, принятой за начало отсчёта;

$M$  – молярная масса газа.

Данная формула получена в предположении, что газ находится в состоянии термодинамического равновесия, т. е. его температура  $T = \text{const}$ .

Таким образом, давление идеального газа, находящегося в однородном поле тяготения в состоянии термодинамического равновесия, убывает с высотой по экспоненциальному закону.

Из (22.1) следует, что давление убывает с высотой тем быстрее, чем тяжелее газ (чем больше молярная масса  $M$ ) и чем ниже температура. На рис. 22.1

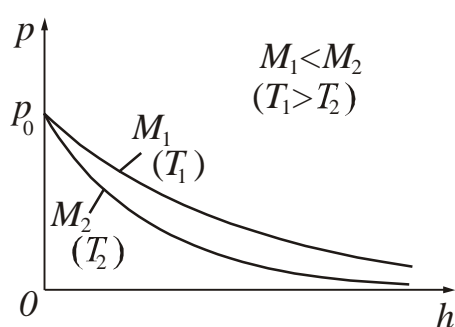


Рисунок 22.1

представлены две кривые, описанные уравнением (22.1). Их можно рассматривать, как соответствующие разным  $M$  (при одинаковой температуре  $T$ ), или как соответствующие разным  $T$  (при одинаковой молярной массе  $M$ ).

Формулу (22.1) можно преобразовать. Для этого сделаем следующие замены:

$$M = m_0 N_A, \quad R = k N_A,$$

где  $m_0$  – масса молекулы;

$N_A$  – число Авогадро;

$k$  – постоянная Больцмана.

Преобразуем показатель экспоненты

$$\frac{Mgh}{RT} = \frac{m_0 N_A g h}{k N_A T} = \frac{m_0 g h}{k T}.$$

\*Лаплас Пьер Симон (1749–1827), французский астроном, математик и физик.



Барометрическая формула после этого примет вид:

$$p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}, \quad (22.2)$$

где  $m_0 g h$  – потенциальная энергия молекулы на высоте  $h$ .

## 22.2 Распределение Больцмана

Согласно барометрической формуле (22.2)

$$p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}.$$

Произведём замену в соответствии с формулой (16.4):

$$p = nkT, \quad p_0 = n_0 kT,$$

где  $n_0$  – концентрация молекул на высоте  $h = 0$ ;

$n$  – концентрация молекул на высоте  $h$ .

Получим:

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}. \quad (22.3)$$

Из анализа формулы (22.3) можно сделать следующие выводы.

1. С понижением температуры концентрация молекул на высотах, отличных от нуля, убывает (рис. 22.2). При  $T = 0$  концентрация молекул в пространстве равна нулю, т. е.  $n = 0$ . Это значит, что при абсолютном нуле все молекулы под действием сил притяжения расположились бы на поверхности Земли.
2. Чем выше температура, тем равномернее распределяются молекулы. При  $T \rightarrow \infty$ ,  $n = n_0$ . Это означает, что при высоких температурах молекулы распределились бы по высоте равномерно.

На разной высоте молекулы обладают разным запасом потенциальной энергии  $\epsilon_{\text{п}} = m_0 g h$ , следовательно, распределение молекул по высоте является вместе с тем распределением их по значениям потенциальной энергии.

С учётом этого формулу (22.3) можно записать следующим образом:

$$n = n_0 e^{-\frac{\epsilon_{\text{п}}}{kT}}, \quad (22.4)$$

где  $n_0$  – концентрация молекул, соответствующая тем точкам пространства, в которых потенциальная энергия равна нулю:  $\epsilon_{\text{п}} = 0$ ;

$n$  – концентрация молекул, соответствующая тем точкам про-

странства, где потенциальная энергия равна  $\epsilon_{\text{п}}$ .

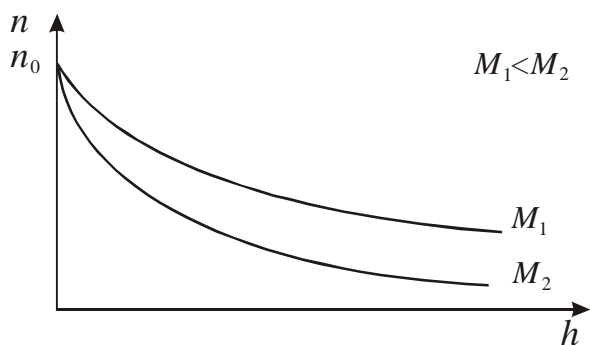


Рисунок 22.2



Из (22.4) следует, что молекулы располагаются с большей концентрацией там, где меньше их потенциальная энергия, и, наоборот, с меньшей концентрацией в местах, где их потенциальная энергия больше.

Больцман доказал, что распределение (22.4) справедливо не только в случае потенциального поля сил земного тяготения, но и в любом потенциальном поле сил для совокупности любых одинаковых частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения. В соответствии с этим распределение (22.4) называют **распределением Больцмана**.

Отметим, что применительно к земной атмосфере формулы (22.2), (22.3) нередко приводят к результатам, не согласующимся с экспериментом. Основываясь на распределении Больцмана, можно ожидать, что процентный состав атмосферы по мере поднятия вверх должен быстро меняться (рис. 22.2). Относительное содержание легких газов – водорода, азота – должно возрасти. Фактически это не подтверждается. Из-за интенсивного перемешивания слоев атмосферы состав атмосферы до высот 20 – 25 км практически один и тот же. Формулы (22.2), (22.3) не учитывают изменения температуры  $T$  и ускорения свободного падения  $g$  с высотой. Всё это говорит о том, что атмосфера не находится в состоянии термодинамического равновесия.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Модель распределения Больцмана.

<http://www.youtube.com/watch?v=lgp4RoKcMpg&list=PL1B0ABC56C7781840>

• **Давайте подумаем!**

**22.1.** Чем обусловлено существование атмосферного давления?

**22.2.** Почему величина атмосферного давления меняется с высотой?

**22.3.** В кабине летящего по орбите космического аппарата (орбитальной станции) поддерживается нормальное атмосферное давление, хотя воздух в кабине невесом, как и все находящиеся в ней тела. Как это объяснить?

## §23 Определение числа Авогадро

Метод определения числа Авогадро, основанный на законе распределения Больцмана, принадлежит Ж. Перрену\*. В поле силы тяжести в соответствии с формулой (22.3)

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}. \quad (23.1)$$

Если бы была известна масса молекулы, то, измеряя распределение концентрации молекул по высоте, можно было бы по формуле (23.1) вычислить постоянную Больцмана, а затем число Авогадро.

В опыте Перрена роль молекул играли достаточно малые, но макроскопические частицы. Перрен поместил частицы-макромолекулы в жидкость, плотность которой немного меньше плотности вещества самих частиц. Поле силы тяжести было ослаблено архимедовой силой, и возникла «атмосфера» из макромолекул, распределение концентраций в которой может быть измерено.

\*Перрен Жан Батист (1870–1942), французский физик, лауреат Нобелевской премии 1926 г.

Для получения взвешенных частиц совершенно одинакового размера и формы Перрен использовал частицы гуммигута. Им была получена однородная эмульсия, состоящая из шарообразных частиц с радиусом порядка микрометра. Эмульсия изучалась с помощью микроскопа. Перемещая микроскоп в вертикальном направлении, Перрен исследовал распределение частиц по высоте и определил отношение концентраций на разных высотах. Масса частицы вычислялась по размерам частицы и плотности гуммигута. Таким образом, все величины, входящие в уравнение (23.1) были измерены экспериментально. После этого были вычислены постоянная Больцмана и число Авогадро. Результаты Перрена оказались в согласии с другими методами измерения тех же постоянных.

Фактическое осуществление опытов Перрена требует громадного труда и большого экспериментального искусства. Эти классические опыты были выполнены в 1908 – 1911 годах и имели большое значение для утверждения идей атомистики.

## Глава 7. Явления переноса

### §24 Явления переноса

#### 24.1 Среднее число столкновений молекул в единицу времени.

##### *Средняя длина свободного пробега молекул*

Конечные размеры молекул и их огромная концентрация даже в газах при обычных условиях приводят к тому, что молекулы непрерывно сталкиваются друг с другом. Напоминаем, что минимальное расстояние  $d$ , на которое сближаются при столкновении центры молекул, называют **эффективным диаметром молекулы** (рис. 24.1). Площадь круга радиусом  $d$  называется **эффективным сечением молекулы**:

$$\sigma = \pi d^2.$$

С учётом того, что распределение молекул по скоростям подчиняется распределению Максвелла, можно получить, что число столкновений за секунду определяется соотношением:

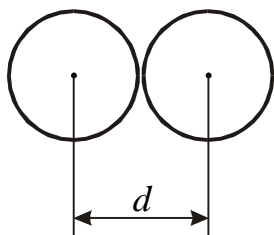


Рисунок 24.1

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 \langle v \rangle n, \quad (24.1)$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя арифметическая скорость молекул;

$n$  – концентрация молекул, т. е. число молекул в единице объёма.

Расстояние, которое молекула пролетает за время свободного пробега от одного столкновения до следующего, называется **длиной свободного пробега**. Длина свободного пробега является случайной величиной, подчиняющейся вероятностному закону. Поэтому вводится **средняя длина свободного пробега**  $\langle \lambda \rangle$  – среднее расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}. \quad (24.2)$$

Состояние газообразной среды, в котором средняя длина свободного пробега молекул соизмерима с размерами сосуда, называется **вакуумом**. Различают низкий, средний и высокий вакуум.

Низкий – давление меняется от атмосферного до  $10^{-3}$  мм рт. ст.

Средний – давление меняется от  $10^{-3}$  мм рт. ст. до  $10^{-6}$  мм рт. ст.

Высокий – давление меняется от  $10^{-6}$  мм рт. ст. до  $10^{-9}$  мм рт. ст.

## 24.2 Явления переноса в газах

Участвуя в тепловом движении, молекулы переходят из одних точек пространства в другие. При этом они переносят присущую им энергию, массу и импульс. Это приводит к возникновению процессов, которые объединяют общим названием **явления переноса**. К явлениям переноса относятся: теплопроводность (обусловленная переносом энергии в виде тепла), диффузия (обусловленная переносом массы) и внутреннее трение или вязкость (обусловленная переносом импульса).

### 24.2.1 Теплопроводность газов

Если температура газа в различных местах различна, то и средняя энергия молекул также будет различной. Перемещаясь вследствие теплового движения из одних мест в другие, молекулы переносят запасённую ими энергию, что и обуславливает процесс теплопроводности.

Молекулы, переместившись из более нагретых областей газа в менее нагретые, отдают часть своей энергии окружающим частицам. И наоборот, медленнее движущиеся молекулы, попадая из менее нагретых областей в более нагретые, увеличивают свою энергию за счёт соударений с молекулами, имеющими большие скорости и энергии.

**Теплопроводность – направленный перенос тепла от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию их температуры.**

Перенос тепла описывается **законом Фурье\*** (1822 г.):

$$\delta Q = -K \frac{dT}{dx} dS_{\perp} dt, \quad (24.3)$$

где  $\delta Q$  – количество переносимого тепла за время  $dt$  через площадку  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению переноса тепла;

$\frac{dT}{dx}$  – градиент температуры; (понятие градиента температуры подробно рассмотрено в §3).

$K$  – коэффициент теплопроводности;

---

\*Фурье Жан Батист Жозеф (1768–1830), французский математик и физик.

Знак «минус» указывает на то, что перенос тепла происходит в направлении убывания температуры.

Из закона Фурье (24.3) следует выражение для коэффициента теплопроводности:

$$K = - \frac{\delta Q}{\frac{dT}{dx} dS_{\perp} dt}. \quad (24.4)$$

Единица измерения коэффициента теплопроводности в СИ:

$$[K] = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}}{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}.$$

**Коэффициент теплопроводности** ( $K$ ) характеризует способность вещества проводить тепло и показывает, какое количество тепла переносится через единичную площадку за единицу времени при градиенте температуры равном единице.

В кинетической теории газов показано, что коэффициент теплопроводности газов можно рассчитывать по следующей формуле:

$$K = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho c_v, \quad (24.5)$$

где  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул,  $\langle v \rangle$  – средняя арифметическая скорость,  $\rho$  – плотность газа,  $c_v$  – удельная теплоёмкость при постоянном объёме.

Газы являются наихудшими проводниками тепла. Коэффициент теплопроводности газов зависит от температуры, с повышением температуры он возрастает.

### **Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Теплопроводность газов. Бутан-воздух: при одинаковом давлении. Бутан при наименьшем давлении.

<http://www.youtube.com/watch?v=frGYUB31mbY>

2. Теплопроводность газов. Неон-воздух: при одинаковом давлении.

<http://www.youtube.com/watch?v=3msku99Gw10>

3. Теплопроводность газов. Воздух-воздух: при разном давлении.

<http://www.youtube.com/watch?v=RaE1BmvkGA4>

## **24.2.2 Диффузия в газах**

Если в разных частях системы имеются различные газы, то тепловое движение перемешивает их до тех пор, пока повсюду не образуется однородная смесь молекул, в которой парциальное давление и плотность каждого газа будут одинаковыми во всём объёме. Этот процесс называется диффузией газов.

**Диффузия в газе – процесс перемешивания молекул, сопровождающийся переносом массы из мест с большей плотностью данных молекул в места с меньшей плотностью этих молекул.**

В смеси газов диффузия вызывается различием в плотностях отдельных газов в разных частях объёмов смеси. В химически чистом газе при постоянной температуре диффузия возникает вследствие неодинаковой плотности в разных частях объёма газа и заключается в переносе массы газа из мест с большей плотностью в места с меньшей плотностью.

В химически однородном газе перенос вещества при диффузии подчиняется **закону Фика\*** (1855 г.):

$$dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS_{\perp} dt, \quad (24.6)$$

где  $dm$  – масса вещества, диффундировавшего за время  $dt$  через площадку  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению переноса вещества;  
 $\frac{d\rho}{dx}$  – градиент плотности – величина, показывающая, на сколько отличаются плотности двух точек, отстоящих друг от друга на единицу длины;  
 $D$  – коэффициент диффузии.

Знак «минус» указывает на то, что перенос массы осуществляется в сторону убывания плотности.

Из закона Фика (24.6) следует выражение:

$$D = - \frac{dm}{\frac{d\rho}{dx} dS_{\perp} dt}. \quad (24.7)$$

**Коэффициент диффузии ( $D$ )** показывает, какая масса вещества переносится через единичную площадку за единицу времени при градиенте плотности, равном единице.

Единица измерения коэффициента диффузии в СИ:

$$[D] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

В кинетической теории газов показано, что коэффициент диффузии можно рассчитывать по формуле:

$$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle. \quad (24.8)$$

Коэффициент диффузии газов растёт с температурой пропорционально  $\sqrt{T}$ , а с ростом давления коэффициент диффузии уменьшается.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Диффузия аммиака.

<http://www.youtube.com/watch?v=BBGo0Qh0i8s>

---

\*Фик Адольф (1829–1901), немецкий ученый-физиолог.

### 24.2.3 Внутреннее трение (вязкость) газов

Слой газа, движущийся относительно остальной массы с некоторой скоростью, обменивается молекулами с этой частью газа. Молекулы, переходящие из движущегося слоя в другие, переносят с собой избыток импульса, который при столкновениях перераспределяется между молекулами, имеющими меньшие скорости. В результате этого переноса между соприкасающимися слоями возникают силы внутреннего трения, тормозящие движение быстрого слоя и ускоряющие движение медленного.

**Внутреннее трение (вязкость) – взаимодействие между слоями газа, которые движутся с различными скоростями, сопровождающееся переносом импульса направленного движения из более быстрых слоёв в более медленные.**

Для явления внутреннего трения справедлив **закон Ньютона** (1687 г.):

$$dp = -\eta \frac{dv}{dx} dS_{\perp} dt, \quad (24.9)$$

где  $dp$  – импульс, переносимый за время  $dt$  через площадку  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению переноса импульса;

$\frac{dv}{dx}$  – градиент скорости;

$\eta$  – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость).

Знак «минус» указывает на то, что перенос импульса происходит в направлении убывания скорости.

Из закона Ньютона (24.9) следует выражение:

$$\eta = - \frac{dp}{\frac{dv}{dx} dS_{\perp} dt}. \quad (24.10)$$

**Коэффициент внутреннего трения** ( $\eta$ ) показывает, какой импульс переносится через единичную площадку за единицу времени при градиенте скорости равном единице.

Единица измерения коэффициента внутреннего трения (вязкости) в СИ:

$$[\eta] = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}}{\text{с}}}{\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{Па} \cdot \text{с}, \text{ (читается: “паскаль-секунда”).}$$

Из газокINETических представлений можно получить следующую формулу для расчёта коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho. \quad (24.11)$$

Можно показать, что коэффициент внутреннего трения газов не зависит от давления, но увеличивается с ростом температуры пропорционально  $\sqrt{T}$ .

Сопоставляя формулы (24.5), (24.8) и (24.11), можно получить связь между коэффициентами переноса:

$$\eta = D\rho, \quad (24.12)$$

$$K = \eta c_V = D\rho c_V. \quad (24.13)$$

Все три рассмотренных явления имеют много общего. Во всех трёх явлениях перенос какой-либо величины из одной части вещества в другую совершается до тех пор, пока данная величина не распределится равномерно по объёму. Подчеркнём, что речь идёт не о движении некоторой части газа как целого и перемещении вместе с ним некоторой величины (макроскопический процесс), а о переносе физической величины неупорядоченным тепловым движением (микроскопический процесс).

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Вязкость газов: опыт с дисками.

<http://www.youtube.com/watch?v=qG3-xKrr-QQ>

### 24.3 Явления переноса в жидкостях и твёрдых телах

Вследствие теплового движения в жидкостях, также как и в газах, происходят явления переноса. Формально эти явления описываются теми же законами, что и в газах (см. формулы (24.3), (24.6), (24.9)). Однако характер теплового движения в жидкостях существенно отличается от имеющегося в газах и, поэтому, механизм процессов переноса также оказывается иным. **Выражения для коэффициентов переноса, полученные для газов на основании молекулярной теории, неприменимы к жидкостям.** Неприменимы к жидкостям и зависимости коэффициентов переноса от давления и температуры, которые вытекали в качестве следствий из выражений коэффициентов переноса через молекулярные величины – длину свободного пробега, среднюю арифметическую скорость и плотность. Не соблюдаются для жидкостей и те соотношения между коэффициентами переноса, которые имеют место для газов.

Опустив математическое обоснование, кратко опишем отличия коэффициентов переноса жидкостей и твёрдых тел от соответствующих коэффициентов газов.

Наибольшей теплопроводностью отличаются металлы. Самый теплопроводящий металл – серебро. С повышением температуры теплопроводность чистых металлов уменьшается, а теплопроводность большинства сплавов – увеличивается. У жидкостей в среднем меньше как само значение коэффициента теплопроводности, так и его колебание для разных веществ. С повышением температуры коэффициент теплопроводности жидкостей уменьшается.

Материалы с  $K < 0,25$  Вт/(м·К) называются **теплоизоляционными**. Большинство теплоизоляционных материалов имеет пористую структуру, поэтому их нельзя рассматривать как сплошную среду. Коэффициент теплопроводности пористых материалов является условной величиной.

Коэффициенты диффузии в жидкостях, при температурах ниже критической, малы по сравнению с коэффициентами диффузии в соответствующих парах или газах при обычных давлениях. Например, для воды при  $T = 300$  К имеем  $D \approx 1,5 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с, а для паров воды в воздухе при той же температуре и атмосферном давлении  $D \approx 2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

С увеличением температуры коэффициент диффузии в жидкостях быстро возрастает. Если температура приближается к критической, то средняя скорость частиц жидкости приближается к средней скорости молекул в реальном газе, и значения коэффициентов диффузии жидкостей становятся близкими по величинам к коэффициентам диффузии газов.

Внутреннее трение при температурах, близких к критической, в жидкостях имеет ту же природу, что и в газах. При температурах, близких к температурам плавления, вязкость жидкости имеет совсем другой механизм.

• **Давайте подумаем!**

**24.1.** Чем объяснить, что интенсивность броуновского движения и диффузии возрастает с повышением температуры?

**24.2.** Цементация стали – это процесс получения твёрдой закалённой корки на поверхности изделий из мягкой стали (насыщение стали углеродом). На каком физическом явлении основан процесс цементации?

**24.3.** Существует метод пайки, заключающийся в следующем: спаиваемые стальные или железные поверхности зачищают, кладут между ними тонкую медную фольгу и нагревают в электрической печи до температуры  $1090^{\circ}\text{C}$ . Такой способ значительно прочнее обычной медной пайки. Объясните, почему?

**24.4.** Зимой при разгрузке нефтеналивных судов насосами нефтепродукты предварительно подогревают до  $60^{\circ}\text{C}$ . Для чего это делают?

**24.5.** Почему все пористые строительные материалы (пористый кирпич, пено-стекло, пенный бетон и др.) обладают лучшими теплоизоляционными свойствами, чем плотные материалы?

**24.6.** Почему батареи парового и водяного отопления помещают у пола, а не у потолка?

## **Глава 8. Физические основы термодинамики**

Термодинамика первоначально возникла как наука о превращениях тепла в работу. Однако, законы, лежащие в основе термодинамики, имеют настолько общий характер, что термодинамические методы применяются для исследования многих физических и химических процессов, для изучения свойств вещества и излучения.

Как отмечалось ранее, термодинамика опирается на основные законы (начала), установленные экспериментально. Поэтому выводы, к которым приходит термодинамика, имеют такую же степень достоверности, как и лежащие в её основе законы.

**Первое начало** термодинамики является законом сохранения энергии, применённым к тепловым процессам, т. е. оно устанавливает количественные соотношения между превращениями энергии из одних видов в другие.

**Второе начало** определяет условия, при которых эти превращения возможны, т.е. определяет возможные направления этого процесса.



## §25 Состояние термодинамической системы. Термодинамический процесс

**Термодинамическая система** – это совокупность макроскопических тел, которые могут обмениваться энергией между собой и с другими телами. Примером системы является жидкость и находящийся с ней в соприкосновении пар или газ. В частности, система может состоять из одного твёрдого, жидкого или газообразного тела.

Состояние системы характеризуют параметрами состояния (давлением  $p$ , объёмом  $V$ , температурой  $T$  и т. д.). Как уже отмечалось (см. §15), состояние, в котором все параметры состояния имеют определённые значения, не изменяющиеся с течением времени, называется **равновесным**. Примеры равновесных состояний: состояние воды и льда при  $0^\circ\text{C}$ , помещённых в термостат; состояние газа в закрытом сосуде при неизменной температуре окружающей среды и т. д.

Состояние системы называется **неравновесным**, если оно без всякого воздействия извне самопроизвольно меняется со временем. В неравновесном состоянии всем или некоторым параметрам нельзя приписать определённые значения. Например, газу в цилиндре с поршнем при быстром сжатии нельзя приписать определённого давления, так как оно оказывается разным в разных частях цилиндра.

Система, находящаяся в неравновесном состоянии и предоставленная самой себе, постепенно переходит в равновесное состояние. Вне зависимости от начального состояния изолированной системы, в конце концов, в ней установится термодинамическое равновесие, а все части системы при этом будут иметь одинаковую температуру. Этот физический принцип называют **нулевым началом термодинамики** (**общим началом термодинамики**). Тем самым нулевое начало фактически вводит и определяет понятие температуры.

**Термодинамический процесс** – переход системы из одного состояния в другое. Процесс, состоящий из последовательности равновесных состояний, называют **равновесным**. Равновесный процесс – это физическая модель. Процессы будут равновесными, если они протекают бесконечно медленно и при этом внешние воздействия изменяются непрерывно, без скачков. В последующем мы будем рассматривать только равновесные состояния и равновесные процессы. Исключение составляют явления переноса.

Равновесный процесс, который допускает возможность возвращения системы в первоначальное состояние через ту же последовательность промежуточных состояний, что и в прямом процессе, называется **обратимым**. При этом в окружающих телах не должно оставаться никаких изменений (не изменяется взаимное расположение тел, окружающих систему, их термодинамическое состояние и т. д.).

Равновесность – важнейший признак обратимого процесса. Обратимый процесс – это тоже процесс, протекающий бесконечно медленно.

Процесс называется **необратимым**, если по его завершении систему нельзя вернуть в исходное состояние так, чтобы в окружающих телах не осталось каких-либо изменений. Основными признаками необратимых процессов являются неравновесность и односторонняя направленность, т. е. необратимый

процесс в обратном направлении самопроизвольно протекать не может. В обратном направлении необратимый процесс протекает только в сопровождении процессов, оставляющих в окружающих телах изменения.

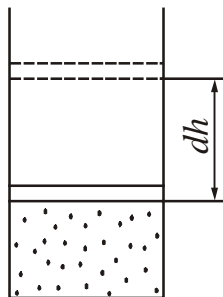
Все реальные процессы необратимы. Необратимы смешение жидкостей, газов; передача тепла от нагретого тела к холодному; диффузия и т. д.

- Давайте подумаем!

**25.1.** Приведите несколько примеров необратимых процессов в природе.

### §26 Работа, совершаемая системой при изменении объёма

Рассмотрим газ, находящийся в цилиндрическом сосуде, закрытом плотно пригнанным поршнем. Допустим, что газ начал медленно расширяться и переместил поршень на расстояние  $dh$  (рис. 26.1). Элементарная работа, совершаемая газом при перемещении поршня на величину  $dh$  равна



$$\delta A = F dh,$$

где  $F$  – сила, с которой газ давит на поршень. Заменим силу произведением давления  $p$  на площадь  $S$  поршня, получим:

$$\delta A = p S dh.$$

Произведение  $S dh$  представляет собой изменение объёма  $dV$ . Поэтому

Рисунок 26.1

$$\delta A = p dV. \quad (26.1)$$

Если газ расширяется, то  $dV > 0$ . Работа в этом случае будет положительной. Если газ сжимается, то  $dV < 0$ . Работа будет отрицательной.

Если давление газа при изменении объёма не остается постоянным, то работа, совершаемая при изменении объёма от  $V_1$  до  $V_2$ , вычисляется интегрированием:

$$A_{12} = \int_1^2 \delta A = \int_1^2 p dV. \quad (26.2)$$

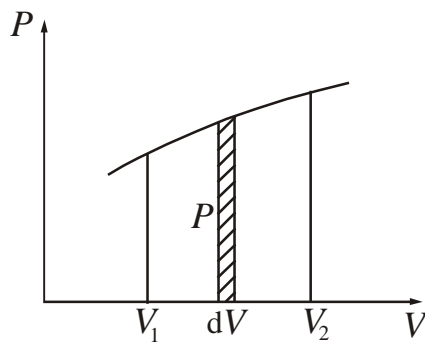


Рисунок 26.2

Процесс изменения объёма можно представить на диаграмме  $(pV)$ . Элементарной работе  $\delta A = p dV$  соответствует площадь узкой заштрихованной полоски (рис. 26.2). Площадь фигуры, ограниченной осью  $V$ , кривой  $p = f(V)$  и ординатами  $V_1$  и  $V_2$ , численно равна работе, совершаемой газом при изменении его объёма от  $V_1$  до  $V_2$ .

- Давайте подумаем!

**26.1.** Со дна водоёма поднимается пузырек газа. Совершает ли этот газ работу?

## §27 Внутренняя энергия термодинамической системы

**Внутренняя энергия ( $U$ ) тела – это сумма кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии взаимодействия между молекулами.**

Кинетическая энергия тела как целого и потенциальная энергия тела во внешних полях во внутреннюю энергию не входят!

Внутренняя энергия является функцией состояния системы. Это означает, что система в каждом состоянии обладает определённой внутренней энергией. Если система переходит из одного состояния в другое, то изменение внутренней энергии всегда равно разности значений внутренней энергии в конечном и начальном состояниях и не зависит от процесса, которым осуществляется переход.

### 27.1 Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы

**Числом степеней свободы ( $i$ ) механической системы называется количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы в пространстве.**

Экспериментально установлено, что при определении числа степеней свободы молекул, атомы нужно рассматривать как материальные точки.

#### 1. Одноатомная молекула (He, Ne, Ar и т.д.).

Положение одноатомной молекулы задаётся тремя пространственными координатами ( $x, y, z$ ), поэтому  $i = 3$ . Степени свободы одноатомной молекулы называют поступательными степенями свободы.

#### 2. Двухатомная молекула с жёсткой связью ( $H_2, O_2, N_2$ и т.д.).

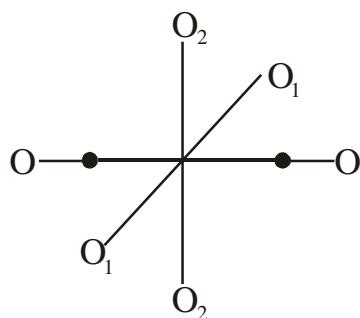


Рисунок 27.1

Такая молекула кроме трёх степеней свободы поступательного движения имеет ещё две степени свободы вращательного движения вокруг взаимно перпендикулярных осей  $O_1-O_1$  и  $O_2-O_2$  (рис. 27.1). Вращение вокруг третьей оси  $O-O$  рассматривать не надо, так как момент инерции атомов относительно этой оси ничтожно мал. Следовательно, вращение вокруг этой оси не вносит вклада в кинетическую энергию молекулы. Таким образом, для двухатомной молекулы  $i = 3 + 2 = 5$  (3 – поступательные степени свободы; 2 – вращательные степени свободы).

#### 3. Если число атомов в молекуле с жёсткой связью три или больше трёх ( $NH_3, CH_4$ ), то число степеней свободы. $i = 3 + 3 = 6$ (3 – поступательные степени свободы; 3 – вращательные степени свободы).

При любом числе степеней свободы молекулы, три из них – поступательные, причём ни одна из них не имеет преимущества перед другими. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы согласно формуле (18.1) равна

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Так как поступательных степеней свободы три, то на одну степень свободы приходится энергия

$$\varepsilon = \frac{1}{2} kT. \quad (27.1)$$

**На каждую степень свободы (поступательную, вращательную) в среднем приходится одинаковая кинетическая энергия, равная  $\frac{1}{2} kT$ .**

Это утверждение называется **законом равнораспределения энергии** хаотического движения молекул по степеням свободы.

Если атомы в молекуле связаны упругой связью, то кроме поступательного и вращательного движений, система может совершать колебательное движение. Колебательное движение связано с наличием у колеблющейся системы не только кинетической, но и потенциальной энергии. В теории колебаний доказывается, что средние значения кинетической и потенциальной энергий такой системы одинаковы. Отсюда следует, что на колебательное движение приходится две половинки  $kT$  – одна в виде кинетической энергии, другая – в виде потенциальной.

Из закона равнораспределения энергии по степеням свободы вытекает, что средняя кинетическая энергия молекулы определяется формулой:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad (27.2)$$

где  $i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{вращ.}} + 2i_{\text{колеб.}}$ .

## 27.2 Внутренняя энергия идеального газа

Молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, поэтому его внутренняя энергия складывается из кинетических энергий отдельных молекул:

$$U = \langle \varepsilon \rangle N, \quad (27.3)$$

где  $N$  – число молекул.

$\langle \varepsilon \rangle$  – средняя кинетическая энергия одной молекулы.

Число молекул определяется выражением:

$$N = \frac{m}{M} N_A, \quad (27.4)$$

где  $N_A$  – число Авогадро.

Заменив в (27.3) энергию молекулы по формуле (27.2) и число молекул по формуле (27.4), получим:

$$U = \frac{i}{2} kT \frac{m}{M} N_A. \quad (27.5)$$

Произведение постоянной Больцмана на число Авогадро даст молярную газовую постоянную:  $kN_A = R$ . Тогда

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (27.6)$$

Из (27.6) следует, что *внутренняя энергия идеального газа не зависит от давления и объёма, а определяется природой газа и его температурой*. На практике важно знать изменение внутренней энергии

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1). \quad (27.7)$$

• **Давайте подумаем!**

**27.1.** Мука из-под жерновов выходит горячей. Хлеб из печи также вынимают горячим. Чем вызывается в каждом из этих случаев увеличение внутренней энергии тела (муки, хлеба)?

**27.2.** Может ли заданное количество механической энергии целиком превратиться во внутреннюю? Если это возможно, приведите пример.

**27.3.** Почему нагревается велосипедный насос при накачивании им воздуха в шину?

## §28 Первое начало термодинамики

Изменить внутреннюю энергию можно за счёт совершения над телом работы  $A'$  и передачи ему тепла  $Q$ .

**Тепло ( $Q$ ) – энергия, переданная от одного тела к другому посредством теплопередачи без совершения над телом механической работы.** Тепло измеряется в джоулях.

Физическая природа теплопередачи заключается в том, что отдельные молекулы более нагретого тела совершают положительную работу над отдельными молекулами менее нагретого тела. Это обуславливает передачу энергии от тела к телу в виде тепла.

Из закона сохранения энергии следует, что

$$Q = \Delta U + A, \quad (28.1)$$

где  $A = -A'$  – работа, которую совершает данное тело (или система тел) над внешними телами;

$\Delta U = U_2 - U_1$  – приращение внутренней энергии тела (системы тел);

$Q$  – количество тепла, сообщённого телу (системе тел).

Этот закон в термодинамике называется первым началом термодинамики. Формулируется он следующим образом:

**Количество тепла, сообщённое системе, идёт на приращение внутренней энергии системы и на совершение системой работы над внешними телами.**

При вычислении работы и количества тепла обычно рассматриваемый процесс приходится разбивать на ряд элементарных процессов, соответствующих очень малому изменению параметров системы. Для элементарного процесса первое начало термодинамики записывается в виде:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (28.2)$$

где  $dU$  – элементарно малое приращение внутренней энергии;

$\delta Q$  – элементарное количество тепла;

$\delta A$  – элементарная работа.

Первое начало можно также формулировать следующим образом:

***Невозможен вечный двигатель первого рода, то есть такой периодически действующий двигатель, который совершал бы работу в большем количестве, чем полученная им извне энергия.***

Как уже указывалось, внутренняя энергия является функцией состояния, поэтому можно говорить о её запасе в каждом состоянии. Это означает, что  $dU$  есть полный дифференциал. Следовательно, интеграл

$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1$$

не зависит от пути, по которому осуществляется интегрирование. Здесь  $U_1$  – внутренняя энергия в состоянии 1,  $U_2$  – внутренняя энергия в состоянии 2.

Тепло  $Q$  и работа  $A$  не являются функциями состояния, т.е. нельзя говорить о запасе тепла или работы, которыми обладает тело в различных состояниях. Это означает, что  $\delta Q$  и  $\delta A$  не являются полными дифференциалами. Интегралы

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{12} \quad \text{и} \quad \int_1^2 \delta A = A_{12}$$

зависят от пути, по которому производилось интегрирование, т.е.  $Q$  и  $A$  являются функциями процесса.  $A_{12}$  – это работа, совершаемая телом в ходе процесса 1-2;  $Q_{12}$  – количество тепла, полученное телом в ходе того же процесса.

### • Давайте подумаем!

**28.1.** Может ли тепло рассматриваться как форма запасённой энергии? Будет ли такая интерпретация противоречить представлению о тепле как об энергии в процессе её передачи в результате разности температур?

**28.2.** Приведите примеры, в которых видна разница между количеством тепла и температурой.

**28.3.** Можно ли передать некоторое количество тепла веществу, не вызывая этим повышения его температуры?

## §29 Теплоёмкость

**1. Теплоёмкость тела** – скалярная физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить телу, чтобы нагреть его на один кельвин.

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (29.1)$$

$$[C_{\text{тела}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

**2. Удельная теплоёмкость** – скалярная физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы нагреть его на один кельвин.

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (29.2)$$

$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

**3. Молярная теплоёмкость** – скалярная физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить одному молю вещества, чтобы нагреть его на один кельвин.

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT}. \quad (29.3)$$

$$[C] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Удельная и молярная теплоёмкости связаны соотношением:

$$c = \frac{C}{M}, \quad (29.4)$$

где  $M$  – молярная масса.

Теплоёмкость газов зависит от условий, при которых производилось нагревание тела. Если нагревание производилось при постоянном объёме, то теплоёмкость называется теплоёмкостью при постоянном объёме и обозначается  $C_V$ . Если нагревание производилось при постоянном давлении, то теплоёмкость называется теплоёмкостью при постоянном давлении и обозначается  $C_P$ .

• **Давайте подумаем!**

**29.1.** Чем объяснить, что в отопительных системах применяется вода, а не какая-либо другая жидкость?

**29.2.** На горячей отопительной батарее лежит давно просохшее полотенце. Одинаковы ли степени их нагретости, оцениваемые наощупь? Одинаковы ли их температуры?

**29.3.** Как может резать металл фрикционная пила, представляющая собой стальной диск без зубьев?

**29.4.** Кристаллизация вещества сопровождается теплоотдачей, но температура затвердевающего вещества при этом не понижается. За счёт каких видов энергии происходит эта теплоотдача?

### §30 Второе начало термодинамики

#### 30.1 Энтропия. Приведённое количество тепла

Чтобы определить возможные направления процессов, необходимо ввести физическую величину, которая количественно охарактеризовала бы эту возможность. Такую термодинамическую функцию ввёл в 1865 году Э. Клаузиус\* и назвал её *энтропия* (entropia (греч.) – одностороннее направление).

*Энтропия ( $S$ ) – скалярная физическая величина, функция состояния системы, изменение которой в обратимом процессе равно количеству тепла, сообщённому системе, отнесённому к термодинамической температуре системы:*

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (30.1)$$

Определённая таким образом энтропия измеряется в Дж/К. Отношение количества тепла, полученного системой от какого-либо тела, к температуре этого тела, называется *приведённым количеством тепла*.

Энтропия величина аддитивная. Это значит, что энтропия системы равна сумме энтропий отдельных её частей.

Поскольку энтропия является функцией состояния, то она не зависит от того, как осуществлён переход из одного состояния системы в другое, а определяется только начальным и конечным состояниями системы. Чтобы найти изменение  $\Delta S$  энтропии, надо проинтегрировать выражение (30.1):

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (30.2)$$

Формула (30.2) справедлива *только для обратимых процессов*.

Клаузиус сформулировал следующие свойства энтропии изолированной (замкнутой) системы:

1. Энтропия изолированной системы возрастает, если в системе протекает необратимый процесс. Тогда

$$\Delta S_{\text{необр}} > 0.$$

2. Энтропия изолированной системы остается постоянной, если в системе протекает обратимый процесс. Тогда

$$\Delta S_{\text{обр}} = 0.$$

---

\*Клаузиус Рудольф ЮмусЭмануэль (1822–1888), немецкий физик-теоретик.



Данные свойства можно обобщить:

**Энтропия изолированной системы при любых происходящих в ней процессах не убывает.**

$$\Delta S \geq 0. \quad (30.3)$$

Знак « = » относится к обратимому процессу, знак « > » – к необратимому.

Утверждение о том, что энтропия изолированной термодинамической системы может только возрасть или по достижении максимального значения оставаться постоянной, называется **законом возрастания энтропии** или вторым началом термодинамики.

### 30.2 Энтропия. Статистическое толкование

Различные состояния, характеризуемые одним и тем же значением внутренней энергии, обладают разной вероятностью. Изолированная система будет самопроизвольно переходить из менее вероятных состояний в более вероятные, или находиться в состоянии, вероятность которого максимальна.

Поясним на следующем примере. Пусть в одной из половин разделённого перегородкой сосуда имеется газ, а в другой половине сосуда – вакуум. Если убрать перегородку, то газ займёт весь сосуд. Обратный процесс, в результате которого газ самопроизвольно собрался бы в одной половине сосуда, невозможен. Это обусловлено тем, что вероятность состояния, при котором молекулы газа распределены поровну между обеими половинами сосуда, очень велика, а вероятность состояния, при котором все молекулы находились бы в одной из половин не разделённого перегородкой сосуда, практически равна нулю.

Л. Больцман в 1877 году показал, что энтропия и вероятность состояния системы связаны следующим образом:

$$S = k \log W, \quad (30.4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$W$  – термодинамическая вероятность состояния системы.

**Термодинамическая вероятность ( $W$ ) – число различных способов, которыми реализуется данное состояние.**

Чтобы понять смысл величины  $W$ , рассмотрим следующие примеры (рис. 30.1).

1. В первой ячейке 4 молекулы, во второй их нет. Данное состояние можно осуществить только одним способом.

Значит, термодинамическая вероятность  $W = 1$ .

2. В первой ячейке должно быть три молекулы, во второй – одна. Данное состояние можно осуществить четырьмя способами. Значит термодинамическая вероятность  $W = 4$ .

1 2 3 4 • • • •	
1 2 3 • • •	4 •
4 1 2 • • •	3 •
3 4 1 • • •	2 •
2 3 4 • • •	1 •

Рисунок 30.1

Обратите внимание на то, что математическая вероятность, которую называют просто вероятностью, выражается дробным числом и не может быть больше 1. Термодинамическая вероятность выражается целым, как правило, очень большим, числом.

Таким образом, можно дать статистическое определение энтропии.

**Энтропия ( $S$ ) – скалярная физическая величина, функция состояния системы, равная произведению постоянной Больцмана на логарифм термодинамической вероятности.**

Состояние, которое осуществляется небольшим числом способов (термодинамическая вероятность небольшая), называется **упорядоченным**. Состояние, осуществляемое многими способами (термодинамическая вероятность выражается большим числом), называется **беспорядочным**. Из соотношения (30.4) можно сделать вывод: чем более вероятно состояние, тем больше энтропия этого состояния. Следовательно, энтропия служит мерой беспорядка.

Все естественные самопроизвольные процессы – это переход от порядка к беспорядку, который связан с тепловым движением частиц. В состоянии равновесия – наиболее вероятного состояния системы – число микросостояний максимально (термодинамическая вероятность максимальна), при этом энтропия максимальна. **Энтропия – это единственная функция в физике, которая показывает направленность процессов.**

### 30.3 Термодинамические формулировки второго начала термодинамики

Второе начало термодинамики определяет возможные направления процессов превращения энергии из одного вида в другой. Также как и первое начало, оно имеет несколько формулировок. Все приведённые формулировки эквивалентны.

**Невозможен процесс, единственным конечным результатом которого была бы передача тепла от менее нагретого тела к более нагретому.**

Это не означает, что второе начало вообще запрещает переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому. Такой переход возможен, но он не будет единственным результатом процесса. Это значит, что одновременно произойдут изменения в окружающих телах, так как для осуществления этого перехода над системой должна совершиться работа.

**Невозможен такой процесс, единственным конечным результатом которого явилось бы отнятие от какого-то тела некоторого количества тепла и превращение этого тепла полностью в работу.**

Рассмотрим, например, расширение газа при постоянной температуре. По первому началу термодинамики  $Q = \Delta U + A$ . Температура газа не меняется, значит  $\Delta T = 0$ . Из соотношения (27.7) следует, что изменение внутренней энергии  $\Delta U = 0$ . Получается, что всё полученное тепло перешло в работу:  $Q = A$ . Но получение тепла и превращение его в работу не единственный конечный результат процесса. Кроме того, в результате изотермического процесса происходит изменение объёма газа.

Первое начало допускает построение периодически действующего двигателя, совершающего работу за счёт охлаждения одного источника тепла. Периодически действующий двигатель, который основан на первом начале термодинамики и совершает работу за счёт охлаждения одного источника тепла (например, внутренней энергии больших водоемов), называется **вечным двигателем второго рода**. Обобщение огромного экспериментального материала привело к выводу о том, что построение такого двигателя невозможно. Следующая формулировка второго начала термодинамики утверждает невозможность создания такого двигателя.

***Невозможен вечный двигатель второго рода, то есть периодически действующий двигатель, который получал бы теплоту от одного резервуара и превращал бы её полностью в работу.\****

Анализ формулировок второго начала термодинамики показывает, что во всех формулировках запрещены ситуации, нарушающие закон возрастания энтропии. При разработке новых технологий и создании новых машин необходимо помнить, что любая технология и любая машина не могут быть реализованы, если в них заложены процессы, происходящие в теплоизолированных условиях с уменьшением энтропии, даже если эти процессы удовлетворяют всем законам физики, включая фундаментальные законы сохранения.

Из второго начала термодинамики следует неравноценность работы и тепла как двух форм передачи энергии. Переход энергии упорядоченного движения тела как целого в хаотическое движение его частиц является необратимым процессом (при движении тела под действием силы трения его кинетическая энергия переходит во внутреннюю). Переход неупорядоченного движения частиц тела в упорядоченное движение тела как целого требует, чтобы одновременно происходил какой-либо компенсирующий процесс.

### **30.4 Границы применимости второго начала термодинамики**

Второе начало термодинамики – это статистический закон, который описывает закономерности хаотического движения большого числа частиц, составляющих замкнутую систему. Если система состоит из небольшого числа частиц, то будут наблюдаться отклонения от второго начала.

Второе начало, установленное для замкнутых систем на Земле, нельзя распространять на всю Вселенную. Такое распространение приводит к неправильному, с физической точки зрения, выводу о том, что температура всех тел во Вселенной должна выровняться. При этом все формы движения, кроме хаотического теплового движения должны прекратиться – должна наступить так называемая «тепловая смерть» Вселенной. На самом деле Вселенная является незамкнутой системой, и в некоторых её частях неизбежны флуктуации (отклонения), нарушающие тепловое равновесие. Доказано, что для бесконечной Вселенной не может быть равновесного состояния, соответствующего «тепловой смерти».

---

\*В 1775 г. Парижская академия наук приняла решение не рассматривать заявки на патентование вечного двигателя из-за очевидной невозможности его создания.

• Давайте подумаем!

**30.1.** Можно ли считать второе начало термодинамики всеобщим законом природы, если учесть существование электрических холодильников? Ведь в них внутренняя энергия, отдаваемая холодильным шкафом путём теплопередачи, оказывается переданной в более тёплую область (комнату).

**30.2.** Океан обладает практически неисчерпаемым запасом внутренней энергии. Почему же до сих пор не строят тепловых машин, которые использовали бы эту внутреннюю энергию?

**30.3.** Имеет ли место изменение энтропии в чисто механических процессах?

## §31 Тепловые машины

### 31.1 Круговые процессы (циклы)

В технической термодинамике, исследующей термодинамические процессы в тепловых машинах, часто применяют метод циклов.

**Круговым процессом** (или **циклом**) называется такой процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние. На графике (рис. 31.1) цикл изображается замкнутой кривой. На участке 1-2 (расширение от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$ ) работа положительна и равна площади, отмеченной наклонённой вправо штриховкой. На участке 2-1 (сжатие от  $V_2$  до  $V_1$ ) работа отрицательна и равна площади, отмеченной наклонённой влево штриховкой. Следовательно, работа за цикл численно равна площади, охватываемой кривой.

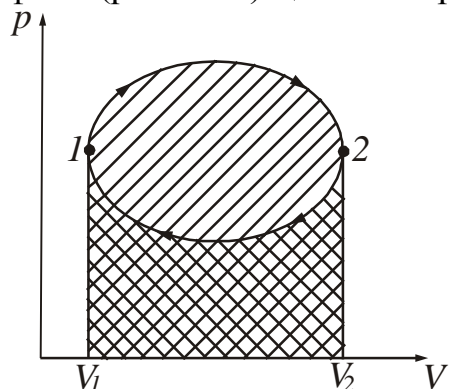


Рисунок 31.1

После совершения цикла система возвращается в исходное состояние, поэтому изменение внутренней энергии системы равно нулю.

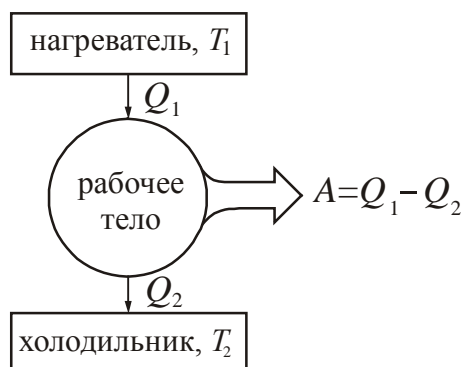
Эффективность циклов зависит от характера термодинамических процессов, образующих конкретный цикл. Очевидно, что при прочих равных условиях наибольшая эффективность будет наблюдаться у тех циклов, у которых все процессы являются обратимыми. Циклы, состоящие из обратимых процессов, являются обратимыми. Соответственно, если цикл состоит из необратимых процессов, то он называется необратимым.

### 31.2 Тепловая машина. Кпд тепловой машины

**Тепловая машина** — периодически действующий двигатель, совершающий работу за счёт получаемого извне тепла.

Принципиальная схема теплового двигателя дана на рис. 31.2. **Рабочим телом** называется термодинамическая система, совершающая круговой процесс и обменивающаяся энергией с другими телами. Обычно таким рабочим телом является газ.

Сначала газ приводят в контакт с нагревателем (теплоотдатчиком), т.е. телом, температура которого  $T_1$  выше температуры газа. Газ получит от нагревателя тепло  $Q_1$  и расширится от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$ . Затем газ надо сжать до объёма  $V_1$ , т.е. вернуть его в исходное состояние. Для этого его приводят в контакт с холодильником (теплоприёмником), т.е. телом, температура которого  $T_2$  ниже температуры газа. При этом газ отдаёт холодильнику тепло  $Q_2$ .



Совершаемая работа

$$A = Q_1 - Q_2, \quad (31.1)$$

Рисунок 31.2

так как изменение внутренней энергии в круговом процессе равно нулю.

Чем полнее тепловая машина превращает получаемое извне тепло  $Q_1$  в полезную работу  $A$ , тем она выгоднее. Поэтому тепловую машину принято характеризовать **коэффициентом полезного действия** (кпд). Кпд равен отношению совершаемой за один цикл работы  $A$  к получаемому от нагревателя за цикл количеству тепла  $Q_1$ :

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (31.2)$$

С учётом формулы (31.1) выражение для кпд можно записать в виде:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (31.3)$$

Из определения кпд следует, что он не может быть больше единицы.

### 31.3 Цикл Карно

**Цикл Карно** – обратимый цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиа-

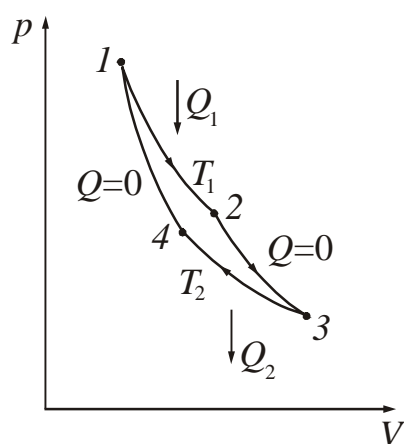


Рисунок 31.3

бат. Напоминаем, что изотермический процесс – это процесс, происходящий при постоянной температуре, адиабатный – процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой. Этот цикл впервые введён в рассмотрение французским инженером Сади Карно\*. Если рабочим телом является идеальный газ, то цикл Карно имеет вид, изображённый на рис. 31.3.

В процессе 1-2 газ находится в тепловом контакте и равновесии с нагревателем. Температура нагревателя  $T_1$ . От нагревателя газ получит тепло  $Q_1$  ( $Q_1 > 0$ ). Температура нагревателя при этом не изменится.

\*Карно Никола Сади (1796–1832), французский физик и инженер.

В процессе 2-3 газ теплоизолируют, и работа по его расширению происходит за счёт изменения внутренней энергии. В процессе 3-4 газ приводится в контакт с холодильником, температура которого  $T_2$  не меняется ( $T_2 < T_1$ ). При этом газ сжимается и передаёт холодильнику тепло  $Q_2$ . В процессе 4-1 газ снова теплоизолируется и сжимается до первоначального состояния 1.

Кпд цикла Карно определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (31.4)$$

Из (31.4) следует, что *кпд всех обратимых машин, работающих при одних и тех же температурах нагревателя и холодильника, одинаков и определяется только температурами нагревателя и холодильника и не зависит от природы рабочего тела.*

Это утверждение называется *теоремой Карно*. Из (31.4) следует, что для увеличения КПД тепловой машины необходимо увеличивать температуру нагревателя и уменьшать температуру холодильника.

КПД необратимой машины всегда меньше, чем КПД обратимой машины, работающей с тем же нагревателем и холодильником.

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (31.5)$$

Знак « = » относится к обратимым машинам, знак « < » – к необратимым.

КПД обратимой машины является наибольшим из всех возможных при данных условиях. Но осуществить реально такой цикл невозможно. Во-первых, все процессы в такой машине должны происходить бесконечно медленно, а во-вторых, в реальных машинах мы имеем дело с необратимыми потерями тепла.

### • Давайте подумаем!

**31.1.** Какие факторы уменьшают КПД теплового двигателя по отношению к его предельному значению?

**31.2.** Разъясните такое утверждение: тепловой двигатель превращает беспорядочное механическое движение в упорядоченное механическое.

**31.3.** Проще всего отапливать помещения за счёт энергии электрического тока, используя электронагревательные приборы. Является ли этот способ энергетически наиболее выгодным?

## §32 Термодинамическое описание процессов в идеальных газах

Термодинамические процессы, происходящие в системе с постоянной массой при каком-либо одном постоянном параметре, называются *изопроцессами*.

### 32.1 Изохорный процесс

**Изохорный процесс** происходит при постоянном объёме, т. е.  $V = \text{const}$  и  $m = \text{const}$  (рис. 32.1). Описывается **законом Шарля\***:

$$\frac{p}{T} = \text{const}. \quad (32.1)$$

Для двух состояний уравнение (30.1) запишется в виде

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Сформулируем первое начало термодинамики для изохорного процесса. Согласно (28.2):

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

Так как  $V = \text{const}$ , то  $dV = 0$ . Элементарная работа  $\delta A = p dV = 0$ .

Следовательно,

$$\delta Q = dU. \quad (32.2)$$

Для конечных величин

$$Q = \Delta U. \quad (32.3)$$

**При изохорном процессе количество тепла, сообщённое системе, идёт на приращение внутренней энергии.**

Найдём молярную теплоёмкость при  $V = \text{const}$ .

$$C_V = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} = \frac{\frac{i}{2} R \nu dT}{\nu dT} = \frac{i}{2} R,$$

Окончательно имеем:

$$C_V = \frac{i}{2} R. \quad (32.4)$$

$$\text{Тогда} \quad dU = \nu C_V dT \quad \text{или} \quad \Delta U = \nu C_V \Delta T. \quad (32.5)$$

Вычислим изменение энтропии.

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\nu C_V dT}{T} = \nu C_V \ln T \Big|_{T_1}^{T_2} = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

$$\text{Окончательно:} \quad \Delta S = \frac{m}{M} C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{m}{M} C_V \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (32.6)$$

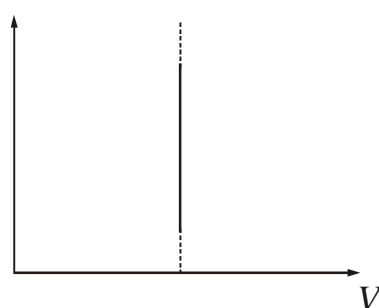


Рисунок 32.1

\*Шарль Жак Александр Сезар (1746–1823), французский физик и изобретатель.

## 32.2 Изобарный процесс

**Изобарный процесс** происходит при постоянном давлении, т. е.  $p = \text{const}$  и  $m = \text{const}$  (рис. 32.2). Описывается **законом Гей-Люссака\***:

$$\frac{V}{T} = \text{const} . \quad (32.7)$$

Для двух состояний уравнение (32.7) запишется в виде  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ .

Запишем первое начало термодинамики для изобарного процесса:

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

Для конечных величин:

$$Q = \Delta U + A . \quad (32.8)$$

**При изобарном процессе количество тепла, сообщённое системе, идёт на приращение внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами.**

Найдём работу, которая совершается системой при изобарном процессе.

$$\delta A = p dV ,$$

$$A = \int_1^2 p dV = p(V_2 - V_1) . \quad (32.9)$$

Работа численно равна площади заштрихованного прямоугольника (рис. 32.2).

Найдём молярную теплоёмкость при  $p = \text{const}$ .

$$C_p = \frac{\delta Q_p}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} + \frac{\delta A}{\nu dT} = \frac{\nu C_V dT}{\nu dT} + \frac{p dV}{\nu dT} .$$

Далее используем уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона). При  $p = \text{const}$

$$p dV = \nu R dT .$$

Сделав замену и произведя сокращения, получим:

$$C_p = C_V + \frac{\nu R dT}{\nu dT} .$$

$$C_p = C_V + R . \quad (32.10)$$

Полученное выражение называют **уравнением Майера\***.

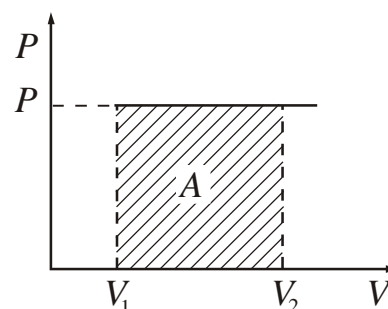


Рисунок 32.2

\*Гей-Люссак Жозеф Луи (1778–1850), французский физик и химик.

\*Майер Юлиус Роберт (1814–1878), немецкий врач.



Выразим молярную теплоёмкость при постоянном давлении через число степеней свободы. Для этого заменим в (32.10)  $C_V$  по формуле (32.4) и получим:

$$C_p = \frac{(i+2)}{2} R. \quad (32.11)$$

Вычислим изменение энтропии:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{\nu C_p dT}{T} = \nu C_p \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \nu C_p \ln T \Big|_{T_1}^{T_2} = \nu C_p \ln \frac{T_2}{T_1},$$

Окончательно:

$$\Delta S = \nu C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \nu C_p \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (32.12)$$

### 32.3 Изотермический процесс

**Изотермический процесс** происходит при постоянной температуре, т. е.  $T = \text{const}$  и  $m = \text{const}$  (рис. 32.3). Описывается **законом Бойля\* – Мариотта\***:

$$pV = \text{const}. \quad (32.13)$$

Для двух состояний уравнение (32.13) запишется в виде

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Сформулируем первое начало термодинамики для изотермического процесса:

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

Так как  $T = \text{const}$ , то  $dT = 0$ . Приращение внутренней энергии  $dU = \nu C_V dT = 0$ . Следовательно,

$$\delta Q = \delta A.$$

Для конечных величин:

$$Q = A. \quad (32.14)$$

**При изотермическом процессе количество тепла, сообщённое системе, идёт на совершение системой работы над внешними телами.**

Найдём работу, которая совершается системой при изотермическом процессе:

$$\delta A = p dV.$$

Из уравнения Менделеева – Клапейрона выразим давление:

$$p = \frac{\nu RT}{V}.$$

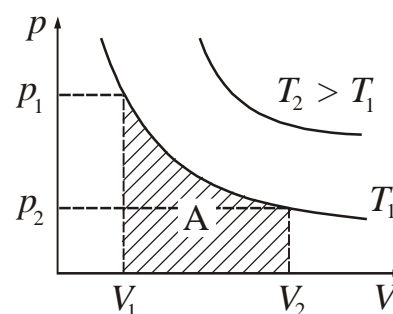


Рисунок 32.3

\*Бойль Роберт (1627–1691), английский химик и физик.

\*Мариотт Эдм (1620–1684), французский физик и физиолог.

Сделав замену, получим

$$A = \int_1^2 p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu RT}{V} dV = \nu RT \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Окончательно:

$$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (32.15)$$

Найдём молярную теплоёмкость при  $T = \text{const}$ . Так как  $dT = 0$ , то

$$C_T = \frac{\delta Q_T}{\nu dT} = \infty. \quad (32.16)$$

Это означает, что понятие теплоёмкости при изотермическом процессе смысла не имеет.

Рассчитаем изменение энтропии

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q_{12}}{T}.$$

Так как  $Q = A$ , то

$$\Delta S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu R \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (32.17)$$

### 32.4 Адиабатный процесс

**Адиабатным называется процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.** Это означает, что  $\delta Q = 0$ , т. е.  $Q = 0$ . Адиабатный процесс описывается следующим уравнением:

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (32.18)$$

Соотношение (32.18) называется **уравнением Пуассона\***.

Для двух состояний оно записывается в следующем виде:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (32.19)$$

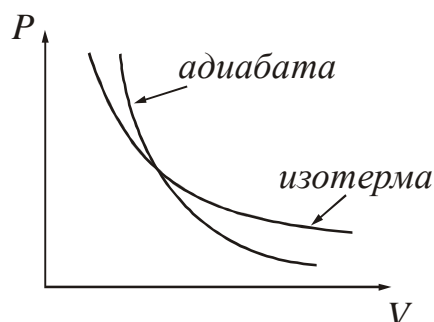


Рисунок 32.4

Буквой  $\gamma$  обозначают величину, называемую **показателем адиабаты**.

Показатель адиабаты  $\gamma$  равен отношению молярной теплоёмкости при постоянном давлении к молярной теплоёмкости при постоянном объёме:

$$\frac{C_p}{C_V} = \gamma. \quad (32.20)$$

\*Пуассон Симеон Дени (1781–1840), французский математик и физик.

Показатель адиабаты можно рассчитывать через число степеней свободы:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{(i+2)2R}{2iR} = \frac{i+2}{i}. \quad (32.21)$$

Можно перейти к уравнению адиабаты в переменных  $T$  и  $V$ . Для этого надо заменить давление  $p$  в (32.18), выразив его из уравнения Менделеева – Клапейрона. В результате получится следующее уравнение (постоянные  $\nu$  и  $R$  вошли в константу):

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (32.22)$$

Для двух состояний:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}.$$

Сравнительные диаграммы изотермы и адиабаты приведены на рис. 32.4.

Количество тепла, которым обменивается тело с внешней средой, будет тем меньше, чем быстрее протекает процесс. Следовательно, близкими к адиабатному, могут быть достаточно быстро протекающие процессы.

Первое начало для адиабатного процесса будет иметь вид:

$$dU + \delta A = 0,$$

$$\delta A = -dU.$$

Для конечных величин:

$$A = -\Delta U. \quad (32.23)$$

**При адиабатном процессе работа совершается за счёт убыли внутренней энергии.**

Если  $dV > 0$ ,  $dU < 0$ , газ охлаждается.

Если  $dV < 0$ ,  $dU > 0$ , газ нагревается.

Молярная теплоёмкость газа при адиабатном процессе равна нулю:

$$C_{\text{ад}} = \frac{\delta Q}{\nu dT} = 0, \quad \text{так как} \quad \delta Q = 0.$$

Найдём работу, совершаемую газом, при адиабатном процессе:

$$\delta A = -dU, \quad dU = \nu C_V dT.$$

Окончательно:

$$A = - \int_{T_1}^{T_2} \nu C_V dT = -\nu C_V (T_2 - T_1) = \nu C_V (T_1 - T_2). \quad (32.24)$$

Сделав замену с использованием уравнения Менделеева – Клапейрона, получим ещё одну формулу для расчёта работы:

$$A = \frac{C_V}{R} (p_1 V_1 - p_2 V_2). \quad (32.25)$$

Рассчитаем изменение энтропии:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = 0, \quad \text{так как} \quad \delta Q = 0.$$

Если  $\Delta S = 0$ , то  $S = \text{const}$  (для обратимого процесса). Так как значение энтропии  $S$  для обратимого адиабатного процесса остается постоянным, то его также называют *изоэнтروпийным*.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Адиабатическое охлаждение: Образование тумана.

<http://www.youtube.com/watch?v=4KEp5RxwYf0>

• **Давайте подумаем!**

**32.1.** К каким отклонениям от закона Шарля может привести диссоциация части молекул, наблюдающаяся в случае значительного повышения температуры газа, состоящего из многоатомных молекул?

**32.2.** Почему нагретая медицинская банка присасывается к телу?

**32.3.** Как объяснить закон Бойля – Мариотта на основании молекулярно-кинетической теории?

**32.4.** Применим ли закон Бойля – Мариотта к давлениям, измеряемым сотнями атмосфер?

**32.5.** Почему изотермическое расширение газа возможно только при подведении к нему некоторого количества тепла?

**32.6.** В каком случае изменение давления газа будет большим: при сжатии его на определённую величину в теплонепроницаемой оболочке или же при изотермическом сжатии?

**32.7.** Работа, совершаемая газом при его адиабатном расширении, меньше, чем при таком же изотермическом расширении. Чем же можно объяснить, что двигатели с адиабатным расширением получили широкое распространение?

## Глава 9. Реальные газы и жидкости

### §33 Реальные газы

#### 33.1 Силы межмолекулярного взаимодействия

*Реальным называется газ, между молекулами которого действуют силы межмолекулярного взаимодействия.* Законы идеальных газов, применённые к реальным газам, выполняются очень приближённо. Отступления от них носят как количественный, так и качественный характер. Качественное отступление проявляется в том, что реальные газы могут быть переведены в жидкое и твёрдое состояние, а идеальные – нет. Количественное отступление заключается в том, что уравнение состояния  $pV = \nu RT$  соблюдается для реальных газов приближённо.

Во всех телах (твёрдых, жидких, газообразных) молекулы **взаимодействуют** друг с другом. Тот факт, что свойства разреженных газов близки к свойствам идеальных газов, говорит о том, что силы взаимодействия между молекулами зависят от расстояния между ними. Опыт показывает, что при расстояниях больше  $10^{-9}$  м межмолекулярным взаимодействием можно пренебречь.

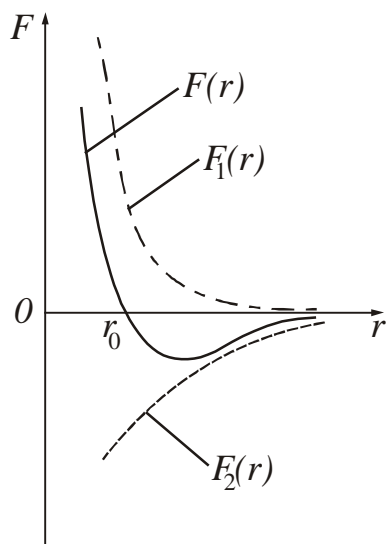


Рисунок 33.1

Способность твёрдых тел сопротивляться растяжению говорит о том, что между молекулами действуют силы **взаимного притяжения**. Малая сжимаемость сильно уплотнённых газов, а также способность твёрдых и жидких тел сопротивляться сжатию, указывают на то, что между молекулами также действуют силы **взаимного отталкивания**. Существенным является то, что **эти силы действуют одновременно**. Иначе тела не были бы устойчивыми: молекулы или разлетались бы в разные стороны, или «слипались» бы. На очень близких расстояниях преобладают силы отталкивания, на более далёких — силы взаимного притяжения. Примерный характер зависимости сил от расстояния  $r$  между взаимодействующими молекулами показан на рис. 33.1.

Силы отталкивания  $F_1(r)$  условно считать положительными, силы притяжения  $F_2(r)$  — отрицательными.  $F(r)$  — результирующая этих сил. Из графика видно, что существует некоторое расстояние  $r = r_0$ , при котором силы уравниваются друг друга, т.е.  $F_1 = F_2$ . При  $r < r_0$  преобладают силы отталкивания, при  $r > r_0$  — силы притяжения.

Силы межмолекулярного взаимодействия являются консервативными, поэтому молекулы обладают **взаимной потенциальной энергией**. График зависимости потенциальной энергии от расстояния для двух молекул представлен на рис. 33.2. Предполагается, что взаимная потенциальная энергия молекул, отстоящих друг от друга на бесконечно большом расстоянии, равна нулю. Расстоянию  $r_0$  соответствует минимум потенциальной энергии и равновесное состояние. На этом расстоянии располагались бы молекулы в отсутствие теплового движения т.е. при температуре  $T = 0$ . Величина  $\epsilon_{\text{пmin}}$  определяет абсолютную величину той работы, которую необходимо совершить против сил притяжения, чтобы молекулы из положения равновесия смогли удалиться на сколь угодно большие расстояния друг от друга.

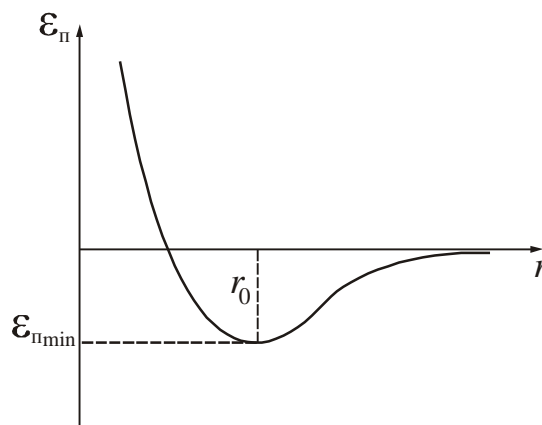


Рисунок 33.2

Величина минимальной потенциальной энергии взаимодействия молекул является критерием для различных агрегатных состояний вещества. Если выполняется условие  $|\epsilon_{\text{пmin}}| \ll kT$ , то вещество

находится в газообразном состоянии. При условии  $|\epsilon_{\text{п. min}}| \gg kT$  осуществляется твёрдое состояние. Условие  $|\epsilon_{\text{п. min}}| \approx kT$  соответствует жидкому состоянию. Напомним, что  $kT$  – это удвоенная средняя энергия, приходящаяся на одну степень теплового движения молекул (см. п. 27.1).

### 33.2 Уравнение Ван-дер-Ваальса

Из большого числа уравнений, предложенных для описания реальных газов, самым простым и вместе с тем дающим достаточно хорошие результаты, оказалось **уравнение Ван-дер-Ваальса\***. Это уравнение получено путём внесения поправок в уравнение состояния идеального газа и имеет следующий вид:

$$\left(p + \frac{m^2}{M^2} \frac{a}{V^2}\right) \left(V - \frac{m}{M} b\right) = \frac{m}{M} RT, \quad (33.1)$$

где  $p$  – давление, оказываемое на газ извне (равное давлению газа на стенки сосуда);  $a$  и  $b$  – поправки Ван-дер-Ваальса, имеющие для разных газов различные значения и определяемые опытным путём. Таким образом, поправки Ван-дер-Ваальса характеризуют индивидуальные особенности реальных газов.

$$[a] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}, \quad [b] = \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}.$$

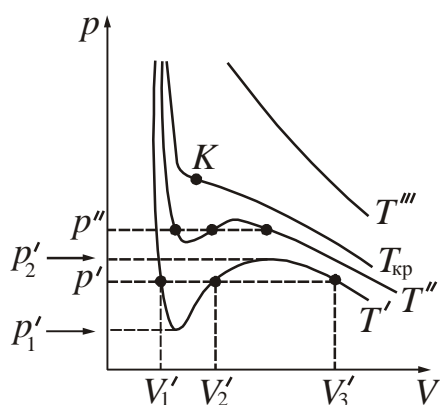


Рисунок 33.3

Поправка  $\frac{m^2}{M^2} \frac{a}{V^2}$  характеризует добавку к внешнему давлению, обусловленную взаимодействием между молекулами. Из-за притяжения молекул друг к другу газ как бы сжимает сам себя. Если бы взаимодействие между молекулами прекратилось, то для того, чтобы удержать газ в пределах того же объема, понадобилось бы увеличить внешнее давление на величину, равную этой поправке.

Поправка  $\frac{m}{M} b$  характеризует ту часть объёма,

которая недоступна для движения молекул, так как молекулы обладают собственными размерами. Можно показать, что эта поправка равна учетверённому объёму молекул, содержащихся в данном объёме  $V$ .

На рис. 33.3 представлены изотермы реального газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, при различных температурах:  $T' < T'' < T_{\text{кр}} < T'''$ .

\*Ван-дер-Ваальс Иоханнес Дидерик (1837–1923), нидерландский физик, лауреат Нобелевской премии 1910 г.

При температуре  $T'$  и давлениях в пределах от  $p'_1$  до  $p'_2$  уравнение (33.1) имеет три вещественных корня:  $V'_1$ ,  $V'_2$ ,  $V'_3$ . При повышении температуры (сравните изотермы  $T'$  и  $T''$ ) различие между корнями уменьшается.

При некоторой температуре  $T_{\text{кр}}$  все три точки, соответствующие решению уравнения (33.1), сливаются в одну точку К. Точка К называется **критической**. Соответствующие критической точке температура  $T_{\text{кр}}$ , давление  $p_{\text{кр}}$ , объём  $V_{\text{кр}}$  называются **критическими параметрами**. По известным поправкам Ван-дер-Ваальса  $a$  и  $b$  можно рассчитать значения критических параметров:

$$T_{\text{кр}} = \frac{8}{27} \frac{a}{bR} \quad (33.2)$$

$$p_{\text{кр}} = \frac{1}{27} \frac{a}{b^2} \quad (33.3)$$

$$V_{\text{кр}} = 3b \quad (33.4)$$

Изотерма, снятая при  $T_{\text{кр}}$  называется критической изотермой.

### 33.3 Экспериментальные изотермы

Первые экспериментальные изотермы были получены Эндрюсом\*. Он исследовал зависимость объёма одного моля углекислого газа от давления. В результате эксперимента была получена кривая, изображённая на рис. 33.4. Вначале с уменьшением объёма давление газа растёт, подчиняясь уравнению Ван-дер-Ваальса. Начиная с объёма  $V_{\text{Г}}$ , изотерма перестаёт следовать уравнению (33.1): давление перестаёт расти с уменьшением объёма (горизонтальный участок изотермы). Само вещество при этом перестаёт быть однородным: часть газа конденсируется в жидкость. Иначе говоря, вещество расплоилось на две фазы: жидкую и газообразную. **Фазой** в термодинамике называют часть системы, обладающей одинаковым химическим составом и находящуюся в одном состоянии.

По мере уменьшения давления всё большая часть вещества переходит в жидкую фазу. Давление при этом не изменяется и равно  $p_{\text{н.п.}}$ . При достижении объёма  $V_{\text{ж}}$  конденсация заканчивается. Дальнейшее уменьшение объёма приводит к резкому росту давления. Ход изотермы на этом участке соответствует уравнению (33.1). Вещество на этом участке будет однородным, но это уже не газ, а жидкость.

Сопоставление экспериментальной изотермы с изотермой Ван-дер-Ваальса показывает, что они хорошо совпадают на участках, которые отвечают однофазным состояниям вещества и не совпадают на участке двухфазного состояния.

В состояниях, соответствующих горизонтальному участку изотермы, наблюдается равновесие между жидкой и газообразной фазой вещества. Газ (пар), находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным паром**. Давление  $p_{\text{н.п.}}$ , при котором существует равновесие при данной температуре, называется давлением насыщенного пара.

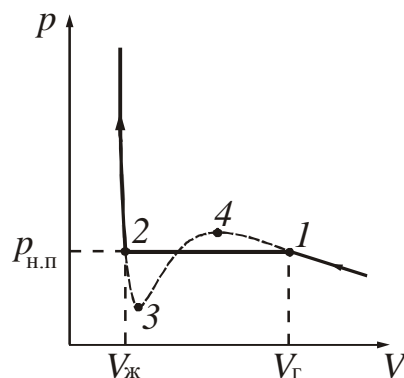


Рисунок 33.4

\*Эндрюс Томас (1813–1885), шотландский химик и физик.



$V_{\Gamma}$  – это объём, занимаемый газом,  $V_{\text{ж}}$  – это объём, занимаемый жидкостью.

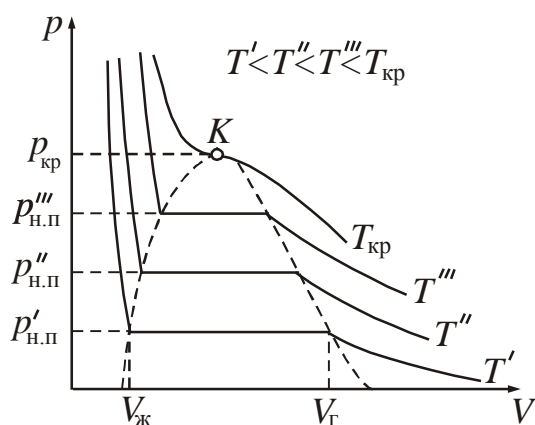


Рисунок 33.5

На рис. 33.5 приведены экспериментальные изотермы для нескольких температур. С повышением температуры горизонтальные участки уменьшаются. Это означает, что уменьшается разница между объёмами  $V_{\Gamma}$  и  $V_{\text{ж}}$ . При критической температуре  $T_{\text{кр}}$  горизонтальный участок стягивается в точку. Это означает, что исчезает всякое различие между жидкостью и паром. При температуре выше критической понятие насыщенного пара теряет смысл.

Если соединить крайние точки горизонтальных участков изотермы, то получится кривая, которая делит диаграмму  $pV$  на три части (рис. 33.6). Левая часть (ж) кривой соответствует жидкому состоянию,

правая часть (п) – парообразному. Область под кривой (ж-п) соответствует двухфазному состоянию жидкость – пар. Любое состояние в области (п) отличается от остальных газообразных состояний тем, что при изотермическом сжатии вещество, находящееся в этом состоянии, сжижается. Если вещество находится в одном из состояний при температуре выше критической, то оно не может быть сжато никаким сжатием (область г). Отметим, что разделение газообразного состояния на газ и пар не является общепринятым.

Обратимся ещё раз к рис. 33.4. Волнообразный участок изотермы Ван-дер-Ваальса более точно описывает переход вещества из газообразного состояния в жидкое, чем горизонтальные участки экспериментальных изотерм. Состояния, соответствующие участкам 2-3 и 1-4 могут реализоваться, но только при определенных условиях, так как они являются неустойчивыми (метастабильными). Участок 1-4 соответствует состоянию **пересыщенного пара**, возникающего при медленном изотермическом сжатии в отсутствие центров конденсации. Если такие центры (пылинки, ионы) вводятся в пересыщенный пар, то происходит быстрая конденсация.

Участок 2 - 3 соответствует **перегретой жидкости**, которую можно получить, если задержать начало кипения в точке 2. На участке 3-4 с ростом давления растёт объём. Такие состояния вещества невозможны.

Таким образом, уравнение Ван-дер-Ваальса описывает не только газообразное состояние вещества, но и процесс перехода в жидкое состояние, и процесс сжатия жидкости.

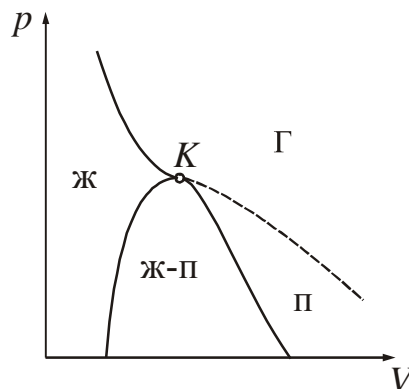


Рисунок 33.6

### • Давайте подумаем!

**33.1.** Критическая температура углекислого газа равна  $31^{\circ}\text{C}$ . Как осуществить его сжижение?

**33.2.** Не прибегая к помощи таблиц, скажите: выше или ниже «комнатной» критическая температура воды?

**33.3.** В 19-м столетии над вопросом обращения газов в жидкое состояние работали английский учёный Фарадей и немецкий учёный Неттерер. Ни тот ни другой не смогли обратить в жидкость ряд газов, в том числе водород, кислород и азот, хотя сжимали их, доводя давление до 300 МПа, и охлаждали до  $-100^{\circ}\text{C}$ .



Фарадей предполагал, что для их сжижения необходимо добиться более сильного охлаждения. Неттерер же полагал, что причиной неудачи является невозможность создать более высокие давления. Кто из них оказался прав? Критические температуры перечисленных газов соответственно равны 33 К, 154 К, 126 К.

**33.4.** Газ превращается в жидкость, если его сжать и понизить температуру. Почему же при расширении газа в пустоту он может также превратиться в жидкость?

## §34 Жидкое состояние

### 34.1 Строение жидкостей

*Жидкость – агрегатное состояние вещества, промежуточное между газообразным и твёрдым*, поэтому она имеет свойства газообразных и твёрдых веществ. Как и твёрдые тела жидкости имеют определённый объём, а подобно газам, принимают форму сосуда, в котором находятся.

Исследования жидкостей при помощи рентгеновских лучей и другие экспериментальные данные показали наличие определённого порядка в размещении частиц – молекулы жидкости образуют нечто подобное кристаллической решетке (особенно при температурах, близких к точке отвердевания). В отличие от кристаллов в жидкостях этот порядок распространяется не на весь объём, а ограничивается областью, включающей несколько частиц вокруг данной. Поэтому говорят о ближнем порядке в расположении частиц жидкости и считают, что по структуре жидкости ближе к твёрдым телам, чем к газам.

Каждая молекула жидкости длительное время колеблется около определённого положения равновесия. Время от времени она изменяет это положение, перемещаясь на расстояние порядка размеров самих молекул. Этим объясняется текучесть жидкостей. Время колебаний молекулы вокруг положения равновесия называют *временем её оседлой жизни*. Оно зависит от рода жидкости и температуры. С повышением температуры частота скачкообразных перемещений возрастает, и время оседлой жизни становится меньше. Вследствие этого вязкость жидкостей уменьшается.

Существуют твёрдые тела, которые по своим свойствам оказываются ближе к жидкостям, чем к кристаллам. Их называют *аморфными*. Переход от аморфного твёрдого тела к жидкости осуществляется непрерывно, а переход от кристалла к жидкости – скачком. Это значит, что кристаллы имеют фиксированную температуру плавления, а аморфные плавятся в определённом интервале температур. Аморфные твёрдые тела рассматриваются как переохлаждённые жидкости, частицы которых имеют ограниченную подвижность. К числу аморфных тел относят стекло, смолы, битумы и т.п.

Жидкие кристаллы – это жидкости, обладающие анизотропией свойств (в частности, оптической), связанной с упорядоченностью в ориентации молекул. Благодаря сильной зависимости свойств жидких кристаллов от внешних воздействий они находят разнообразное применение в технике, например в системах обработки и отображения информации, в которых используются электрооптические свойства жидких кристаллов. Они применяются также

в буквенно-цифровых индикаторах (электронные часы, микрокалькуляторы), в различного рода управляемых экранах, пространственно-временных транспарантах, в оптоэлектронных приборах, в оптических затворах и других светоклапанных устройствах. На основе жидких кристаллов разработаны плоские экраны телевизоров, мониторов. Свойство жидких кристаллов изменять цвет при изменении температуры используется в медицине (для определения участков тела с повышенной температурой) и в технике (визуализация инфракрасного излучения, контроль качества микросхем и т. д.).

### 34.2 Поверхностное натяжение

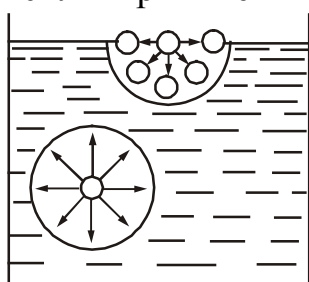


Рисунок 34.1

Молекулы жидкости располагаются очень близко друг к другу, поэтому силы притяжения достигают значительной величины. Каждая молекула испытывает притяжение со стороны соседних с ней молекул. Если молекула находится внутри жидкости (рис. 34.1), то равнодействующая сил, действующих на неё, равна нулю. Иначе обстоит дело, если молекула находится в поверхностном слое жидкости. Плотность пара (или газа), с которым граничит жидкость, во много раз меньше плотности жидкости, поэтому равнодействующая сил, действующих со стороны молекул пара, тоже будет намного меньше, чем равнодействующая сил, действующих со стороны молекул жидкости. В результате, на каждую молекулу, находящуюся в приповерхностном слое будет действовать сила, направленная внутрь жидкости.

При переходе молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой над молекулой совершается действующими на неё в этом слое силами отрицательная работа. При этом кинетическая энергия молекулы уменьшается, превращаясь в потенциальную. Таким образом, молекулы в поверхностном слое обладают дополнительной потенциальной энергией. Поверхностный слой в целом обладает дополнительной энергией, которая входит составной частью во внутреннюю энергию жидкости.

Наличие этой дополнительной энергии приводит к тому, что жидкость стремится сократить свою поверхность. Жидкость ведёт себя так, как если бы она была заключена в упругую растянутую плёнку, стремящуюся сжаться. На самом деле никакой плёнки нет, поверхностный слой состоит из тех же молекул, что и вся жидкость.

Выделим мысленно на поверхности жидкости участок, ограниченный замкнутым контуром длиной  $l$ . Стремление этого участка к сокращению приводит к тому, что он будет действовать на остальную часть поверхности с касательными к поверхности силами. Эти силы называются **силами поверхностного натяжения**. Для количественной оценки силы поверхностного вводят величину, которую называют коэффициентом поверхностного натяжения (или поверхностным натяжением).

**Коэффициент поверхностного натяжения ( $\alpha$ )** – скалярная физическая величина, равная отношению модуля силы поверхностного натяжения  $F$ , действующей на границу поверхностного слоя длиной  $l$ , к этой длине:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \quad (34.1)$$

Для того чтобы изменить площадь поверхностного слоя при постоянной температуре на величину  $dS$ , надо совершить работу

$$\delta A = \alpha dS, \quad (34.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения.

При изменении площади от  $S_1$  до  $S_2$  работа будет соответственно равна:

$$A = \alpha(S_2 - S_1). \quad (34.3)$$

При совершении работы  $A$  энергия поверхностного слоя изменяется на величину  $\Delta W_{\text{пов}}$ :

$$A = \Delta W_{\text{пов}} = \alpha(S_2 - S_1) = \alpha \Delta S.$$

Отсюда:

$$\alpha = \frac{\Delta W_{\text{пов}}}{\Delta S}. \quad (34.4)$$

$$[\alpha] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Таким образом, можно дать ещё одно определение коэффициента поверхностного натяжения.

**Коэффициент поверхностного натяжения – скалярная физическая величина, равная отношению изменения потенциальной энергии поверхностного слоя к изменению площади поверхности этого слоя.**

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от химического состава жидкости и от её температуры. С увеличением температуры  $\alpha$  уменьшается и обращается в нуль при критической температуре.

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Плавание лезвия: Сталь плавает в воде.

<http://www.youtube.com/watch?v=pNRaYTKNxJs>

2. Парафиновый шар в воде: плавание в воде.

<http://www.youtube.com/watch?v=B9SQk3w2WX0>

3. Парафиновый шар в воде: подъём из под воды.

<http://www.youtube.com/watch?v=DJTcmChh6OM>

Поверхностное натяжение существенно зависит от примесей, имеющих в жидкостях. Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение жидкости, называются **поверхностно-активными веществами** (ПАВ). Наиболее известным поверхностно-активным веществом относительно воды является мыло. Оно значительно уменьшает её поверхностное натяжение (примерно с  $7,5 \cdot 10^{-2}$  до  $4,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м). Относительно воды поверхностно-активными являются эфиры, спирты, нефть т. д. С молекулярной точки зрения влияние поверхностно-активных веществ объясняется тем, что силы притяжения между молекулами жидкости больше, чем силы притяжения между молекулами жидкости и примеси. Молекулы жидкости в поверхностном слое с большей силой втягиваются внутрь жидкостей, чем молекулы примеси. В результате этого молекулы жидкости переходят с поверхностного слоя вглубь её, а молекулы поверхностно-активного вещества вытесняются на поверхность.

Поверхностно-активные вещества применяются в качестве смачивателей, флотационных реагентов, пенообразователей, диспергаторов – понизителей твёрдости, пластифицирующих добавок, модификаторов кристаллизации и др.

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Опыт с ликоподием: с каплей мыльной воды.

<http://www.youtube.com/watch?v=PyuOM1eHC80>

2. Опыт с ликоподием: с парами эфира.

<http://www.youtube.com/watch?v=CdL4NcRvnH0>

## 34.3 Смачивание

Твёрдые тела, также как и жидкости обладают поверхностным натяжением. При рассмотрении явлений на границе раздела различных сред надо иметь в виду, что поверхностная энергия жидкости или твёрдого тела зависит не только от свойств данной жидкости или данного твёрдого тела, но и от свойств того вещества, с которым они граничат.

Если граничат друг с другом сразу три вещества: твёрдое, жидкое и газообразное, то вся система принимает конфигурацию, соответствующую минимуму суммарной потенциальной энергии. Это приводит к тому, что свободная поверхность жидкости искривляется на границе с твёрдым телом, и наблюдаются явления **смачивания** или **несмачивания** твёрдого тела жидкостью. Свободная поверхность жидкости, искривлённая около стенок сосуда, называется **мениском**. Для характеристики мениска вводится **краевой угол**  $\theta$  между смоченной поверхностью стенки и мениском в точке их пересечения (рис. 34.2).

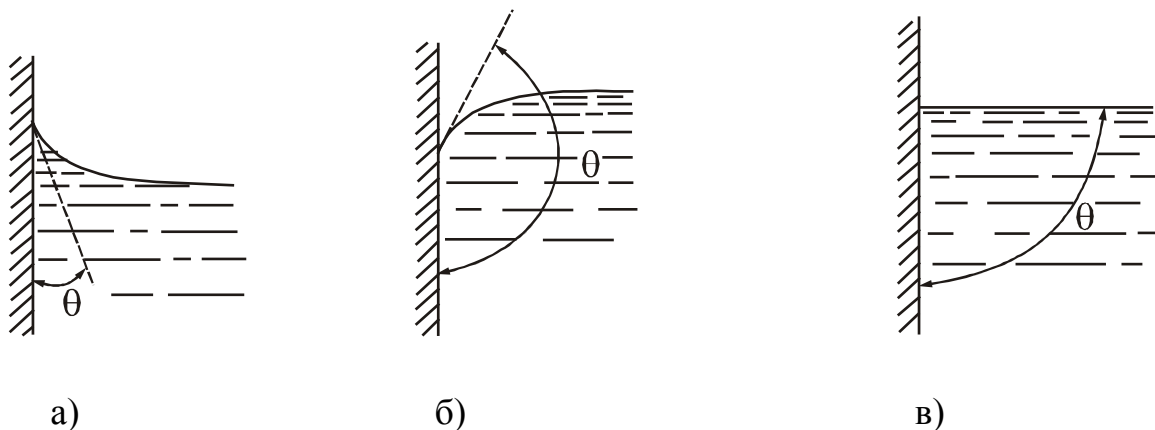


Рисунок 34.2

Если  $\theta < \frac{\pi}{2}$  (см. рис. 34.2 а), то жидкость считается смачивающей стенку, если  $\theta > \frac{\pi}{2}$  (рис. 34.2 б), то жидкость не смачивает стенку.

Смачивание (несмачивание) считается идеальным, если  $\theta = 0$  ( $\theta = \pi$ ). Отсутствию смачивания и несмачивания соответствует условие  $\theta = \frac{\pi}{2}$  (рис. 34.2 в).

Смачивание жидкостью твёрдого тела объясняется тем, что взаимодействие между молекулами жидкости и твёрдого тела сильнее, чем взаимодействие между частицами жидкости. Когда жидкость не смачивает твёрдое тело, взаимное притяжение её молекул больше, чем притяжение их к молекулам твёрдого тела.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Капля воды и ртути. Капля воды на стекле (смачивание). Капля воды на парафине (несмачивание). Капля ртути (несмачивание).

<http://www.youtube.com/watch?v=ThuX4xnjziY>

Явление смачивания имеет большое практическое значение. В частности его используют для склеивания, пайки, окрашивания тел, смазки трущихся поверхностей и т.д. При механической обработке металлов, бурении скважин в горных породах их смачивают специальными жидкостями, что облегчает и ускоряет их обработку.

Особенно широко применяется явление смачивания во флотационных процессах (обогащении руд ценной породой). В основу этих процессов положено изменение поверхностного натяжения жидкости различными примесями и неодинаковое смачивание ею разных твёрдых тел. Практически флотацию осуществляют так: горную породу, состоящую из крупиц руды ценного металла и пустой породы, измельчают в порошок с размером частиц 0,1 – 0,001 мм. Этот порошок взбалтывают с водой, в которую добавляют немного масла. При этом образуется пена: пузырьки воздуха, окружённые пленкой масла, легко прилипают к смоченным маслом крупинкам металлической руды, поднимая их вверх. Кусочки пустой породы, смоченные водой, оседают на дно отстойника. В результате руда металла отделяется от пустой породы.

Если извлекается несколько металлов из смеси руд, то, пользуясь флотацией, сначала отделяют руды от горной породы, а затем отделяют руду одного металла от другого. Для этого вводят в ванну такие поверхностно-активные вещества, которые изменяют силу поверхностного натяжения жидкости в ней так, чтобы как можно большее количество пузырьков воздуха прилипло к крупинкам руды одного металла, по сравнению с другим. Поэтому первые из них всплывают, а другие – тонут.

### 34.4 Капиллярные явления

Существование краевого угла приводит к тому, что в узкой трубке (*капилляре*) или в узком зазоре между двумя стенками искривляется вся свободная поверхность жидкости. Если капилляр погрузить одним концом в жидкость, налитую в широкий сосуд, то под искривлённой поверхностью в капилляре давление будет отличаться от давления под плоской поверхностью в сосуде. В результате при смачивании капилляра уровень жидкости в нём будет выше, чем в сосуде, при несмачивании – ниже (рис. 34.3).

Разность уровней  $h$  будет зависеть от радиуса капилляра и рода жидкости:

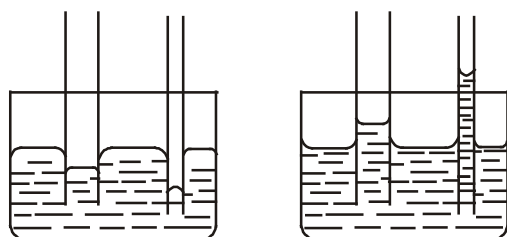


Рисунок 34.3

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}, \quad (34.1)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $\theta$  – краевой угол;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения.

**Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Вода в сообщающихся капиллярах.

<http://www.youtube.com/watch?v=bvzlsqtA3vo>

2. Вода в капиллярах разного диаметра. Подъём воды в капиллярах.

<http://www.youtube.com/watch?v=1AS4p3okcFI>

Капиллярность очень распространена в природе, технике, в быту и играет большую роль в разнообразных процессах. Поступление полезных веществ из почвы в растения происходит в основном благодаря капиллярности, так как ткани растений пронизаны огромным количеством узких каналов. Поднятие влаги с глубоких слоев почвы также обуславливается капиллярностью. Для сохранения в земле влаги капилляры следует разрушать, что достигается рыхлением почвы. Для усиления поступления влаги к поверхности почву укатывают, увеличивая этим количество капиллярных каналов.

В строительной практике приходится учитывать возможность поднятия влаги капиллярными порами строительных материалов. Даже кирпич и бетон имеют широко разветвленную систему капилляров, по которым вода может подняться на значительную высоту, увлажняя стены зданий. Для защиты стен и фундаментов необходимо применять гидроизоляцию.

В быту применение полотенец, салфеток, ваты, марли, промокательной бумаги возможно только благодаря капиллярности.

• **Давайте подумаем!**

**34.1.** Почему газ занимает весь предоставленный ему объём, а жидкость нет?

**34.2.** Почему две капельки ртути, приведённые в соприкосновение, сливаются в одну?

**34.3.** Почему расплавленный жир плавает на поверхности воды в виде кружков?

**34.4.** Больному прописано на приём определённое число капель лекарства. В какую сторону следует изменить число капель (увеличить или уменьшить), если капли отсчитывают в жарко натопленном помещении?

**34.5.** Почему алюминий не удастся паять оловянным припоем?

**34.6.** Почему плохо вытираются мокрые руки шерстяной или шелковой тканью?

**34.7.** На каком физическом явлении основано употребление полотенец?

**34.8.** Почему, прежде чем покрыть штукатурку масляной краской, предварительно производят грунтовку олифой?

**34.9.** Две смоченные водой и сложенные вместе стеклянные пластинки трудно разделить, пока они находятся на воздухе. Однако они разделяются без всяких усилий, если их опустить в воду. Объясните, почему так происходит?

• **Обратите внимание!**

*Различайте следующие, близкие по звучанию, термины:*

**Вероятность термодинамическая** – число различных способов, которыми реализуется данное состояние. Выражается целым, как правило, очень большим числом.

**Вероятность математическая** – численная мера объективной возможности появления того или иного события. Выражается дробным числом, заключённым в интервале от 0 до 1.

- Изучив раздел «Молекулярная физика и термодинамика», студент должен **ЗНАТЬ**:

***Суть понятий:***

Макросистема, параметры состояния, термодинамическая система, статистическая система. Идеальный газ, реальный газ. Равновесное и неравновесное состояния, термодинамический процесс, обратимый и необратимый процесс, изопроцесс, цикл. Число степеней свободы. Теплообмен. Абсолютный нуль температуры.

***Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:***

Относительная атомная масса, относительная молекулярная масса, молярная масса, количество вещества, эффективный диаметр молекулы. Давление, объём, термодинамическая температура. Теплоёмкость, внутренняя энергия, количество тепла. Энтропия. Коэффициент поверхностного натяжения.

***Уравнения:***

Уравнение состояния идеального газа (Менделеева – Клапейрона), основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Уравнения изотермического, изохорного, изобарного, адиабатного процессов. Уравнение Майера. Уравнение Ван-дер-Ваальса для реального газа.

***Законы:***

Закон Дальтона. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы. Первое начало термодинамики, второе начало термодинамики. Закон Фурье для теплопроводности. Закон Фика для диффузии. Закон Ньютона для внутреннего трения.

***Распределения:***

Распределение Максвелла по модулю скоростей. Распределение Больцмана по значениям потенциальной энергии.

***Явления:***

Диффузия, теплопроводность, внутреннее трение. Смачивание, несмачивание. Капиллярные явления.

***Формулы:***

Расчёт средней арифметической, наиболее вероятной, среднеквадратичной скоростей; барометрическая формула Лапласа.

Работа, совершаемая в изопроцессах; внутренняя энергия, коэффициент полезного действия тепловой машины.

Средняя длина свободного пробега, коэффициенты диффузии, теплопроводности, внутреннего трения.

***Графики:***

Распределения Максвелла и Больцмана, изопроцессы, цикл Карно. Зависимость сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами, экспериментальные изотермы Эндрюса.



## ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»

**Инструкция.** Данный тест предназначен для проверки знаний по теме “Молекулярная физика и термодинамика”. Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 41-50 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
  - 2) 31-40 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
  - 3) 20-30 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
  - 4) меньше 20 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте его ещё раз.

1. Укажите формулу, по которой можно подсчитать общее количество молекул газа в сосуде.

$$1. N = \frac{p}{kT} \quad 2. N = \frac{m}{M} N_A \quad 3. N = n \frac{m}{M} \quad 4. N = \frac{m}{M}$$

2. Какими эффектами в газе нужно пренебречь, чтобы газ считать идеальным?

1. Размерами молекул.
2. Взаимодействием молекул при столкновении.
3. Взаимодействием молекул на расстоянии.
4. Столкновениями молекул.
5. Массами молекул.

3. Параметрами состояния макросистемы являются ...

- 1) температура.
- 2) давление.
- 3) число степеней свободы молекулы.
- 4) энтропия.

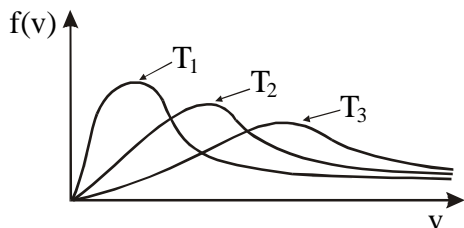
4. Укажите формулу, которая представляет собой уравнение состояния идеального газа.

$$1. p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}} \quad 2. pV = \frac{m}{M} RT \quad 3. p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle \quad 4. p = \frac{2}{3} n \langle \epsilon \rangle$$

5. Укажите формулу, которая выражает основное уравнение кинетической теории газов (уравнение Клаузиуса).

$$1. p = nkT \quad 2. pV = \frac{m}{M} RT \quad 3. p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle \quad 4. p = \frac{2}{3} n \langle \epsilon \rangle$$

6. Каково соотношение температур газа, график распределения молекул по скоростям для которых имеет вид, представленный на рисунке?



1.  $T_1 < T_2 < T_3$
2.  $T_1 > T_2 > T_3$
3.  $T_1 > T_3 > T_2$
4.  $T_2 > T_1 > T_3$

7. Укажите формулу, которая описывает распределение молекул газа по модулю скоростей.



$$1. p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}} \quad 2. f(v) = A v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \quad 3. n = n_0 e^{-\frac{\varepsilon_{\text{п}}}{kT}} \quad 4. W_k = \frac{m_0 v^2}{2}$$

8. Температура газа повысилась в 4 раза. Как изменяется величина наиболее вероятной скорости молекул?

1. Уменьшится в 2 раза.
2. Останется неизменной.
3. Увеличится в 2 раза.
4. Увеличится в 4 раза.

9. Укажите формулы, которые выражают зависимость давления газа от высоты в поле тяготения Земли.

( $m_0$  – масса молекулы,  $M$  – молярная масса,  $\rho$  – плотность газа)

$$1. p = p_0 e^{-\frac{\rho g h}{RT}} \quad 2. p = p_0 e^{-\frac{M g h}{RT}} \quad 3. p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}} \quad 4. p = p_0 e^{-\frac{M g h}{RT}}$$

10. Укажите формулы, которые описывают распределение молекул газа по высоте в поле тяготения Земли.

$$1. p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}} \quad 2. f(v) = A v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \quad 3. W = m g h \quad 4. n = n_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}$$

11. Какой смысл имеет величина  $\varepsilon_{\text{п}}$  в формуле  $n = n_0 e^{-\frac{\varepsilon_{\text{п}}}{kT}}$  для случая распределения молекул в силовом поле?

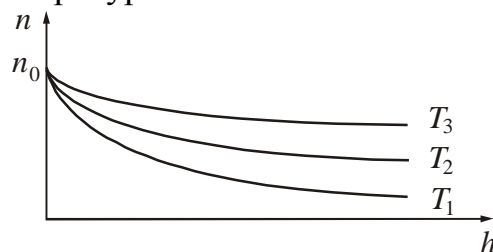
1. Потенциальная энергия одной молекулы.
2. Средняя кинетическая энергия хаотического движения одной молекулы.
3. Потенциальная энергия всех молекул в единице объёма.
4. Потенциальная энергия взаимодействия молекул между собой.

12. В состав внутренней энергии системы входят ...

- 1) кинетическая энергия движения системы как целого.
- 2) потенциальная энергия взаимодействия молекул и атомов системы.
- 3) потенциальная энергия системы во внешних полях.
- 4) кинетическая энергия хаотического движения молекул и атомов системы.

13. На рисунке приведены графики зависимости концентрации молекул газа в поле тяготения от высоты при различных температурах. Каково соотношение между температурами газа?

1.  $T_3 < T_2 < T_1$
2.  $T_1 < T_2 < T_3$
3.  $T_3 > T_1 > T_2$
4.  $T_3 < T_1 < T_2$



14. Температурой тела называется ...

- 1) величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.
- 2) мера средней кинетической энергии хаотического движения молекул.
- 3) характеристика агрегатного состояния вещества.
- 4) мера числа столкновений молекул.
- 5) мера внутренней энергии вещества.

15. Газ нагревают при постоянном давлении. Как изменяется плотность газа с изменением температуры?
1. Пропорционально  $\sqrt{T}$ .
  2. Пропорционально  $T$ .
  3. Обратно пропорционально  $T$ .
  4. Не изменяется.
16. Укажите формулу для вычисления внутренней энергии идеального газа.
1.  $U = m \frac{i}{2} RT$
  2.  $U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT$
  3.  $U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} N_A T$
  4.  $U = \frac{m}{M} N_A k T$
17. Как зависит внутренняя энергия идеального газа от температуры?
1.  $U \sim T$
  2.  $U \sim \sqrt{T}$
  3.  $U \sim T^2$
  4.  $U \sim \frac{1}{T}$
18. Функцией состояния системы являются ...
- 1) совершенная работа.
  - 2) внутренняя энергия.
  - 3) энтропия.
  - 4) количество тепла.
  - 5) давление.
19. Количеством тепла называется ...
- 1) мера энергии, переданной телу при теплопередаче.
  - 2) энергия тела за вычетом кинетической энергии тела как целого и потенциальной энергии тела во внешнем силовом поле.
  - 3) степень нагретости тела.
  - 4) количество энергии, переданное одним телом другому.
20. Укажите одну из формулировок первого начала термодинамики.
1. Энтропия замкнутой системы не может убывать.
  2. Невозможен вечный двигатель второго рода, т.е. такой периодически действующий двигатель, который получал бы тепло от одного резервуара и превращал это тепло полностью в работу.
  3. Невозможен процесс, единственным конечным результатом которого была бы совершённая работа за счёт получения количества тепла.
  4. Количество тепла, сообщённое системе, идёт на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы над внешними телами.
21. Укажите формулу, которая является математическим выражением первого начала термодинамики.
1.  $S = k \log W$
  2.  $Q = \Delta U + A$
  3.  $dS = \frac{\delta Q}{T}$
  4.  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$
22. Молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме равна ...
1.  $C_V = \frac{i}{2} R$
  2.  $C_V = \frac{i+2}{i} R$
  3.  $C_V = \frac{i+2}{2} R$
  4.  $C_V = 0$
23. Молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном давлении равна ...
1.  $C_P = \frac{i}{2} R$
  2.  $C_P = \frac{i+2}{2} R$
  3.  $C_P = \frac{i+2}{i} R$
  4.  $C_P = 0$
24. Уравнением Майера называют соотношение ...
1.  $C_P - C_V = R$
  2.  $Q = \Delta U + A$
  3.  $C_P = \frac{i+2}{2} \cdot R$
  4.  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$

25. Укажите формулу, которая связывает энтропию с термодинамической вероятностью.

$$1. S = k \log W \quad 2. S = \frac{N!}{n!(N-n)!} \quad 3. dS = \frac{\delta Q}{T} \quad 4. S = \frac{1}{W}$$

26. Для какого из процессов при  $m = \text{const}$  выполняется равенство  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ?

1. Изобарного      2. Адиабатного      3. Изотермического      4. Изохорного

27. Для какого из процессов при  $m = \text{const}$  выполняется равенство  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ ?

1. Изотермического      2. Адиабатного      3. Изохорного      4. Изобарного

28. Для какого из процессов при  $m = \text{const}$  выполняется равенство  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ?

1. Изотермического      2. Адиабатного      3. Изохорного      4. Изобарного

29. Для какого из процессов при  $m = \text{const}$  выполняется равенство  $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$ ?

1. Изотермического      2. Адиабатного      3. Изохорного      4. Изобарного

30. Работа, совершаемая газом при изобарном процессе равна ...

$$1) A = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad 2) A = 0 \quad 3) A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) \quad 4) A = p(V_2 - V_1)$$

31. Работа, совершаемая газом при изохорном процессе равна ...

$$1) A = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad 2) A = 0 \quad 3) A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) \quad 4) A = p(V_2 - V_1)$$

32. Работа, совершаемая газом при изотермическом процессе равна ...

$$1) A = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad 2) A = 0 \quad 3) A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) \quad 4) A = p(V_2 - V_1)$$

33. Работа, совершаемая газом при адиабатном процессе равна ...

$$1) A = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad 2) A = 0 \quad 3) A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) \quad 4) A = p(V_2 - V_1)$$

34. Адиабатным процессом называют процесс, ...

- 1) происходящий при постоянном объёме.
- 2) происходящий при постоянном давлении.
- 3) происходящий при постоянной температуре.
- 4) происходящий без теплообмена с окружающей средой.
- 5) в результате которого система возвращается в исходное состояние.

35. Происходит адиабатное расширение газа. Как изменяются при этом внутренняя энергия и температура? Какая работа совершается при этом (положительная или отрицательная)?

$$\begin{array}{lll} 1. U \uparrow T \uparrow A < 0 & 2. U \downarrow T \uparrow A < 0 & \uparrow - \text{увеличивается} \\ 3. U \downarrow T \downarrow A > 0 & 4. U \uparrow T \downarrow A < 0 & \downarrow - \text{уменьшается} \end{array}$$

36. Укажите одну из формулировок второго начала термодинамики.

1. Количество тепла, подведённое к системе, идёт на изменение её внутренней энергии и совершение работы над внешними телами.
2. Невозможен процесс, единственным конечным результатом которого была бы передача тепла от менее нагретого тела к более нагретому.
3. Средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы, не зависит от вида степени свободы.
4. Невозможен процесс, единственным конечным результатом которого была бы передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому телу.
5. Невозможен вечный двигатель первого рода.

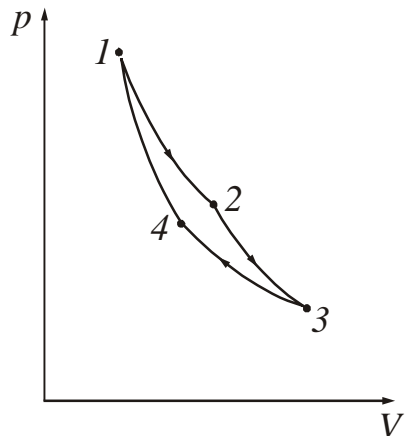
37. Укажите формулу, которая определяет КПД любой тепловой машины (в том числе с необратимым циклом).

1.  $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$
2.  $\eta = \frac{Q_2}{Q_1}$
3.  $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$
4.  $\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$

38. КПД обратимой тепловой машины зависит от ...

- 1) химической природы рабочего вещества.
- 2) конструкции машины.
- 3) температуры нагревателя и холодильника (теплоприемника).

39. На каком из участков цикла Карно рабочее тело получает от нагревателя (теплоотдатчика) тепло?



1. Участок 1-2
2. Участок 2-3
3. Участок 3-4
4. Участок 4-1

40. На каком из участков цикла Карно рабочее тело отдаёт холодильнику (теплоприемнику) тепло?

1. Участок 2-3
2. Участок 3-4
3. Участок 4-1
4. Участок 1-2

41. Укажите, какая физическая величина «переносится» при теплопроводности.

1. Кинетическая энергия молекул.
2. Масса.
3. Импульс хаотически движущихся молекул.
4. Импульс направленно движущихся молекул.

42. Укажите, какая физическая величина «переносится» при внутреннем трении.

1. Кинетическая энергия молекул.
2. Масса.
3. Импульс хаотически движущихся молекул.
4. Импульс направленно движущихся молекул.

43. Укажите, какая физическая величина «переносится» при диффузии.

1. Кинетическая энергия молекул.
2. Масса.
3. Импульс хаотически движущихся молекул.
4. Импульс направленно движущихся молекул.

44. Укажите основное уравнение, описывающее процесс теплопроводности.

- |  |   |
|--|---|
| 1. $dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS_{\perp} dt$    | 2. $dp = -\eta \frac{dv}{dx} dS_{\perp} dt$                             |
| 3. $\delta Q = -K \frac{dT}{dx} dS_{\perp} dt$ | 4. $K = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho C_V$ |

45. Укажите основное уравнение, описывающее процесс диффузии.

- |  |  |
|--|--|
| 1. $dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS_{\perp} dt$    | 2. $dp = -\eta \frac{dv}{dx} dS_{\perp} dt$                    |
| 3. $\delta Q = -K \frac{dT}{dx} dS_{\perp} dt$ | 4. $D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle$ |

46. Укажите основное уравнение, описывающее процесс внутреннего трения.

- |  |  |
|--|--|
| 1. $dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS_{\perp} dt$    | 2. $dp = -\eta \frac{dv}{dx} dS_{\perp} dt$                            |
| 3. $\delta Q = -K \frac{dT}{dx} dS_{\perp} dt$ | 4. $\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho$ |

47. Причиной процесса диффузии является ...

- 1) неоднородность плотности.
- 2) неоднородность температуры.
- 3) неоднородность скорости упорядоченного движения молекул.
- 4) неоднородность скорости хаотического движения молекул.

48. Причиной процесса теплопроводности является ...

- 1) неоднородность плотности.
- 2) неоднородность температуры.
- 3) неоднородность скорости упорядоченного движения молекул.
- 4) неоднородность скорости хаотического движения молекул.

49. Причиной процесса внутреннего трения является ...

- 1) неоднородность температуры.
- 2) неоднородность скорости упорядоченного движения молекул.
- 3) неоднородность скорости хаотического движения молекул.
- 4) неоднородность плотности.

50. Вакуумом называется ...

- 1) пространство, в котором нет молекул.
- 2) состояние газа, при котором средняя длина свободного пробега молекул соизмерима с размерами сосуда.
- 3) состояние газа, при котором отсутствует взаимодействие молекул.
- 4) состояние газа при давлении менее 133,3 Па (1 мм. рт. ст.).

### Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!»

**13.1.** Равнодействующая сил, с которыми молекулы среды действуют со всех сторон на взвешенную частицу, весьма мала, и её действие будет тем заметнее, чем меньше масса частицы.

**15.1.** Если человек стоит, то сила, с которой он действует на матрац, распределяется на меньшую площадь (площадь ступней). Если он ляжет, то эта же сила будет распределяться на площадь его тела. В первом случае человек оказывает большее давление. Следовательно, состояние равновесия наступит в первом случае при большем давлении воздуха в матраце, чем во втором.

**15.2.** При исчезновении притяжения между молекулами давление должно увеличиться.

**15.3.** Понятия тёплого и холодного условны. Когда мы моем руки водой комнатной температуры, она кажется нам холодной. Если той же водой мыть руки после того, как мы побудем на морозе без перчаток, то вода покажется нам тёплой. Значит, наше суждение о том, что вода холодная или тёплая, вытекает из сравнения её с температурой наших рук. Иначе говоря, ощущение тепла и холода связано с разностью температур, а не с их абсолютными значениями. Таким образом, наше субъективное определение предмета, как более горячего, не обязательно связано с его более высокой температурой как с объективной мерой его теплового состояния.

**16.1.** С точки зрения молекулярно-кинетической теории идеальным считается газ, потенциальной энергией притяжения молекул которого можно пренебречь. Сами молекулы идеального газа могут быть приняты за материальные точки, так что собственным объёмом молекул можно пренебречь.

С точки зрения макроскопических параметров идеальным может считаться газ при высокой температуре и низком давлении.

**16.2.** В безветренную погоду над участками влажной и сухой почвы должны быть одинаковыми суммарные давления смеси водяного пара и газов, входящих в состав воздуха. Но над участком влажной почвы парциальное давление водяного пара будет повышенным. Следовательно, по закону Дальтона давление азота и кислорода должно быть несколько меньше, чем над сухим участком.

**17.1.** Давление газа на поверхность определяется суммарным импульсом, передаваемым молекулами за 1 с единице площади поверхности.

**18.1.** С точки зрения молекулярно-кинетической теории температуру можно понимать как меру средней кинетической энергии молекул, и тогда температура будет понятием микро-скопическим. С термодинамической точки зрения её можно понимать как меру нагретости тела, регистрируемую приборами (термометром, пирометром и пр.), и тогда температура будет понятием макроскопическим.

**19.1.** Из опыта известно, что плотность газа, находящегося в замкнутом сосуде при постоянной температуре, одинакова по всему объёму. Это означает, что число молекул, движущихся по всем направлениям, одинаково, т.е. распределение молекул по направлениям равномерное. Следовательно, постоянен во времени и средний импульс, сообщаемый газом стенкам сосуда. Отсюда вытекает постоянство силы давления газа на стенки сосуда.

**20.1.** Частые соударения молекул приводят к тому, что их траектории похожи на скомканную проволочку. Пути намного протяжённее перемещений, и среднее значение проекции скорости любой молекулы на определённое направление близко к нулю (во всяком случае, меньше скорости ветра).

**20.2.** Земная атмосфера должна понемногу рассеиваться в межпланетное пространство. При этом особенно часто должны её покидать молекулы водорода, имеющие бóльшую скорость теплового движения, чем молекулы азота и кислорода.

**21.1.** Отмеченный факт говорит о том, что есть молекулы с огромными скоростями теплового движения. Однако количество очень быстрых молекул очень мало, как и количество молекул с очень малыми скоростями.

**21.2.** Нет, для определения скорости молекулы по методу Штерна нужно было бы знать её местоположение на поверхности цилиндра. Но одну молекулу невозможно обнаружить.

**22.1.** Атмосферное давление обусловлено хаотическим движением молекул газов, входящих в состав атмосферного воздуха, и действием земного притяжения.

**22.2.** Вследствие притяжения частиц воздуха Землей верхние слои атмосферы давят на нижние и сжимают (уплотняют) их.

**22.3.** В условиях невесомости сохраняется хаотическое движение молекул газов, составляющих «атмосферу» кабины.

**24.1.** С повышением температуры возрастает скорость хаотического движения молекул.

**24.2.** При прокаливании стального изделия в смеси из угля и различных солей атомы углерода диффундируют в поверхностный слой металла, повышая прочность изделия.

**24.3.** Расплавленная медь (температура плавления меди  $1083^{\circ}\text{C}$ ) диффундирует в поверхностный слой спаиваемых деталей тем глубже, чем дольше продолжается диффузия. В результате спай приобретает большую прочность.

**24.4.** Повышение температуры уменьшает коэффициент вязкости, нефтепродукты становятся более «текучими». Можно использовать для перекачки насосы с меньшей мощностью.

**24.5.** В порах таких материалов находится воздух. Коэффициент теплопроводности газов намного меньше, чем у плотных материалов, газы являются плохими проводниками тепла.

**24.6.** Тёплый воздух за счёт конвекции поднимается вверх, и этим обеспечивается необходимая циркуляция воздуха.

**25.1.** Необратимыми процессами в природе являются: а) все процессы, совершающиеся с трением; б) процессы выравнивания температуры; в) поглощение и рассеяние света.

Механические процессы, характеризующиеся строго упорядоченным движением и отсутствием трения, являются обратимыми. Примерами могут служить обращение планет по орбитам и движение электронов в проводниках в условиях сверхпроводимости.

**26.1.** Давление газа в пузырьке равно внешнему давлению, которое складывается из атмосферного и давления столба воды над пузырьком. По мере поднятия давление воды уменьшается, а температура газа остается постоянной, поэтому он расширяется и совершает работу.

**27.1.** В первом случае увеличение внутренней энергии тела вызывается совершением механической работы, во втором – теплопередачей.

**27.2.** Примером необратимого процесса без компенсации может служить торможение движущегося тела до полной остановки. Здесь кинетическая энергия тела целиком расходуется на увеличение внутренней энергии его самого и окружающей среды, что приводит к их нагреванию.

**27.3.** Механическая работа, совершаемая при накачивании воздуха в шину, затрачивается на увеличение внутренней энергии сжатого воздуха, и температура его повышается. При этом насос также нагревается.

**28.1.** Если систему переводить из одного состояния в другое различными способами (изотермически, изобарно и пр.), то окажется, что необходимое для этого количество тепла будет различным. Оно будет зависеть не только от начальных и конечных параметров системы, но и от пути, по которому осуществлялся переход. Отсюда следует, что не имеет смысла говорить о запасе тепла, как мы говорим о запасённой в теле энергии, зависящей только от состояния тела.

**28.2.** Различие между количеством тепла и температурой можно увидеть из следующих примеров: а) при таянии льда ему сообщается тепло, а температура остается неизменной; б) при адиабатном расширении и сжатии система не получает и не отдает тепла, а температура системы изменяется.

**28.3.** В ответе на предыдущий ответ уже приводился пример с таянием льда, когда сообщение тепла не вызывает изменения температуры тела. Если имеется кусок льда при  $0^{\circ}\text{C}$  и соприкасающееся с ним тело при более высокой температуре, то возникнет и потечёт сам собой процесс выравнивания температур, т.е. процесс передачи энергии хаотического движения молекул.

**29.1.** Вода обладает большой удельной теплоёмкостью по сравнению с другими жидкостями: каждый килограмм воды запасает и переносит большое количество энергии. Кроме этого, вода дешевле.

**29.2.** За длительное время температуры полотенца и батареи выровнялись. Однако на ощупь ткань будет казаться менее горячей из-за меньшей удельной теплоёмкости и малой теплопроводности.

**29.3.** При соприкосновении с быстро вращающейся пилой металл разогревается до температуры плавления.

**29.4.** За счёт потенциальной энергии взаимодействия молекул, убывающей вследствие изменения их расположения в процессе кристаллизации.

**30.1.** Существование холодильников не противоречит второму началу термодинамики, так как в них передача тепла из холодильной камеры окружающему воздуху происходит не сама собой, а за счёт работы, совершаемой электрическим током.

**30.2.** Возникают почти непреодолимые трудности с созданием холодильника.

**30.3.** Если под чисто механическим процессом подразумевать некоторый абстрактный процесс, даже частично не связанный с рассеянием тепла, то энтропия изолированной системы, осуществляющей такой процесс, останется неизменной.

**31.1.** Кпд  $\eta_2$  реальных тепловых машин всегда меньше КПД идеального цикла Карно.  $\eta_2 = \varepsilon\eta$ , где  $\varepsilon$  – доля от КПД идеального цикла  $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ . Величина  $\eta$  устанавливает теоретический

предел КПД, который уменьшается с увеличением абсолютной температуры холодильника и с уменьшением температуры нагревателя, причём от конструктивной стороны машины величина  $\eta$  не зависит.

Величина множителя  $\varepsilon$  определяется уже конструктивными достоинствами и недостатками тепловой машины. Если не устранить эти недостатки, то  $\varepsilon$  уменьшается. Итоговый КПД является результатом учёта как термодинамической (физической), так и технической стороны вопроса.

**31.2.** В любой тепловой двигатель энергия поступает от нагревателя в форме кинетической энергии хаотического движения молекул газа или пара. Цилиндр и поршень придают беспорядочному тепловому движению молекул направленное, упорядоченное движение, благодаря чему уже совершается механическая работа. В этом и состоит назначение теплового двигателя.

**31.3.** Более выгодно использовать тепловую машину, забирающую тепло от наружного воздуха и выделяющую его в комнате. В этом случае тепло, выделяемое в комнате в единицу времени, равно  $Pt + Q$ , где  $P$  – мощность, потребляемая тепловой машиной за время  $t$ , а  $Q$  – тепло, получаемое от наружного воздуха. Сложность оборудования и цена препятствуют в настоящее время широкому использованию подобного рода тепловых машин для отопления, но такой способ обогрева помещений уже используется в виде кондиционеров.

**32.1.** Диссоциация должна ускорить рост давления по мере повышения температуры по сравнению с ростом, предсказываемым законом Шарля.



**32.2.** Объём воздуха в медицинской банке, приложенной к телу, не изменяется. По закону Шарля для изохорного процесса: во сколько раз уменьшается температура при остывании банки, во столько же раз уменьшается давление. Атмосферное давление становится больше давления внутри банки, поэтому она присасывается к телу.

**32.3.** С уменьшением объёма газа увеличивается его плотность. Увеличение плотности приводит к возрастанию числа ударов молекул за 1 с о единицу площади стенки, т. е. увеличению импульса, передаваемого стенке. В результате возрастает давление газа.

**32.4.** Закон Бойля – Мариотта не применим к газам при высоких давлениях.

**32.5.** Чтобы температура в процессе расширения не менялась, необходимо подводить к газу количество тепла, равное работе расширения газа.

**32.6.** Сжатие газа в теплонепроницаемой оболочке представляет собой адиабатный процесс (нет теплообмена с окружающей средой). Работа, совершаемая внешними силами, идёт на увеличение внутренней энергии газа. При этом его температура растёт. Давление в газе будет возрастать как за счёт уменьшения объёма, так и за счёт увеличения его температуры. При изотермическом сжатии давление растёт только за счёт уменьшения объёма. Следовательно, в первом случае давление увеличится на большую величину, чем во втором.

**32.7.** Современная техника требует мощных двигателей. Мощность неразрывно связана с быстроходностью. А все быстропротекающие процессы являются адиабатными (за малое время не может произойти заметного теплообмена).

**33.1.** Его можно сжижать посредством одного лишь сжатия при комнатной температуре.

**33.2.** Выше. Иначе вода не существовала бы вокруг нас в жидком состоянии.

**33.3.** Прав был Фарадей. Температуре – 100°C соответствует 173 К, это выше критической температуры каждого из перечисленных газов. Если вещество находится в одном из состояний при температуре выше критической, то оно не может быть сжижено никаким сжатием (область г на рис. 33.6).

**33.4.** При быстром расширении газа в пустоту происходит адиабатный процесс, который происходит с понижением температуры. При этом температура газа может стать ниже критической.

**34.1.** Слабые силы притяжения молекул газа не способны удерживать их друг возле друга. Молекулы газа движутся хаотически, во всех направлениях равновероятно. В жидкостях силы притяжения между молекулами значительно больше, чем в газе, поэтому молекулы колеблются около положений равновесия. При изменении положения они перемещаются на расстояния порядка размеров самих молекул.

**34.2.** Любая система, предоставленная сама себе, стремится занять состояние с минимально возможной потенциальной энергией. Потенциальная энергия поверхностного слоя одной крупной капли меньше, чем малых капель, поэтому состояние системы, полученное после слияния капель, более устойчиво.

**34.3.** Под действием силы поверхностного натяжения жир собрался бы в шарики. Однако сила тяжести сплюсчивает их в диски.

**34.4.** Коэффициент поверхностного натяжения убывает при повышении температуры вещества. Поэтому масса капли, отрывающейся в жарко натопленной комнате, меньше массы капли в прохладной комнате. Для получения прописанной дозы лекарства нужно увеличить количество капель.

**34.5.** Спайка обусловлена тем, что расплавленный припой смачивает поверхности скрепляемых деталей. Олово же не смачивает пленку окислов алюминия, покрывающую его поверхность.

**34.6.** Шерсть и шёлк водой плохо смачиваются.

**34.7.** Употребление полотенец основано на явлении капиллярности. Смачивающая жидкость втягивается в капилляры – поры, образованные тканью полотенца.

**34.8.** Чтобы закрыть капилляры в штукатурке, так как иначе масло будет впитываться в капилляры, а красящий порошок оставаться на поверхности и легко осыпаться.

**34.9.** Причина сцепления пластинок – образование между ними водяной «лепёшки» с вогнутой боковой поверхностью (см. рис. 34.9). Погружение пластинок в воду приведёт к исчезновению этой поверхности, а вместе с ней и стягивающего усилия.

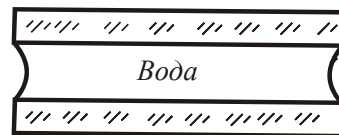


Рис. 34.9

### КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Молекулярная физика и термодинамика»

№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа
1	2	11	1	21	2	31	2	41	1
2	1,3	12	2	22	1	32	1	42	4
3	1,2	13	1,2	23	2	33	3	43	2
4	2	14	2,4	24	1	34	4	44	3
5	3	15	3	25	1	35	3	45	1
6	1	16	2	26	4	36	2	46	2
7	2	17	1	27	4	37	3	47	1
8	3	18	2,3	28	1	38	3	48	2
9	3,4	19	1	29	2	39	1	49	2
10	1,4	20	4	30	4	40	2	50	2

## ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Все тела в природе способны электризоваться, т. е. приобретать электрический заряд. Наличие электрического заряда проявляется в том, что заряженное тело взаимодействует с другими заряженными телами.

Взаимодействие между электрически заряженными частицами или макроскопическими заряженными телами называется электромагнитным взаимодействием. Раздел физики, в котором изучают электромагнитные взаимодействия, называется электродинамикой.

**Электростатика** – раздел электродинамики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействие неподвижных в инерциальной системе отсчёта электрически заряженных тел или частиц, обладающих электрическим зарядом.

### Глава 10. Электрическое поле в вакууме

#### §35 Электрический заряд. Закон Кулона

**Электрический заряд ( $q$ )** – неотъемлемое свойство некоторых элементарных частиц (электронов, протонов и т. д.), определяющее их взаимодействие с внешним электромагнитным полем.

$[q] = \text{Кл}$  (кулон);  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ .

#### 35.1 Свойства заряженных тел

1. Электрический заряд существует в двух видах, условно называемых положительными и отрицательными. Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые – притягиваются.
2. Существует минимальный электрический заряд, который называют элементарным. Носитель элементарного отрицательного заряда – электрон, положительного – протон. Заряд элементарных частиц одинаков по величине.

$$q_e = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

3. Электрический заряд дискретен, т. е. заряд любого тела образуется совокупностью элементарных зарядов и является величиной, кратной  $e$ .

$$q = eN, \quad N = 1, 2, 3 \dots \quad (35.1)$$

4. Для электрического заряда выполняется закон сохранения заряда. Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы заряженных тел остаётся величиной постоянной:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_N = \text{const} \quad (35.2)$$

или

$$\sum_{i=1}^N q_i = \text{const}.$$

5. Электрический заряд инвариантен, т. е. его величина не зависит от того, движется заряд или нет.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Два вида зарядов: Притяжение и отталкивание.

<http://www.youtube.com/watch?v=f8Z1gnDSUq8>

### 35.2 Закон Кулона

Закон, который позволяет найти силу взаимодействия точечных зарядов, установлен экспериментально в 1785 году Ш. Кулоном\*.

**Точечный заряд** – заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием от этого тела до других заряженных тел.

В результате опытов Кулон пришел к выводу:

**Сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов пропорциональна величине этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и зависит от среды, в которой находятся эти заряды.**

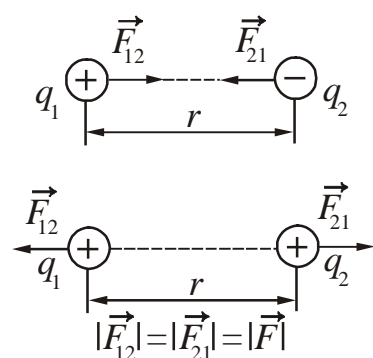


Рисунок 35.1

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}, \quad (35.3)$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  – коэффициент пропорциональности в СИ.

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная.

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость – характеристика среды.

Для вакуума  $\varepsilon = 1$ .

Сила взаимодействия направлена по прямой, соединяющей заряды (рис. 35.1).

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Два вида зарядов: Модель весов Кулона.

<http://www.youtube.com/watch?v=62fBGijR09w>

• **Давайте подумаем!**

**35.1.** Из какого опытного факта следует, что должно быть два различных вида электрических зарядов?

**35.2.** Может ли заряд тела быть точно равным заранее заданной величине, например, 1 Кл?

**35.3.** Две разноименно заряженные частицы могут исчезать, превращаясь в новые, уже нейтральные частицы. Предусмотрена ли такая возможность в формулировке закона сохранения заряда?

\*Кулон Шарль Огюстен (1736–1806), французский физик и военный инженер.

**35.4.** Изолированному проводящему шару сообщили положительный заряд. Изменится ли при этом его масса?

**35.5.** Что общего между гравитационным и электрическим взаимодействиями? Каковы наиболее заметные различия?

### §36 Электрическое поле. Характеристики электрического поля

Всякое электрически заряженное тело создает в окружающем его пространстве электрическое поле. *Электрическое поле – это материальная среда, существующая вокруг заряженных тел и проявляющая себя силовым действием на заряды.* Особенностью поля является то, что оно создается электрическими зарядами и заряженными телами, и воздействует на эти объекты независимо от того, движутся они или нет.

Если электрически заряженные тела или частицы неподвижны в данной системе отсчёта, то их взаимодействие осуществляется посредством электростатического поля. Электростатическое поле является не изменяющимся во времени, то есть *стационарным электрическим полем*.

#### 36.1 Напряжённость электрического поля

Для того, чтобы обнаружить и исследовать электрическое поле, используют положительный точечный заряд, который называют *пробным* –  $q_{\text{пр}}$ . Если брать разные по величине пробные заряды, то и силы, которые действуют на эти заряды в данной точке поля, будут разными. Однако отношение силы к величине заряда для данной точки поля для всех пробных зарядов будет одним и тем же. Поэтому можно принять это отношение в качестве величины, характеризующей электрическое поле. Введённую таким образом характеристику называют напряжённостью электрического поля в данной точке.

*Напряжённость электрического поля ( $\vec{E}$ ) – векторная физическая величина, силовая характеристика электрического поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещённый в данную точку поля.*

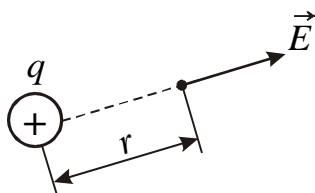


Рисунок 36.1

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}} \quad (36.1)$$

$$[E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Направление вектора напряжённости совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд (рис. 36.1).

Если величина и направление вектора напряжённости в каждой точке поля одинаковы, то поле называется *однородным*.

Исходя из закона Кулона, можно рассчитать напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом.

$$E = \frac{F}{q_{\text{пр}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}. \quad (36.2)$$

Если поле создается несколькими зарядами, то напряжённость результирующего поля равна векторной сумме напряжённостей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности (рис. 36.2).

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i. \quad (36.3)$$

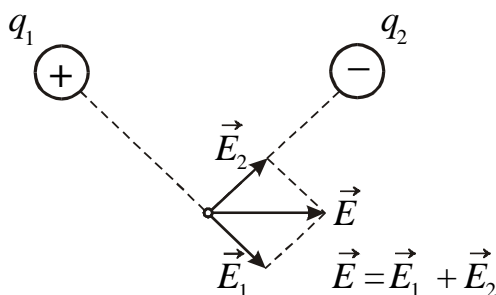


Рисунок 36.2

Данное утверждение называется **принципом суперпозиции (наложения) полей**.

Принцип суперпозиции позволяет рассчитать напряжённость поля любой системы зарядов.

На любой заряд  $q$ , внесённый в электрическое поле, действует электрическая сила

$$\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}. \quad (36.4)$$

### 36.2 Потенциал электростатического поля

Рассмотрим электростатическое поле, создаваемое неподвижным точечным зарядом  $q$ . В это поле внесём пробный заряд  $q_{\text{пр}}$ . В любой точке поля на пробный заряд действует сила, которая в соответствии с законом Кулона равна

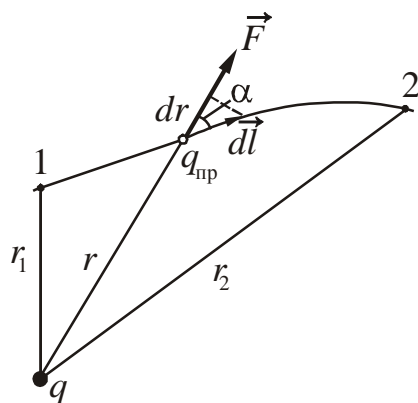


Рисунок 36.3

$$F = k \frac{q q_{\text{пр}}}{\epsilon r^2}.$$

Заряд  $q_{\text{пр}}$  под действием сил поля перемещается относительно заряда  $q$  вдоль некоторой линии (рис. 36.3). Элементарная работа по перемещению заряда равна

$$\delta A = \vec{F} d\vec{l} = F dl \cos \alpha,$$

где  $dl \cos \alpha = dr$  (см. рис. 36.3).

При перемещении из точки 1 в точку 2 совершается работа

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F dr = \int_{r_1}^{r_2} k \frac{qq_{\text{пр}}}{\varepsilon r^2} dr = - \left( k \frac{qq_{\text{пр}}}{\varepsilon r_2} - k \frac{qq_{\text{пр}}}{\varepsilon r_1} \right). \quad (36.5)$$

Из формулы (36.5) следует, что работа по перемещению заряда в электростатическом поле определяется только начальным и конечным положением заряда. Следовательно, кулоновские силы являются консервативными. Работа консервативных сил (см. §9) равна убыли потенциальной энергии

$$A = - (W_{\text{п}_2} - W_{\text{п}_1}).$$

Тогда величину  $k \frac{qq_{\text{пр}}}{r}$  можно назвать потенциальной энергией заряда  $q_{\text{пр}}$  в поле заряда  $q$ .

$$W_{\text{п}} = k \frac{qq_{\text{пр}}}{\varepsilon r}. \quad (36.6)$$

Разные пробные заряды  $q_{\text{пр}_1}, q_{\text{пр}_2}$  и т. д. будут обладать в одной и той же точке поля различной потенциальной энергией  $W_{\text{п}_1}, W_{\text{п}_2}$  и т. д. Однако отношение потенциальной энергии к величине пробного заряда будет одним и тем же. Эту величину называют потенциалом поля в данной точке и используют для описания электростатических полей.

**Потенциал ( $\varphi$ ) – скалярная физическая величина, энергетическая характеристика электростатического поля, численно равная потенциальной энергии, которой обладал бы в данной точке поля единичный положительный заряд.**

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q_{\text{пр}}}. \quad (36.7)$$

$$[\varphi] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В (вольт}^* \text{)}.$$

Потенциал может быть положительным или отрицательным, так как потенциальная энергия может быть как положительной, так и отрицательной.

Подставив в (36.7) выражение для потенциальной энергии (36.6), получим формулу для расчёта потенциала поля точечного заряда:

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}, \quad (36.8)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;

$q$  – заряд, создающий поле;

$r$  – расстояние от заряда до точки, в которой определяется потенциал.

---

\*Вольта Алессандро (1745–1827), итальянский физик, химик и физиолог.

Работа  $A$ , совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда  $q$  из точки 1 с потенциалом  $\varphi_1$  в точку 2 с потенциалом  $\varphi_2$  равна убыли потенциальной энергии:

$$A = -(W_{\Pi_2} - W_{\Pi_1}).$$

С учётом формулы (36.7) получим

$$A = -(q\varphi_2 - q\varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (36.9)$$

Величину  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  называют **разностью потенциалов**. Электрические поля принято связывать не с абсолютными значениями потенциалов, а с их разностями между различными точками пространства.

Таким образом, работа, совершаемая над зарядом силами поля, равна произведению заряда на разность потенциалов в начальной и конечной точках (т. е. на убыль потенциала).

$$A = q\Delta\varphi. \quad (36.10)$$

Из формулы (36.8) следует, что если  $r$  устремить к бесконечности ( $r \rightarrow \infty$ ), то потенциал  $\varphi$  устремится к нулю. Это означает, что в бесконечно удалённой точке потенциал поля точечного заряда обращается в нуль. Тогда при удалении заряда  $q$  из точки с потенциалом  $\varphi$  в бесконечность силы поля совершают работу

$$A_{\infty} = q\varphi.$$

Получили ещё одно определение: **потенциал численно равен работе, совершаемой силами электростатического поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки на бесконечность.**

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q}.$$

На практике за нулевой потенциал обычно принимают потенциал Земли.

Если поле создается системой зарядов, то, в соответствии с принципом суперпозиции, потенциал результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N = \sum_{i=1}^N \varphi_i. \quad (36.11)$$

### 36.3 Циркуляция вектора напряжённости электростатического поля

Силы, действующие на заряд в электростатическом поле, являются консервативными, их работа по замкнутому контуру равна нулю. Покажем это. Работа  $A$ , совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда  $q$  из точки 1 с потенциалом  $\varphi_1$  в точку 2 с потенциалом  $\varphi_2$  равна

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$



Если заряд перемещать по замкнутому контуру, то  $\phi_1$  будет равно  $\phi_2$ . Работа станет равной нулю.

Так как в общем случае работа по перемещению заряда вдоль замкнутого контура  $L$  находится интегрированием, то можно записать, что

$$A = \oint_L \vec{F} d\vec{l} = \oint_L q\vec{E}d\vec{l} = 0. \quad (36.12)$$

Разделив (36.12) на  $q$ , получим:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0. \quad (36.13)$$

Интеграл, стоящий в левой части формулы (36.13), называется **циркуляцией** вектора напряжённости электростатического поля по замкнутому контуру  $L$ . Этот интеграл численно равен работе, которую совершают электростатические силы при перемещении единичного положительного заряда, по замкнутому контуру.

Таким образом, **циркуляция вектора напряжённости электростатического поля по любому замкнутому контуру равна нулю**.

Силовое поле, напряжённость которого удовлетворяет условию (36.13), называется потенциальным, следовательно, **электростатическое поле является потенциальным**. Если электрическое поле создаётся движущимися зарядами, то это условие не выполняется, т. е. поле таких зарядов не является потенциальным.

• Давайте подумаем!

**36.1.** Два одинаковых проводящих уединённых шара в вакууме получили различные заряды. Что можно сказать о потенциалах шаров?

**36.2.** Одинаковые по величине заряды переданы в вакууме двум проводящим шарам разного диаметра. Что можно сказать о потенциалах шаров?

**36.3.** Можно ли произвольно приписать Земле потенциал в +100 В вместо нуля? Как это повлияет на измерения значений потенциалов и разности потенциалов?

### §37 Графическое изображение электростатических полей

Графически электростатическое поле изображают с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей.

**Эквипотенциальная поверхность** – это геометрическое место точек электростатического поля, потенциалы которых одинаковы. Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении электрического заряда по одной и той же эквипотенциальной поверхности, равна нулю.

**Силовая линия (линия напряжённости)** – это линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряжённости  $\vec{E}$  (рис. 37.1).

Особенности силовых линий электростатического поля.

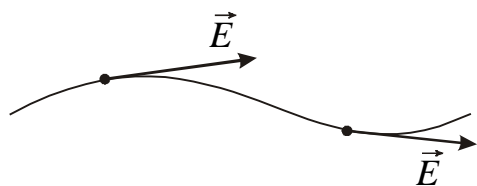


Рисунок 37.1

1. Силовые линии начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность.
2. Силовые линии не пересекаются.
3. По густоте силовых линий судят о величине напряжённости электростатического поля.

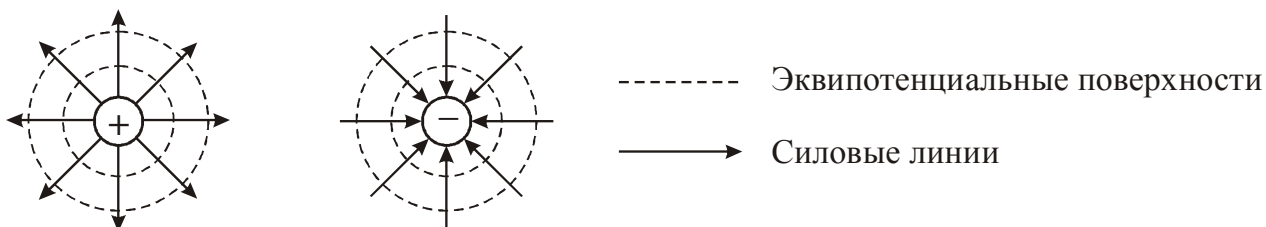
4. Силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальные поверхности обычно чертят так, что при переходе от одной эквипотенциальной поверхности к соседней потенциал меняется на одну и ту же величину  $\Delta\phi$ . Чем меньше выбрано значение разности потенциалов  $\Delta\phi$ , тем детальнее будет представлено распределение потенциала в пространстве.

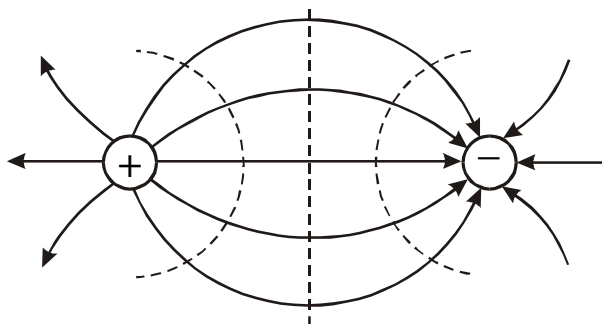
Для большей наглядности чертят также силовые линии, перпендикулярные поверхностям равного потенциала. Там, где (при постоянной разности потенциалов  $\Delta\phi$ ) соседние эквипотенциальные поверхности наиболее близко подходят друг к другу, напряжённость электрического поля максимальна. Наоборот, в местах, где расстояния между ними велики, будет мала и напряжённость поля  $\vec{E}$ .

Примеры картин силовых линий и эквипотенциальных поверхностей:

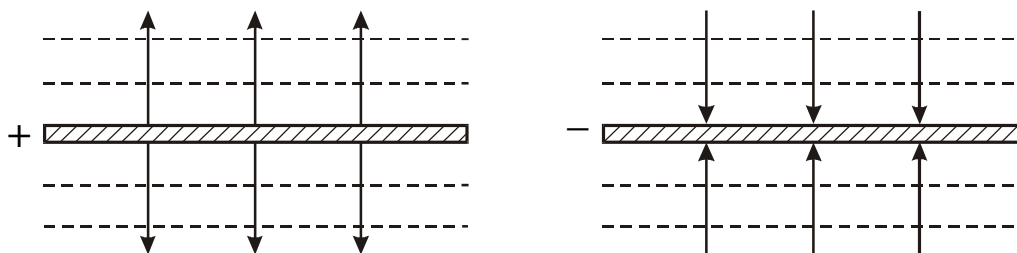
1. Поле точечного заряда.



2. Система точечных зарядов.



### 3. Поле равномерно заряженной плоскости.



#### Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Демонстрация электрического поля на султанах.

<http://www.youtube.com/watch?v=pgELH03uXdg>

2. Поле вблизи поверхности проводника.

<http://www.youtube.com/watch?v=eZj3jimsXkE>

• Давайте подумаем!

**37.1.** Могут ли пересекаться силовые линии электрического поля? Эквипотенциальные поверхности?

**37.2.** Могут ли линии напряжённости электростатического поля быть замкнутыми?

**37.3.** Иногда говорят, что линии напряжённости – это траектории, по которым двигался бы в поле точечный положительный заряд, если его, внеся в это поле, предоставить самому себе. Правильно ли это утверждение?

### §38 Связь между напряжённостью электрического поля и потенциалом

Электростатическое поле можно описать с помощью векторной величины  $\vec{E}$  или с помощью скалярной величины  $\varphi$ . Найдём связь потенциала с напряжённостью электрического поля на примере электрического поля точечного заряда. Такое поле является неоднородным, так как численное значение и направление вектора напряжённости  $\vec{E}$  меняются при переходе из одной точки поля в другую. Изобразим три эквипотенциальные поверхности поля этого заряда с потенциалами  $\varphi + d\varphi$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi - d\varphi$ , где  $d\varphi$  – бесконечно малое изменение потенциала (рис. 38.1). Эти поверхности находятся на разном расстоянии друг от друга.

Изменение потенциала в заданном направлении  $\vec{r}$  характеризуют производной по направлению:  $\frac{d\varphi}{dr}$ . С уменьшением расстояния от заряда потенциал поля увеличивается. Это означает, что численное значение производной будет возрастать в сторону, противоположную вектору  $\vec{E}$ . Для того, чтобы указать

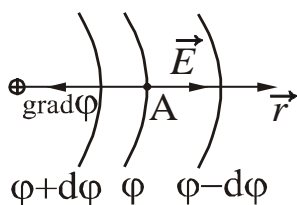


Рисунок 38.1

направление наиболее быстрого возрастания потенциала, вводят векторную величину, которая называется градиентом потенциала.

**Градиент потенциала** (обозначается  $\text{grad}\varphi$ ) – вектор, направленный в сторону максимального возрастания потенциала и численно равный изменению потенциала, приходящемуся на единицу длины в этом направлении.

Таким образом, градиент потенциала характеризует степень неоднородности поля: чем больше градиент, тем более неоднородным является поле.

Установим, как связаны напряжённость электрического поля  $\vec{E}$  и градиент потенциала  $\text{grad}\varphi$ . Поместим в точку А указанного электрического поля пробный положительный заряд  $q_{\text{пр}}$ . Пусть под действием поля он смещается из точки с потенциалом  $\varphi$  в точку с потенциалом  $\varphi - d\varphi$ . При этом совершается работа

$$\delta A = -q_{\text{пр}}d\varphi. \quad (38.1)$$

С другой стороны

$$\delta A = Fdr = q_{\text{пр}}E dr, \quad (38.2)$$

где  $dr$  – расстояние между эквипотенциальными поверхностями  $\varphi$  и  $\varphi - d\varphi$ .

Приравняем (38.1) и (38.2) и, сократив на  $q_{\text{пр}}$ , получим

$$-d\varphi = E dr,$$

откуда

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}. \quad (38.3)$$

Это означает, что напряжённость электрического поля численно равна изменению потенциала, приходящемуся на единицу длины. Формулу (38.3) можно записать в векторном виде

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi. \quad (38.4)$$

Знак « $-$ » говорит о том, что **вектор напряжённости направлен в сторону убывания потенциала**. Формула (38.4) справедлива для любого электростатического поля.

Рассмотрим однородное электрическое поле. Примером такого поля является поле между двумя разноимённо заряженными пластинами. В каждой точке однородного поля вектор  $\vec{E}$  сохраняет своё численное значение и направление. В этом случае

$$E = \frac{U}{d}, \quad (38.5)$$

где  $d$  – расстояние между эквипотенциальными плоскостями с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ,

$U = \varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов (напряжение).

• Давайте подумаем!

**38.1.** Потенциал электрического поля некоторого заряда убывает по мере удаления от него. Что можно сказать о знаке этого заряда?

**38.2.** Какой знак должен иметь заряд, чтобы потенциал его поля в точках, расположенных ближе к заряду, был меньше, чем в точках, расположенных дальше от заряда?

**38.3.** В какую область будут стремиться перейти электроны в электрическом поле: в область с высоким потенциалом или с низким?

**38.4.** Трамвайный провод оборвался и лежит на земле. Человек в токопроводящей обуви может подойти к нему лишь очень маленькими шагами. Почему опасно делать большие шаги?

## §39 Расчёт электростатических полей

### 39.1 Теорема Гаусса

Теорема Гаусса\* позволяет в ряде случаев найти напряжённость поля более просто, чем с использованием формулы для напряжённости поля точечного заряда и принципа суперпозиции электростатических полей. Прежде чем сформулировать теорему, введём понятие потока вектора напряжённости электростатического поля.

**Потоком вектора напряжённости электрического поля через элементарный участок поверхности  $dS$  называется величина**

$$d\Phi = \vec{E} d\vec{S} = EdS \cos \alpha, \quad (39.1)$$

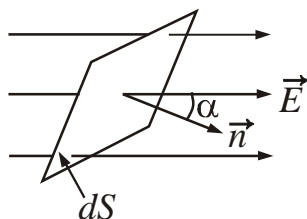


Рисунок 39.1

где  $d\vec{S} = \vec{n} dS$ ,

$\vec{n}$  – единичный вектор, перпендикулярный площадке  $dS$ ;

$\alpha$  – угол между направлением  $\vec{n}$  и  $\vec{E}$  (рис. 39.1).

Поток  $\Phi$  вектора напряжённости  $\vec{E}$  через любую поверхность  $S$  равен алгебраической сумме потоков напряжённости сквозь все элементарные участки этой поверхности.

$$\Phi = \iint_S \vec{E} d\vec{S}. \quad (39.2)$$

$$[\Phi] = \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot \text{м}^2 = \text{В} \cdot \text{м}.$$

Согласно теореме Гаусса для электростатического поля

**Поток вектора напряжённости электростатического поля сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью, делённой на произведение  $\epsilon_0 \epsilon$ .**

\*Гаусс Карл Фридрих (1777–1855), немецкий математик, астроном и физик.

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \sum_{i=1}^N q_{\text{охв}}. \quad (39.3)$$

Введём дополнительную характеристику электростатического поля, которую называют **вектором электрического смещения  $\vec{D}$**  (**вектором электростатической индукции**):

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (39.4)$$

В отличие от напряжённости, вектор электрического смещения – силовая характеристика, не зависящая от свойств среды, в которой создаётся поле.

В этом случае теорему Гаусса можно записать следующим образом:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^N q_{\text{охв}}. \quad (39.5)$$

**Поток вектора электрического смещения сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью.**

## 39.2 Примеры расчёта электростатических полей

При расчёте электростатических полей в этом разделе предполагается, что проводники находятся в вакууме, т. е.  $\varepsilon = 1$ .

### 39.2.1 Поле равномерно заряженной бесконечно длинной нити

Пусть бесконечно длинная нить заряжена равномерно с линейной плотностью заряда  $\tau$ . **Линейной плотностью заряда** называется величина, численно равная заряду, приходящемуся на единицу длины. При равномерном распределении заряда

$$\tau = \frac{q}{l}. \quad (39.6)$$

$$[\tau] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}.$$

Из соображений симметрии следует, что напряжённость поля в любой точке будет направлена по радиальной прямой, перпендикулярной оси нити (заряд считается положительным).

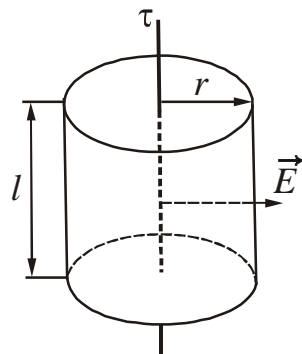


Рисунок 39.2

В качестве замкнутой поверхности выберем коаксиальный цилиндр радиуса  $r$  и высоты  $l$  (рис. 39.2). Поток  $\Phi$  через торцы цилиндра равен нулю, так как линии напряжённости перпендикулярны оси. Поток через боковую поверхность

$$\Phi = \oint_{S_{\text{бок}}} \vec{E} d\vec{S} = E \cdot 2\pi r l.$$

По теореме Гаусса (см. формулу (39.3)):

$$E \cdot 2\pi r l = q \cdot \frac{1}{\epsilon_0} = \frac{\tau l}{\epsilon_0}.$$

Отсюда:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\tau}{r}. \quad (39.7)$$

Напряжённость поля заряженной нити определяется линейной плотностью заряда и расстоянием от нити. Поле отрицательно заряженной нити отличается только направлением вектора напряжённости  $\vec{E}$ .

Как уже отмечалось, для электрических полей существенным является не само значение потенциала, а разность потенциалов. Получим формулу для расчёта разности потенциалов поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечно длинной нитью. Для этого используем связь между напряжённостью и потенциалом (38.3).

$$E = -\frac{d\varphi}{dr},$$

$$d\varphi = -E dr.$$

Проинтегрируем выражение, заменив значение напряжённости электрического поля по формуле (39.7). Получим:

$$\Delta\varphi = -\int_{r_1}^{r_2} E dr = -\int_{r_1}^{r_2} \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dr}{r} = -\left( \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln r_1 - \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln r_2 \right). \quad (39.8)$$

Выполним преобразования и получим, что разность потенциалов двух точек поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечно длинной нитью, определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (39.9)$$

### 39.2.2 Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости

Пусть плоскость заряжена равномерно с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ . **Поверхностной плотностью заряда** называется величина, численно равная заряду, приходящемуся на единицу площади. При равномерном распределении заряда

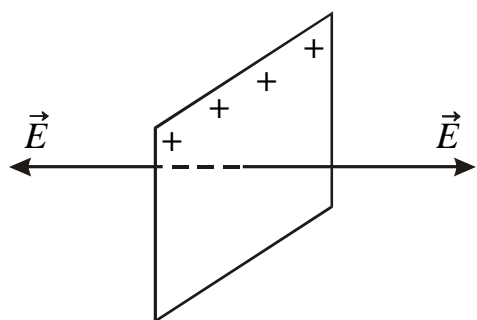


Рисунок 39.3

$$\sigma = \frac{q}{S}. \quad (39.10)$$

$$[\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Применив теорему Гаусса, можно показать, что напряжённость поля равномерно заряженной бесконечной плоскости определя-

ется следующим образом:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \quad (39.11)$$

Это означает, что на любых расстояниях от бесконечной плоскости напряжённость поля одинакова по величине (рис. 39.3).

Две равномерно, с одинаковой плотностью  $\sigma$ , разноименно заряженные бесконечные параллельные плоскости создают однородное электрическое поле. Напряжённость  $E$  поля между плоскостями определяется соотношением:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \quad (39.12)$$

### 39.2.3 Поле равномерно заряженной сферической поверхности

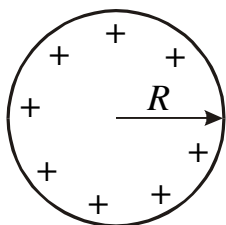


Рисунок 39.4

Поле, создаваемое сферической поверхностью радиуса  $R$ , заряженной с постоянной поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ , будет центрально-симметричным (рис. 39.4). Это означает, что направление вектора  $\vec{E}$  в любой точке проходит через центр сферы, а величина напряжённости зависит от расстояния  $r$  от центра сферы. В качестве гауссовой поверхности выбирают концентрическую

с заряженной сферой поверхность радиуса  $r$ . Если  $r > R$ , то внутрь поверхности попадает весь заряд  $q$ , распределённый по сфере. Применив теорему Гаусса, можно получить формулу для расчёта напряжённости поля равномерно заряженной сферической поверхности:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}. \quad (39.13)$$

Это означает, что вне шара напряжённость убывает по такому же закону, как и у поля точечного заряда.

Сферическая поверхность радиуса  $r < R$  не будет содержать зарядов, поэтому внутри сферы, заряженной с постоянной поверхностной плотностью, поле отсутствует, т. е.  $E = 0$ .

• Давайте подумаем!

**39.1.** Электрический диполь (два равных по величине разноимённых точечных заряда) помещён вовнутрь замкнутой поверхности. Чему равен поток вектора напряжённости  $\vec{E}$  электрического поля через эту поверхность?



# Глава 11. Электрическое поле в веществе

## §40 Электрический диполь

**Электрическим диполем** называется система двух одинаковых по величине разноимённых точечных зарядов  $+q$  и  $-q$ , расстояние  $l$  между которыми значительно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы.

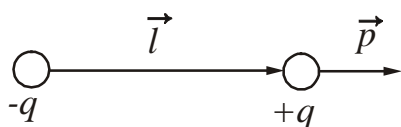


Рисунок 40.1

Прямая, проходящая через оба заряда, называется **осью диполя**. Вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и численно равный расстоянию между ними, называется **плечом диполя**  $\vec{l}$  (рис. 40.1). Вектор, совпадающий по направлению с плечом диполя и численно равный произведению модуля заряда  $|q|$  на плечо  $\vec{l}$ , называется **электрическим моментом диполя или дипольным моментом** (рис. 40.1).

$$\vec{p} = |q| \vec{l} . \quad (40.1)$$

$[p] = \text{Кл} \cdot \text{м} .$

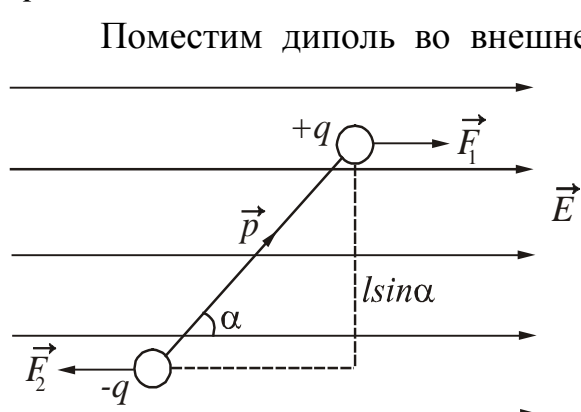


Рисунок 40.2

Поместим диполь во внешнее электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}$  (рис. 40.2). Образующие диполь заряды  $+q$  и  $-q$  окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Модуль каждой силы

$$F = qE .$$

Плечо этой пары сил равно  $l \sin \alpha$ . Вращающий момент сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  стремится развернуть диполь вдоль поля. Найдём величину момента:

$$M = F l \sin \alpha = qEl \sin \alpha .$$

Так как  $ql = p$ , то

$$M = pE \sin \alpha . \quad (40.5)$$

Данное выражение можно представить в векторном виде

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} . \quad (40.6)$$

Таким образом, поведение диполя в электрическом поле определяется его дипольным моментом.

• Давайте подумаем!

**40.1.** Имеются два равных по величине разноимённых точечных заряда (диполь). Какую форму имеет поверхность равного потенциала, проходящая через точку, находящуюся посередине между этими зарядами?

**40.2.** Покоящийся электрический диполь помещён в однородное электрическое поле и предоставлен самому себе. Опишите характер его движения.

## §41 Диэлектрики в электрическом поле

**Диэлектрики (изоляторы)** – это вещества, не способные проводить электрический ток. Идеальных изоляторов в природе не существует. Все вещества хотя бы в ничтожной степени проводят электрический ток. Однако, вещества, которые называются диэлектриками, проводят ток в  $10^{15} - 10^{20}$  раз хуже, чем вещества, которые называются проводниками.

**Посмотрите лекционную демонстрацию:**

Проводимость проводников и изоляторов.

[http://www.youtube.com/watch?list=PLWM8IO-3TQjPep7daowLe6lYQzw4d2eQm&v=N71NpZGTV\\_o](http://www.youtube.com/watch?list=PLWM8IO-3TQjPep7daowLe6lYQzw4d2eQm&v=N71NpZGTV_o)

Согласно молекулярно-кинетической теории все вещества состоят из атомов или молекул. В свою очередь, атомы состоят из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов, расстояние между которыми очень мало ( $\sim 10^{-10}$  м), поэтому атомы и молекулы, находящиеся в электрическом поле, можно рассматривать как диполи. Если диэлектрик внести в электрическое поле, то это поле и сам диэлектрик претерпевают существенные изменения.

### 41.1 Классификация диэлектриков

По своей структуре диэлектрики можно разделить на три группы.

1. Вещества, молекулы которых имеют симметричное строение ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ).

Если внешнее поле отсутствует ( $\vec{E} = 0$ ), то центр тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадает (рис. 41.1 а). Такие молекулы называются **неполярными**. Дипольный момент молекулы  $\vec{p} = 0$ . Если напряжённость внешнего поля не равна нулю ( $\vec{E} \neq 0$ ), то заряды неполярных молекул смещаются (рис. 40.1 б). Молекула приобретает дипольный момент  $\vec{p}$ , величина которого пропорциональна напряжённости электрического поля  $\vec{E}$ . Как правило, дипольный момент неполярных диэлектриков имеет небольшое значение, так как смещению зарядов препятствуют силы кулоновского притяжения между ядром и электронами.

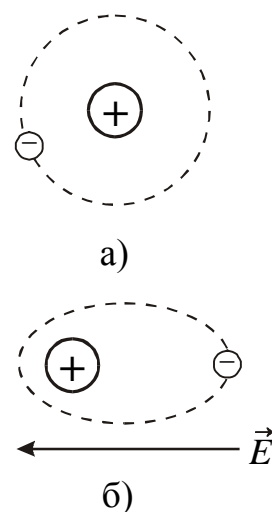


Рисунок 41.1

2. Вещества, молекулы которых имеют асимметричное строение ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ).

Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают (рис. 41.2). Такие молекулы называют **полярными**. Если напряжённость внешнего

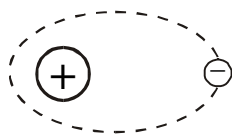


Рисунок 41.2

электрического поля равна нулю ( $\vec{E} = 0$ ), то молекулы всё равно обладают дипольным моментом. Действие внешнего поля на полярную молекулу сводится в основном к стремлению повернуть молекулу так, чтобы её дипольный момент установился по направлению поля.

3. Вещества, молекулы которых имеют ионное строение ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$  и др.).

Если такой диэлектрик внести во внешнее электрическое поле, то происходит некоторая деформация решётки: решётка положительных ионов смещается относительно решётки отрицательных ионов. При этом у диэлектрика возникает дипольный момент.

Таким образом, механизм поляризации неполярных и полярных диэлектриков существенно отличается друг от друга.

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Модель неполярного диэлектрика.

<http://www.youtube.com/watch?v=Usst7xzdEg>

2. Модель полярного диэлектрика: Стеклопалочка между пластинами конденсатора.

<http://www.youtube.com/watch?v=6iK3vwH0DnE>

## 41.2 Поляризация диэлектриков

Если внешнее электрическое поле отсутствует, то дипольные моменты молекул диэлектрика или равны нулю (неполярные молекулы), или распределены по направлениям в пространстве хаотическим образом (полярные молекулы). В обоих случаях суммарный дипольный момент диэлектрика равен нулю.

При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле неполярные молекулы приобретают дипольные моменты, а полярные поворачиваются так, что их дипольные моменты устанавливаются по направлению поля. **Смещение положительных и отрицательных зарядов диэлектрика под действием электрического поля называется поляризацией диэлектрика.**

В результате диэлектрик приобретает дипольный момент

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i, \quad (41.1)$$

где  $\vec{p}_i$  – дипольный момент одной молекулы.

Для количественного описания поляризации диэлектрика вводят векторную величину, которую называют поляризованностью.

**Поляризованность** ( $\vec{P}_V$ ) – векторная физическая величина, численно равная дипольному моменту единицы объёма диэлектрика.

$$\vec{P}_V = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i, \quad (41.2)$$

где  $\Delta V$  – физически бесконечно малый объём, взятый вблизи рассматриваемой точки.

$$[P_V] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

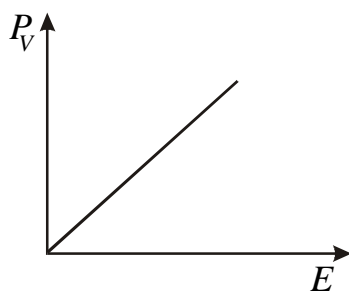


Рисунок 41.3

В слабых полях поляризованность изотропных диэлектриков пропорциональна напряжённости электрического поля (рис. 41.3) в той же точке:

$$\vec{P}_V = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (41.3)$$

где  $\chi$  – **диэлектрическая восприимчивость среды** – величина, характеризующая электрические свойства диэлектрика.

Диэлектрическая восприимчивость  $\chi$  величина безразмерная, всегда положительная, для большинства диэлектриков численное значение составляет несколько единиц. Для вакуума  $\chi = 0$ , так как вакуум не может поляризоваться.

Если диэлектрик состоит из полярных молекул, то действию внешнего поля противодействует тепловое движение, которое стремится разбросать их дипольные моменты по всем направлениям. Диэлектрическая восприимчивость таких диэлектриков обратно пропорциональна температуре.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Притяжение предметов к наэлектризованному телу.

<http://www.youtube.com/watch?v=RSBB8kfWXaM>

### 41.3 Поле внутри диэлектрика

Заряды, входящие в состав молекул диэлектрика, называются **связанными**. Покинуть пределы молекулы они не могут. Под действием электрического поля связанные заряды могут лишь смещаться относительно положений равновесия. Заряды, которые находятся в пределах диэлектрика, но не входят в состав его молекул, а также заряды, расположенные за пределами диэлектрика, называются **сторонними**.

Рассмотрим две бесконечные параллельные плоскости с равными по величине, но разными по знаку зарядами (рис. 41.4). Между пластинами возникает однородное электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}_0$ . Напряжённость поля этих сторонних зарядов будет определяться следующим образом:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда на пластинах.

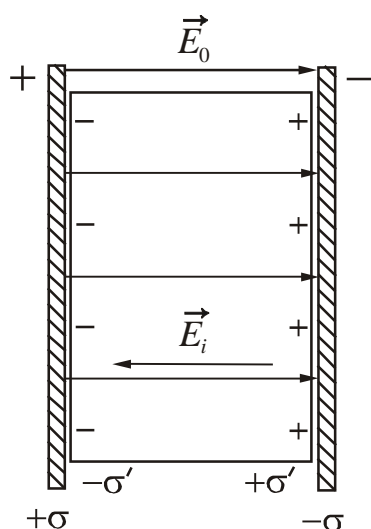


Рисунок 41.4

Внесём в это поле пластинку из диэлектрика. В результате поляризации на левой грани диэлектрика образуется избыток отрицательных поляризационных (связанных) зарядов с поверхностной плотностью  $-\sigma'$ . На правой грани – избыток положительных с поверхностной плотностью  $+\sigma'$ . Связанные заряды создают дополнительное электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}_i$

$$E_i = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}.$$

Напряжённость  $\vec{E}_i$  поля связанных зарядов направлена против внешнего поля  $\vec{E}_0$ , созданного сторонними зарядами. Результирующее поле внутри ди-

электрика

$$E = E_0 - E_i. \quad (41.4)$$

Поляризованный диэлектрик можно рассматривать как диполь, несущий на себе поляризационный заряд  $q'$ .

$$q' = \sigma' S,$$

где  $\sigma'$  – поверхностная плотность связанных зарядов,  $S$  – площадь боковой грани пластинки. Дипольный момент этого диполя

$$p = q'd = \sigma' Sd = \sigma' V,$$

где  $d$  – толщина пластинки,  $V$  – объём пластинки.

Разделив дипольный момент всего диэлектрика на его объём, получим, согласно определению, модуль вектора поляризованности

$$\frac{p}{V} = P_V = \sigma'. \quad (41.5)$$

Поверхностная плотность связанных зарядов равна поляризованности.

Сделаем замену в формуле (41.4), учитывая то, что поляризованность пропорциональна напряжённости электрического поля:  $\vec{P}_V = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$ . Получим

$$E = E_0 - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \varepsilon_0 E}{\varepsilon_0},$$

или

$$E = E_0 - \chi E.$$

Отсюда 
$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} . \quad (41.6)$$

Безразмерная величина 
$$\varepsilon = 1 + \chi \quad (41.7)$$

называется диэлектрической проницаемостью среды.

Тогда напряжённость поля внутри диэлектрика

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} . \quad (41.8)$$

**Диэлектрическая проницаемость среды – характеристика вещества, которая показывает, во сколько раз поле внутри однородного диэлектрика меньше, чем в вакууме.**

Таким образом, **диэлектрик всегда ослабляет электрическое поле.**

#### 41.4 Условия на границе раздела двух диэлектриков

Рассмотрим границу между двумя диэлектриками с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Пусть в диэлектриках создано поле, напряжённость которого в первом диэлектрике  $\vec{E}_1$ , во втором  $\vec{E}_2$ .  $\vec{D}_1$  и  $\vec{D}_2$  – векторы электрического смещения соответственно в первом и втором диэлектриках. Пусть  $A$  – произвольная точка, лежащая на границе раздела двух сред (рис. 41.5).  $\vec{\tau}$  – единичный вектор, направленный по касательной к поверхности раздела,  $\vec{n}$  – единичный вектор, направленный по нормали к касательной и идущий из первой

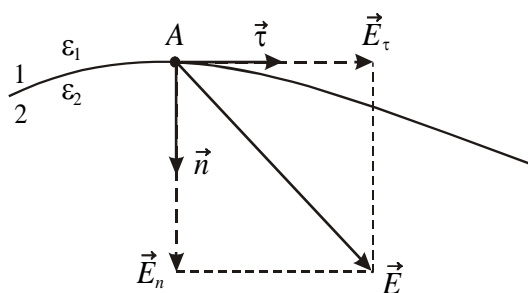


Рисунок 41.5

среды во вторую. Векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  можно представить в виде суммы нормальной и тангенциальной составляющих:

$$\vec{E}_1 = \vec{\tau} E_{1\tau} + \vec{n} E_{1n} ,$$

$$\vec{E}_2 = \vec{\tau} E_{2\tau} + \vec{n} E_{2n} .$$

Если на границе раздела двух сред нет свободных зарядов, то для изотропных диэлектриков можно получить два граничных условия.

1. При переходе через границу раздела двух сред составляющая напряжённости, касательная к поверхности раздела двух сред, не изменяется

$$E_{2\tau} = E_{1\tau} . \quad (41.9)$$

Так как  $D = \varepsilon \varepsilon_0 E$ , то для электрического смещения это условие запишется в виде:

$$\frac{D_{2\tau}}{D_{1\tau}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} . \quad (41.10)$$

2. При переходе через границу раздела двух сред нормальная составляющая электрического смещения не изменяется.

$$D_{2n} = D_{1n} . \quad (41.11)$$

Для напряжённости поля второе условие имеет вид:

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (41.12)$$

### 41.5 Практическое применение диэлектриков

С точки зрения применения диэлектрики разделяют на пассивные и активные.

**Пассивными** называются диэлектрики, которые сохраняют свои свойства при внешних воздействиях. Пассивные свойства диэлектрических материалов используются, когда их применяют в качестве электроизоляционных материалов и диэлектриков конденсаторов обычных типов. **Электроизоляционными материалами** называют диэлектрики, которые не допускают утечки электрических зарядов, т. е. с их помощью отделяют электрические цепи друг от друга. В этих случаях диэлектрическая проницаемость материала не играет особой роли. Если материал используется в качестве диэлектрика конденсатора определённой ёмкости и наименьших размеров, то желательно, чтобы этот материал имел большую диэлектрическую проницаемость. Одно из главных требований, предъявляемых к пассивным диэлектрикам, заключается в сохранении стабильности свойств при внешних воздействиях.

**Активными** называются диэлектрики, свойствами которых можно управлять с помощью внешних воздействий. Чем сильнее меняются свойства при внешних воздействиях, тем лучше активный диэлектрик выполняет свои функции.

Свойствами активных диэлектриков могут обладать как твердые кристаллические вещества, так и жидкие, и даже газообразные среды (активная среда газовых лазеров). По химическому составу они могут быть как органическими, так и неорганическими веществами. Диэлектрические кристаллы, как правило, обладают анизотропией\* свойств. Анизотропия может быть как естественной, так и специально созданной при технологической обработке материала.

По виду физических эффектов, которые используют для управления свойствами материалов, активные диэлектрики делят на сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электролюминофоры и др.

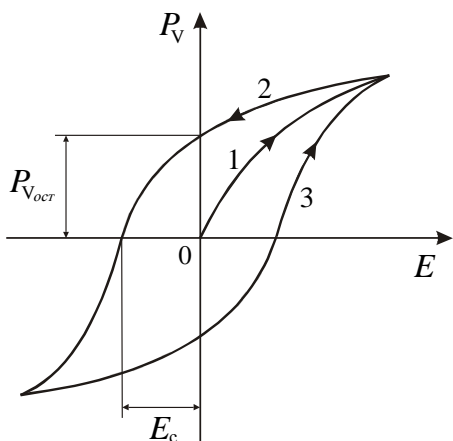


Рисунок 41.6

**Сегнетоэлектрики** — это диэлектрики, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля. Название материалов происходит от **сегнетовой соли** — вещества, у которого впервые были обнаружены нелинейные свойства. Сегнетоэлектрики обладают следующими свойствами:

1. Диэлектрическая проницаемость может достигать значений  $\approx 10^3$ .
2. Зависимость поляризованности  $P_v$  от напряжённости внешнего электрического поля  $E$  имеет нелинейный характер (кривая 1 на рис. 40.6). Следовательно, диэлектрическая проницаемость будет зависеть от напряжённости внешнего поля.

3. В сегнетоэлектриках наблюдается явление гистерезиса. **Гистерезис** (*гистерезис* (греч.) — запаздывание) — явление отставания изменения значений поляризованности сегнетоэлектрика от изменения напряжённости  $E$  переменного по величине и направлению внешнего электрического поля. При циклических изменениях поля зависимость  $P_v$  от  $E$  изображается кривой,

\*Анизотропия — зависимость ряда физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления.



которая называется *петлей гистерезиса*. С увеличением напряжённости электрического поля  $E$  поляризованность растёт, достигая насыщения (кривая 1, рис. 41.6). Уменьшение  $P_V$  с уменьшением  $E$  происходит по кривой 2. При  $E = 0$  сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризованность  $P_{V_{ост}}$ . Чтобы поляризованность стала равной нулю, надо приложить поле обратного направления ( $-E_c$ ). Величина  $E_c$  называется *коэрцитивной силой* (*coercitive* (лат.) – *удерживание*). Если  $E$  изменять дальше, то  $P_V$  изменяется по кривой 3.

4. Для каждого сегнетоэлектрика имеется температура, при которой он теряет свои необычные свойства и становится обычным диэлектриком. Эта температура называется *точкой Кюри\**. Сегнетова соль имеет две точки Кюри:  $-15^\circ\text{C}$  и  $+25^\circ\text{C}$ .

Свойства сегнетоэлектриков объясняются тем, что они имеют доменную структуру. *Домены* – области спонтанной (самопроизвольной) поляризации. В пределах домена дипольные моменты частиц параллельны друг другу. Направления поляризации разных областей бывают различны. Под действием внешнего поля моменты доменов поворачиваются как целое, устремляясь по направлению поля. Явление сегнетоэлектричества аналогично явлению ферромагнетизма и в англоязычной литературе носит название ферроэлектричества.

В настоящее время известно несколько сотен соединений, обладающих свойствами сегнетоэлектриков. Область применения сегнетоэлектриков – малогабаритные конденсаторы с большой удельной ёмкостью, пьезоэлектрические устройства, электрооптические системы, нелинейная оптика, различные температурные датчики, элементы памяти ЭВМ.

**Пьезоэлектрики** – диэлектрики, обладающие ярко выраженным пьезоэлектрическим эффектом. Различают прямой и обратный пьезоэффекты.

**Прямой пьезоэлектрический эффект** заключается в появлении на противоположных гранях кристаллов зарядов разного знака при их деформациях. Возникающий заряд линейно зависит от величины механического воздействия.

**Обратный пьезоэлектрический эффект** – изменение размеров диэлектрика под действием электрического поля. Относительная деформация линейно зависит от напряжённости электрического поля. Пьезоэлектриками могут быть только вещества с высоким удельным сопротивлением. Известно более тысячи веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, в том числе все сегнетоэлектрики. Но практическое применение имеет ограниченный круг материалов. Среди них видное место занимает кристаллический кварц. Так как запасы природного кварца ограничены, то кристаллы выращивают искусственно. Кроме этого применяют кристаллы сульфата лития, сегнетовой соли, танталата лития, а также пьезокерамику. Эта керамика широко используется для создания мощных ультразвуковых излучателей для гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки материалов. Ультразвуковые машины широко используются для чистки одежды. Механические колебания пьезопреобразователя этих машин передаются находящейся в резервуаре очистительной жидкости, заставляя её вибрировать с той же частотой.

Обратный пьезоэффект используется в машинах ультразвуковой сварки, в электромеханических затворах и различных клапанных устройствах (например, в сердечных насосах, в дизельных системах регулирования подачи топлива и др.), в наушниках слуховых аппаратов, в высокочастотных громкоговорителях. Пьезоэлектрические затворы характеризуются высоким быстродействием, высокой надёжностью и небольшими габаритными размерами.

Прямой пьезоэффект позволяет преобразовать механические колебания среды в электрические сигналы, поэтому его используют в устройствах, работающих в режиме приёма. Это сейсмоприёмники, микрофоны и телефоны, эхокардиографы, сканирующий акустический микроскоп высокого разрешения.

---

\*Кюри Пьер (1859–1906), французский физик, лауреат Нобелевской премии 1903 г.



**Пироэлектрики** – диэлектрики, которые изменяют свою спонтанную (самопроизвольную) поляризованность при изменении температуры. Температурное изменение спонтанной поляризованности обусловлено двумя основными причинами.

1. Повышение температуры нарушает упорядоченность в расположении дипольных моментов атомов.

2. Нагревание вызывает изменение линейных размеров диэлектрика, т. е. вызывает пьезоэлектрическую поляризацию, обусловленную деформацией.

Пироэлектрическими свойствами обладают турмалин, сульфат лития и все сегнетоэлектрические материалы. Одним из лучших пироэлектриков является триглицинсульфат.

Пироэффект в сегнетоэлектриках используют для создания тепловых датчиков и приёмников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного излучения. Принцип действия пироэлектрических фотоприёмников очень прост: лучистая энергия, попадая на зачёрнённую (поглощающую) поверхность активного элемента, нагревает его. В результате нагревания изменяется спонтанная поляризованность кристалла и возникает импульс тока, который регистрируется электронной схемой.

• **Давайте подумаем!**

**41.1.** Будет ли меняться с температурой диэлектрическая проницаемость веществ, содержащих жёсткие молекулярные диполи?

**41.2.** Проводит ли стекло электрический ток?

## §42 Проводники в электрическом поле

**Проводники** – вещества, в которых имеются носители заряда, способные перемещаться под действием сколь угодно малой силы. В металлических проводниках такими носителями являются электроны. Для того, чтобы заряды в проводнике находились в равновесии должны выполняться следующие условия.

1. Напряжённость поля внутри проводника всюду должна быть равна нулю:

$$\vec{E} = 0.$$

$E = -\frac{d\varphi}{dl} = 0$ , это значит, что  $\varphi = \text{const}$ . Потенциал внутри проводника должен быть постоянным.

2. Напряжённость поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности, так как касательная составляющая вектора  $\vec{E}$  вызвала бы перемещение носителей заряда по поверхности проводника. Это противоречит условию равновесия. Поэтому

$$\vec{E} = \vec{E}_n.$$

Линии напряжённости перпендикулярны поверхностям равного потенциала, поэтому в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной. Таким образом, потенциал  $\varphi$  во всех точках проводника будет иметь одно и то же значение, т. е. эквипотенциальная поверхность вырождается в эквипотенциальный объём.

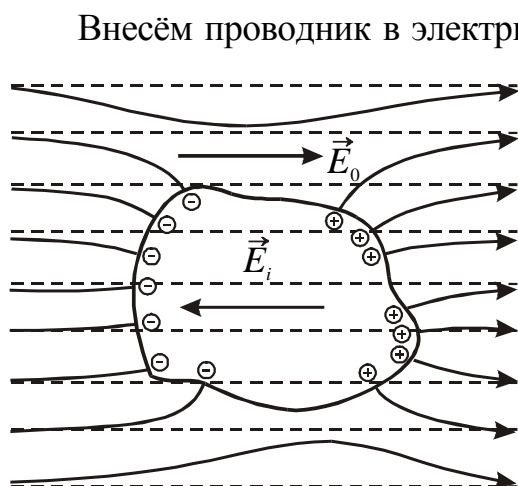


Рисунок 42.1

Внесём проводник в электрическое поле. Под действием поля носители заряда начинают перемещаться. В результате их перемещения у концов проводника возникают заряды противоположного знака (рис. 42.1). Их называют **индуцированными**. **Перераспределение зарядов в проводнике под действием внешнего электростатического поля называется электростатической индукцией.**

Поле индуцированных зарядов  $\vec{E}_i$  противоположно направлению внешнего поля  $\vec{E}_0$ . Перераспределение за-

рядов происходит до тех пор, пока напряжённость поля внутри проводника не станет равной нулю

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_i = 0,$$

$$E = E_0 - E_i = 0,$$

а линии напряжённости вне проводника – перпендикулярными к поверхности.

Индукционные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника сделать полость, то напряжённость поля в этой полости равна нулю, независимо от того, какое поле имеется снаружи.

На этом принципе основано **явление электростатической защиты**. Когда прибор хотят защитить от внешних полей, его окружают проводящим экраном. Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами. Экран действует и в том случае, если он не сплошной, а выполнен в виде сетки.

### **Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Сетка Кольбе.

<http://www.youtube.com/watch?v=NMb3E2Ar4L0>

2. Клетка Фарадея.

<http://www.youtube.com/watch?v=63TtyTc9flo>

• **Давайте подумаем!**

**42.1.** Чему равны напряжённость поля и потенциал внутри заряженного шарового проводника?

**42.2.** Положительно заряженное тело притягивает подвешенный на нити легкий шаровой проводник. Можно ли заключить отсюда, что проводник заряжен отрицательно?

**42.3.** Какой принцип используется при устройстве электростатической защиты?

**42.4.** Чем объяснить, что при промышленном изготовлении пороха его обволакивают порошком графита?

## §43 Электроёмкость. Энергия электрического поля

### 43.1 Электроёмкость уединённого проводника

Если уединённому проводнику сообщить заряд  $dq$ , то потенциал этого проводника изменится. Изменение потенциала  $d\varphi$  пропорционально сообщённому заряду:

$$d\varphi = \frac{1}{C} dq, \quad (43.1)$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности, называемый электрической ёмкостью.

**Электрическая ёмкость (электроёмкость) – скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и численно равная заряду, сообщенное которому проводнику изменяет его потенциал на один вольт:**

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (43.2)$$

$$[C] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф} \quad (\text{фарад}^*).$$

Фарад – это очень большая величина. Такой ёмкостью обладал бы шар радиуса  $9 \cdot 10^9$  м, т.е. радиуса в 1500 раз больше радиуса Земли.

На практике ёмкость измеряют в миллифарадах (мФ), микрофарадах (мкФ), нанофарадах (нФ) и пикофарадах (пФ).

Электроёмкость зависит от геометрии проводника и диэлектрической проницаемости среды, окружающей проводник.

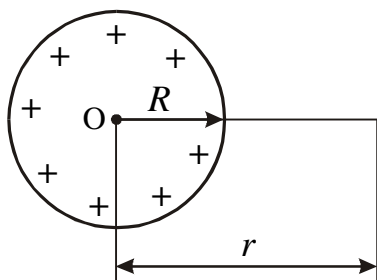


Рисунок 43.1

**Пример.** Рассчитаем электроёмкость уединенной проводящей сферы (рис. 43.1). Если сообщить сфере заряд  $q$ , то для расстояния  $r > R$ , её потенциал определяется соотношением:

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}. \quad (43.3)$$

На поверхности сферы, т.е. при  $r = R$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon R}.$$

Тогда

$$C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R.$$

Таким образом, электроёмкость сферы вычисляется по формуле:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R. \quad (43.4)$$

\*Фарадей Майкл (1791–1867), английский физик.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Влияние диэлектрика на электроёмкость.

<http://www.youtube.com/watch?v=ERsFC-sXfho>**43.2 Конденсаторы**

Уединённые проводники имеют небольшую ёмкость. Например, шар размером с Землю имеет ёмкость 700 мкФ. На практике необходимы устройства, способные накапливать на себе («конденсировать») большие заряды. Их называют конденсаторами.

**Конденсатор** – это система из двух проводников, заряженных разноимёнными, равными по модулю зарядами. Проводники расположены близко друг к другу и разделены диэлектриком.

Условное обозначение на схемах: 

Образующие конденсатор проводники называют **обкладками**. Чтобы внешние тела не оказывали влияния на электроёмкость конденсатора, обкладкам придают такую форму и так их располагают, чтобы поле было сосредоточено внутри конденсатора. Этому условию отвечают:

- две пластины, расположенные близко друг к другу;
- два коаксиальных цилиндра;
- две концентрические сферы.

Соответственно, по форме конденсаторы бывают:

- плоские;
- цилиндрические;
- сферические.

Основной характеристикой конденсатора является электроёмкость  $C$ . По определению, электроёмкость равна отношению заряда на конденсаторе к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}, \quad (43.5)$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$  – напряжение между обкладками;

$q$  – заряд положительной обкладки.

Величина электроёмкости конденсатора определяется формой, размерами обкладок и величиной зазора между ними, а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками.

Приведём формулы для расчёта электроёмкости некоторых видов конденсаторов.

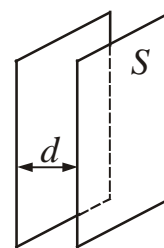


Рисунок 43.2

## 1. Плоский конденсатор (рис. 43.2).

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (43.6)$$

где  $S$  – площадь обкладки;

$d$  – расстояние между обкладками;

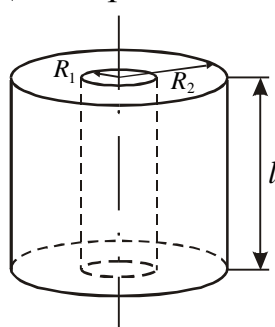
$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды (диэлектрика), которая находится между обкладками.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Зависимость электроёмкости плоского конденсатора от его геометрических параметров.

<http://www.youtube.com/watch?v=1N9Xkl-dd8k>

## 2. Цилиндрический конденсатор (рис. 43.3).



$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (43.7)$$

где  $l$  – длина конденсатора;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы внутренней и внешней обкладок.

Рисунок 43.3

## 3. Сферический конденсатор

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}, \quad (43.8)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы внутренней и внешней обкладок.

Помимо ёмкости каждый конденсатор характеризуется предельным напряжением  $U_{\max}$ , которое можно прикладывать к обкладкам конденсатора, не опасаясь пробоя. При превышении этого напряжения между обкладками проскакивает искра, в результате чего разрушается диэлектрик и конденсатор выходит из строя.

Конденсаторы можно соединять в батареи различными способами.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 43.4) они соединяются разноимённо заряженными обкладками. При этом выполняются следующие соотношения:

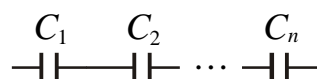
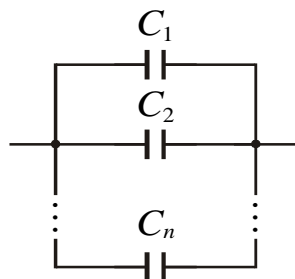


Рисунок 43.4

$$\begin{aligned} q_{\text{общ}} &= q_1 = q_2 = \dots = q_n \\ U &= U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \end{aligned} \quad (43.9)$$

Результирующая электроёмкость всегда меньше минимальной электроёмкости, входящей в батарею. При последовательном соединении уменьшается возможность пробоя конденсаторов, потому что на каждом конденсаторе имеется лишь часть общей разности потенциалов, поданной на всю батарею.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 43.5) соединяются одноимённые обкладки. При этом выполняются соотношения:



$$q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (43.10)$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Рисунок 43.5

Параллельное соединение конденсаторов используют для получения больших электроёмкостей.

### 43.3 Энергия электрического поля

#### 1. Энергия заряженного уединённого проводника.

Рассмотрим уединённый заряженный проводник. Обозначим:

$q$  – заряд проводника,  $C$  – электроёмкость,  $\varphi$  – потенциал.

Увеличим заряд этого проводника на  $dq$ . При перенесении заряда  $dq$  из бесконечности на уединённый проводник нужно совершить элементарную работу против сил поля

$$\delta A = \varphi dq = C \varphi d\varphi,$$

где  $dq = C d\varphi$ .

Полная работа

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} C \varphi d\varphi.$$

Если заряжаем от нулевого потенциала  $\varphi = 0$  до потенциала  $\varphi$ , то

$$A = \int_0^{\varphi} C \varphi d\varphi = \frac{C \varphi^2}{2}.$$

По закону сохранения энергии

$$A = \Delta W,$$

где

$$\Delta W = W_2 - W_1.$$

Учитывая, что  $W_1 = 0$  (т. к.  $\varphi_1 = 0$ ), получим

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2}. \quad (43.11)$$

## 2. Энергия заряженного конденсатора.

Как всякий заряженный проводник, конденсатор обладает энергией. Энергия заряженного конденсатора определяется соотношениями, аналогичными (43.11):

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \quad (43.12)$$

Формулу для энергии поля конденсатора можно преобразовать, используя величины, характеризующие электрическое поле.

Емкость плоского конденсатора  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ . Напряжение на обкладках конденсатора связано с напряжённостью электрического поля соотношением

$$U = Ed.$$

Подстановка в формулу (43.12) даёт:

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V, \quad (43.13)$$

где  $V = Sd$  – объём конденсатора.

Если поле однородно (что имеет место в плоском конденсаторе), то заключённая в нём энергия распределяется в пространстве с постоянной плотностью.

**Величина, равная отношению энергии поля к занимаемому полем объёму, называется объёмной плотностью энергии.**

$$w = \frac{W}{V}. \quad (43.14)$$

Для электрического поля:

$$w_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (43.15)$$

Формула (43.12) связывает энергию с ёмкостью конденсатора, а формула (43.15) – объёмную плотность энергии с напряжённостью электрического поля.

Электростатика не может ответить на вопрос, о том, что является носителем энергии – заряд или поле? В электростатике поля и обусловившие их заряды неотделимы друг от друга. Дальнейшее развитие теории и эксперимента показало, что переменные во времени электрические и магнитные поля могут существовать независимо от возбуждивших их зарядов и распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн, перенося энергию. Это значит, что носителем энергии является поле.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Энергия заряженного конденсатора.

<http://www.youtube.com/watch?list=PLWM8IO-3TQjNa2fj4KhZVDfvzQkCta97l&v=4HPhCLOwAAs>

- **Давайте подумаем!**

**43.1.** Всегда ли электроёмкости двух одинаковых изолированных проводников будут одинаковыми?

**43.2.** Параллельно источнику постоянного электропитания присоединён конденсатор. 1) Почему каждая из его обкладок получает в точности одинаковый заряд? 2) Будет ли заряд одинаков, если размеры обкладок будут различны?

**43.3.** Как изменится электроёмкость плоского конденсатора, если между его обкладками будет вдвинута пластинка из диэлектрика?

**43.4.** Какую опасность представляют обесточенные цепи с имеющимися в них конденсаторами? Что следует сделать после размыкания такой цепи?

**43.5.** Можно ли, имея два одинаковых конденсатора, получить электроёмкость вдвое меньшую и вдвое большую, чем у одного конденсатора? Если можно, то как это сделать?

**43.6.** Можно ли увеличить энергию заряженного плоского раздвижного конденсатора не изменяя его заряда?

**43.7.** Воздушный конденсатор заряжается до некоторого потенциала, отключается от источника и в заряженном состоянии заливается керосином, отчего энергия конденсатора уменьшается в  $\epsilon$  раз. Куда «исчезает» остальная энергия?

## **Глава 12. Постоянный электрический ток**

### **§44 Электрический ток. Характеристики тока**

*Электрическим током* называется упорядоченное движение электрических зарядов.

Для протекания тока необходимо наличие в проводнике (или в данной среде) заряженных частиц, которые могут перемещаться в пределах всего проводника. Такие частицы называются *носителями заряда*. Ими могут быть электроны, ионы или макроскопические частицы, несущие на себе заряд, например, заряженные пылинки. Ток возникает при условии, что внутри проводника существует электрическое поле.

Ток, возникающий в проводящих средах, называется *током проводимости*. Примером тока проводимости является ток в металлах. Для существования постоянного электрического тока проводимости необходимо выполнение следующих условий:

1. Наличие свободных носителей заряда.
2. Наличие внешнего электрического поля, энергия которого должна расходоваться на упорядоченное перемещение электрических зарядов.
3. Цепь постоянного тока проводимости должна быть замкнутой.



Количественной характеристикой электрического тока является сила тока.

**Сила тока ( $i$ ) – скалярная физическая величина, численно равная заряду, переносимому через поперечное сечение проводника за единицу времени.**

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (44.1)$$

$[i] = \text{А}$  (ампер\*).

За направление тока принимается направление перемещения положительных зарядов. Если сила тока и его направление не изменяются, то ток называется постоянным. Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (44.2)$$

Другой характеристикой тока является плотность тока.

**Плотность тока ( $\vec{j}$ ) – векторная физическая величина, численно равная электрическому заряду, переносимому за единицу времени через единичную площадку  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению движения носителей заряда:**

$$j = \frac{dq}{dt \cdot dS_{\perp}} = \frac{di}{dS_{\perp}}. \quad (44.3)$$

Для постоянного тока

$$j = \frac{I}{S}, \quad (44.4)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

$$[j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

За направление вектора плотности тока принимается направление движения положительных носителей заряда.

$$\vec{j} = j \cdot \frac{\vec{v}}{v}, \quad (44.5)$$

где  $\vec{v}$  – скорость движения положительных частиц.

Предположим, что в единице объёма проводника содержится  $n$  носителей тока (это концентрация), а их заряд равен  $e$ . Под действием электрического поля носители тока приобретают среднюю скорость  $\langle v \rangle$ . За единицу времени через единичную площадку они перенесут заряд  $en\langle v \rangle$  (это плотность тока). Таким образом, для плотности тока получим выражение:

---

\*Ампер Андре Мари (1775–1836), французский физик, математик и химик.

$$\vec{j} = en\langle \vec{v} \rangle. \quad (44.6)$$

Если ток создается носителями обоих знаков, то

$$\vec{j} = e_+ n_+ \vec{v}_+ + e_- n_- \vec{v}_-.$$

В скалярном виде:

$$j = e_+ n_+ \langle v_+ \rangle + e_- n_- \langle v_- \rangle. \quad (44.7)$$

где  $n_+$  и  $n_-$  – концентрации положительных и отрицательных носителей заряда;  $\langle v_+ \rangle$  и  $\langle v_- \rangle$  – средние скорости направленного движения.

Зная вектор плотности тока в каждой точке пространства, можно найти силу тока через произвольное сечение  $S$ :

$$i = \int_S \vec{j} d\vec{S}. \quad (44.8)$$

• Давайте подумаем!

**44.1.** Возникнет ли ток в проводнике, которым соединили металлические шары разных радиусов, если им сообщить одинаковые отрицательные заряды?

## §45 Электродвижущая сила. Напряжение

Если проводник поместить в электростатическое поле, то под действием этого поля свободные отрицательные заряды начнут перемещаться из мест с меньшим потенциалом в места с большим потенциалом (см. §42). Противоположные концы проводника приобретут соответственно отрицательные и положительные (индуцированные) заряды. При таком распределении зарядов напряжённость электрического поля внутри проводника станет равной нулю, а потенциалы всех точек проводника станут одинаковы. Это означает, что движение зарядов (ток) прекратится. Таким образом, **электростатическое поле не может поддерживать в проводнике постоянный электрический ток.**

Для поддержания в проводниках постоянного тока необходимо совершить работу против сил электрического поля, стремящегося выровнять потенциалы всех точек внутри проводника. Такая работа может совершаться только за счёт сил, имеющих не электростатическую природу, то есть за счёт некоторого запаса механической, тепловой или химической энергии.

Силы, поддерживающие постоянный электрический ток называются **сторонними электродвижущими силами**. Устройства, предназначенные для получения сторонних электродвижущих сил, называются **источниками эдс**.

Работа по перемещению заряда по проводнику в процессе протекания по нему электрического тока совершается и кулоновскими, и сторонними силами. Полная работа по перемещению заряда

$$A = A_{\text{кул}} + A_{\text{стор}}. \quad (45.1)$$

Разделим обе части на величину переносимого заряда  $q$ :

$$\frac{A}{q} = \frac{A_{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (45.2)$$

Величина, равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на данном участке, называется **напряжением** на данном участке.

$$U = \frac{A}{q}. \quad (45.3)$$

$$[U] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В (вольт)}.$$

Величина, равная работе, совершаемой сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда внутри источника от отрицательного полюса к положительному, называется **электродвижущей силой** (эдс).

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (45.4)$$

Электродвижущая сила служит мерой способности источников вызывать электрический ток. Она, также как и напряжение, измеряется в вольтах.

Напомним, что отношение

$$\frac{A_{\text{кул}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (45.5)$$

Подставив записанные выражения в (45.2), получим:

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon. \quad (45.6)$$

Напряжение на участке цепи (рис. 45.1) равно сумме разности потенциалов и электродвижущей силы.

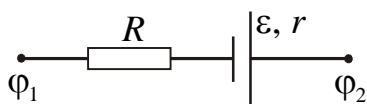


Рисунок 45.1

Участок, на котором на носители заряда действуют сторонние силы, называют **неоднородным**. Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называют **однородным**.

Для однородного участка ( $\varepsilon = 0$ ):

$$U = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (45.7)$$

т. е. напряжение на однородном участке совпадает с разностью потенциалов на концах участка.

- Давайте подумаем!

**45.1.** В чём заключается различие между эдс и разностью потенциалов? При каких условиях напряжение на зажимах батареи выше, чем её эдс?

## §46 Закон Ома

### 46.1 Закон Ома для однородного участка цепи. Сопротивление

Немецкий физик Г. Ом\* экспериментально установил закон, согласно которому *сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению на этом проводнике.*

$$I = \frac{U}{R}, \quad (46.1)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление.

$[R] = \text{Ом}$ .

*Электрическое сопротивление ( $R$ ) – скалярная физическая величина, характеризующая свойство проводника противодействовать пропусканию электрического тока и равная отношению напряжения  $U$  на концах проводника к силе тока  $I$ , протекающего по нему.*

$$R = \frac{U}{I}. \quad (46.2)$$

Сопротивление проводников, наличие электрического тока в которых приводит к выделению тепла, называется **омическим** или **активным**.

Сопротивление проводника зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Для однородного цилиндрического проводника оно может быть рассчитано по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (46.3)$$

где  $l$  – длина проводника;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление.

*Удельное электрическое сопротивление проводника ( $\rho$ ) – величина, характеризующая материал проводника и численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения.*

$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$ .

Сопротивление металлов зависит от температуры. С большой степенью точности можно считать, что зависимость сопротивления металлов от температуры является линейной:

---

\*Ом Георг Симон (1787–1854), немецкий физик.

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (46.4)$$

где  $R$  – сопротивление при температуре  $t^\circ\text{C}$ ,  
 $R_0$  – сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

**Температурный коэффициент сопротивления** – величина, численно равная отношению изменению сопротивления проводника при изменении температуры на 1 градус.

Для чистых металлов температурный коэффициент представляет величину порядка  $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$ . Для некоторых электротехнических сплавов (манганин, константан)  $\alpha$  настолько мало, что им можно пренебречь и в достаточно широком интервале температур считать сопротивление независимым от температуры.

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Зависимость сопротивления металлов от температуры.

<http://www.youtube.com/watch?v=NL1vjrwQNX8>

2. Опыты с жидким азотом: уменьшение сопротивления металла.

<http://www.youtube.com/watch?v=kjhNxoMrN7c>

Величина  $G$ , обратная сопротивлению, называется **электропроводностью**.

$$G = \frac{1}{R}. \quad (46.5)$$

$$[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См} \quad (\text{сименс}).$$

При рассмотрении физической природы удельного электрического сопротивления используют понятие **удельной электрической проводимости (электропроводности)**  $\sigma$ . Удельная электропроводность  $\sigma$  связана с удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  соотношением:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (46.6)$$

$$[\sigma] = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} = \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

Зависимость силы тока от напряжения называется **вольт-амперной характеристикой (ВАХ)**. Для металлов эта зависимость имеет линейный характер (рис. 46.1).

Для неомических элементов ВАХ имеет нелинейный характер.

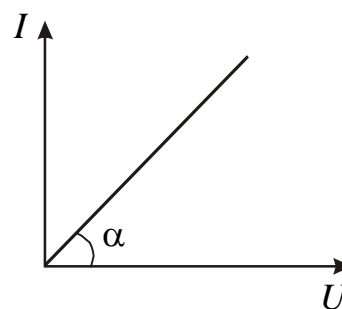


Рисунок 46.1

\*Сименс Эрнст Вернер (1816–1892), немецкий электротехник и промышленник, иностранный член-корреспондент Петербургской академии наук с 1882 г.

При **последовательном соединении** проводников конец предыдущего проводника соединяется с началом последующего и между проводниками ток не разветвляется (рис. 46.2).

Если  $n$  проводников сопротивлением  $R_1, R_2, \dots, R_n$  соединены между собой последовательно, то через проводники течёт одинаковый ток и напряжение на концах соединения равно сумме напряжений на отдельных проводниках.

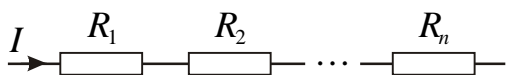


Рисунок 46.2

$$\begin{aligned} I &= I_1 = I_2 = \dots = I_n \\ U &= U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ R &= R_1 + R_2 + \dots + R_n \end{aligned} \quad (46.7)$$

Если начала проводников соединены в одной точке (узле), а концы в другой, то соединение называют **параллельным** (рис. 46.3).

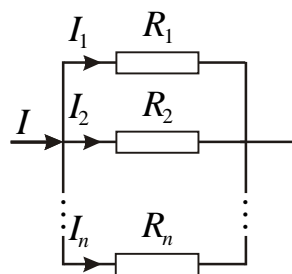


Рисунок 46.3

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + \dots + I_n \\ U &= U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \end{aligned} \quad (46.8)$$

При параллельном соединении проводников сила тока в неразветвлённой части цепи равна сумме сил токов, текущих в разветвлённых участках цепи, напряжение на параллельно соединённых участках цепи одинаково.

## 46.2 Закон Ома для неоднородного участка

Ранее было показано (см. формулу (45.6)), что напряжение между двумя точками электрической цепи измеряется работой, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении по цепи единичного положительного заряда из первой точки во вторую, т. е. равно сумме разности потенциалов и электродвижущей силы:

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon.$$

Тогда

$$I = \frac{U}{R} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon}{R}, \quad (46.9)$$

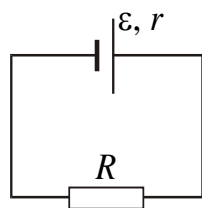
или

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon. \quad (46.10)$$

Выражение (46.9) называется **законом Ома для неоднородного участка**.

При отсутствии сторонних сил величины  $U$  и  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  совпадают. Поэтому в задачах электростатики и задачах на ток, где рассматриваются участки цепи, не содержащие эдс, понятия напряжения и разности потенциалов часто отождествляют.

Если цепь содержит источник, эдс которого  $\varepsilon$ , и при этом замкнута, то  $\varphi_1 = \varphi_2$ . Для замкнутой цепи (рис. 46.4) закон Ома примет вид:



$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (46.11)$$

где  $r$  – сопротивление источника эдс;  
 $R$  – сопротивление нагрузки;  
 $(R + r)$  – полное сопротивление цепи.

Рисунок 46.4

Из приведённого выше определения напряжения следует, что при наличии сторонних сил его необходимо применять всегда к конкретному участку цепи, соединяющему данные точки.

Чтобы безошибочно применять закон Ома (46.10) для участка цепи, содержащего эдс, необходимо придерживаться следующих правил:

а) начертить схему и обозначить на ней полюса всех источников, а также направление тока в цепи (если оно неизвестно, то надо указать предполагаемое направление);

б) ток считать положительным на заданном участке 1-2, если он направлен от точки 1 к точке 2;

в) эдс считать положительной на участке 1-2, если она повышает потенциал в направлении от точки 1 к точке 2, т. е. при мысленном движении вдоль пути 1-2 сначала встречается отрицательный полюс источника, а потом положительный.

### 46.3 Закон Ома в дифференциальной форме

Преобразуем закон Ома для участка цепи (см. формулу (46.1)). Заменим силу тока через плотность тока:

$$I = jS;$$

напряжение на концах проводника – через напряжённость поля:

$$U = El;$$

сопротивление – через геометрические размеры проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Сделаем подстановку в формулу (46.1):

$$jS = \frac{El}{\rho \frac{l}{S}}.$$

Проведя сокращения, получим

$$j = \frac{E}{\rho}. \quad (46.12)$$

С учётом формулы (46.6) выражение (46.12) можно переписать в виде:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (46.13)$$

**Плотность тока пропорциональна напряжённости поля в данной точке проводника.** Это выражение называется **законом Ома в дифференциальной форме**.

• Давайте подумаем!

**46.1.** Выполняется ли зависимость  $U = IR$  для неомических сопротивлений?

**46.2.** Почему величина пускового тока в лампе накаливания больше рабочего?

## §47 Разветвлённые цепи. Правила Кирхгофа

Расчёт разветвлённых электрических цепей постоянного тока значительно упрощается, если использовать правила, сформулированные Кирхгофом\*. Они устанавливают соотношения между токами и напряжениями. Этих правил два. Первое относится к узлам цепи. **Узлом** называется точка, в которой сходится более чем два проводника (рис. 47.1).

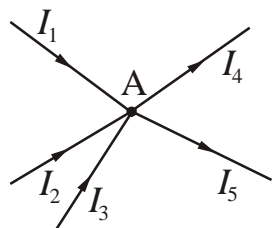


Рисунок 47.1

**Первое правило:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, т. е.

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = \sum_{i=1}^N I_i = 0. \quad (47.1)$$

Токи считаются положительными, если они подходят к узлу. Токи, отходящие от узла, считаются отрицательными.

Для узла А, изображённого на рис. 47.1, первое правило запишется следующим образом:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

**Второе правило:** в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвлённой электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов  $I_i$  на сопротивления  $R_i$  соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме имеющихся в контуре эдс:

$$\sum_{i=1}^N I_i R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i,$$

\*Кирхгоф Густав Роберт (1824–1887), немецкий физик.



где  $I_i$  – сила тока на  $i$ -м участке;  $R_i$  – активное сопротивление  $i$ -го участка;  $\varepsilon_i$  – ЭДС источников тока на  $i$ -м участке;  $N$  – число участков, содержащих активное сопротивление;  $k$  – число источников тока.

Расчёт разветвлённой цепи постоянного тока проводится в такой последовательности:

- 1) произвольно выбираются направления токов во всех участках цепи и направление обхода контура;
- 2) записываются  $(n - 1)$  независимых уравнений правила узлов, где  $n$  – число узлов в цепи;

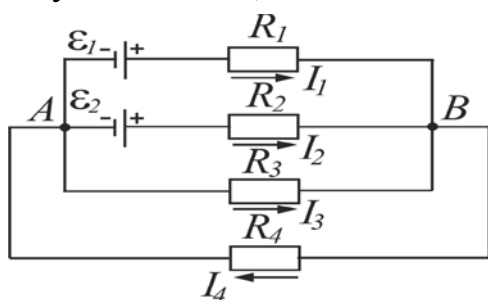


Рисунок 47.2

- 3) произвольные замкнутые контуры выделяются так, чтобы каждый новый контур содержал, по крайней мере, один участок цепи, не входящий в ранее рассмотренные контуры;
- 4) если токи совпадают с выбранным направлением обхода контура, то они считаются положительными. ЭДС считаются положительными, если они повышают потенциал в направлении обхода контура.

Для контура  $AR_1BR_2A$  (рис. 47.2) второе правило Кирхгофа запишется следующим образом:

$$I_1(R_1 + r_1) - I_2(R_2 + r_2) = \varepsilon_1 - \varepsilon_2,$$

где  $r_i$  – сопротивление  $i$ -го источника. Контур обходили по часовой стрелке.

## §48 Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца.

### Закон Видемана – Франца

**Работа и мощность тока.** При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу. Её принято называть **работой тока**.

Рассмотрим произвольный участок цепи постоянного тока, к концам которого приложено напряжение  $U$ . За время  $t$  через сечение проводника проходит заряд  $q = It$ . Это равносильно тому, что заряд  $It$  переносится за время  $t$  из одного конца проводника в другой. При этом силы электростатического поля и сторонние силы, действующие на данном участке, совершают работу:

$$A = Uq = UI t. \quad (48.1)$$

Разделив работу  $A$  на время  $t$ , за которое она совершается, получим **мощность, развиваемую током** на рассматриваемом участке цепи:

$$P = UI. \quad (48.2)$$

Эта мощность может расходоваться на совершение рассматриваемым участком цепи работы над внешними телами, на протекание химических реакций, на нагревание данного участка цепи и т. д.

**Закон Джоуля – Ленца.** Если проводник неподвижен и в нём не происходит химических превращений, то работа поля по перемещению зарядов идёт на изменение внутренней энергии проводника, т. е. проводник нагревается. При этом выделяется количество тепла:

$$Q = A = IU t.$$

По закону Ома  $U = IR$ . Сделав замену, получаем

$$Q = I^2 R t. \quad (48.3)$$

Данное соотношение называется **законом Джоуля\* – Ленца\***.

**Количество тепла, выделяющееся в проводнике при прохождении через него электрического тока, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени, в течение которого поддерживается ток в проводнике.**

Если сила тока изменяется с течением времени, то

$$Q = \int_0^t i^2(t) R dt. \quad (48.4)$$

От формулы (48.3), определяющей тепло, выделяющееся во всём проводнике, можно перейти к выражению, характеризующему выделение тепла в различных местах проводника. Так как сопротивление равно

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

а ток

$$I = j S,$$

то за время  $dt$  выделится тепло:

$$dQ = I^2 R dt = (jS)^2 \cdot \rho \frac{l}{S} dt = j^2 \rho l S dt, \quad (48.5)$$

где  $lS = V$  – объём проводника.

Разделив (48.5) на произведение  $V dt$ , найдём количество тепла  $Q_{уд}$ , выделяющееся в единице объёма за единицу времени (удельную тепловую мощность):

$$Q_{уд} = j^2 \rho. \quad (48.6)$$

Формула (48.6) представляет собой дифференциальную форму записи закона Джоуля – Ленца.

---

\*Джоуль Джеймс Прескотт (1818–1889), английский физик.

\*Ленц Эмиль Христиан (1804–1865), российский физик.

**Закон Видемана – Франца.** Эксперименты показывают, что металлы обладают не только высокой электропроводностью, но и высокой теплопроводностью. В 1853 году Г. Видеман\* и Р. Франц\* экспериментально установили связь между коэффициентом теплопроводности и удельной проводимостью металлов.

**Отношение коэффициента теплопроводности  $K$  к удельной проводимости  $\sigma$  для всех металлов примерно одинаково и пропорционально абсолютной температуре.**

$$\frac{K}{\sigma} = 3 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T, \quad (48.7)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона.

Если подставить численные значения постоянных  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К и  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, то получим:

$$\frac{K}{\sigma} = 2,23 \cdot 10^{-8} T. \quad (48.7)$$

При  $T=300$  К получилось значение, которые хорошо совпадает с экспериментальными данными: для алюминия это отношение равно  $5,8 \cdot 10^{-6}$ , для меди –  $6,4 \cdot 10^{-6}$ , для свинца –  $7,0 \cdot 10^{-6}$  Дж·Ом/(с·К).

Превращение электрической энергии в тепловую нашло широкое применение в технике. Оно происходит, например, в различных производственных и бытовых электронагревательных приборах (электрических печах, электроплитах, электрических паяльниках и пр.), в электрических лампах накаливания, аппаратах для электрической сварки и пр. Но во многих электрических устройствах, превращение электрической энергии в тепло вредно, так как это тепло не только не используется, а наоборот, ухудшает работу этих машин и аппаратов, а в некоторых случаях может вызвать повреждения и аварии.

Каждый проводник в зависимости от условий, в которых он находится, может пропускать, не перегреваясь, ток силой, не превышающей некоторое допустимое значение. Для определения токовой нагрузки проводов часто пользуются понятием допустимой плотности тока  $\vec{j}$ .

Допустимая плотность тока зависит от материала провода (медь или алюминий), вида применяемой изоляции, условий охлаждения, площади поперечного сечения и пр. Например, допустимая плотность тока в проводах обмоток электрических машин не должна превышать  $3 - 6$  А/мм<sup>2</sup>, в нити осветительной электрической лампы –  $15$  А/мм<sup>2</sup>. В проводах силовых и осветительных сетей плотность тока может быть различной в зависимости от площади поперечного сечения провода и его изоляции. Например, для медных проводов с резиновой изоляцией и площадью поперечного сечения  $4$  мм<sup>2</sup> допускается плотность тока  $10,2$  А/мм<sup>2</sup>, а  $50$  мм<sup>2</sup> – только  $4,3$  А/мм<sup>2</sup>; для неизолированных проводов тех же площадей сечения –  $12,5$  и  $5,6$  А/мм<sup>2</sup>.

Превышение допустимого значения силы тока в проводнике может вызвать чрезмерное повышение температуры, в результате этого изоляция проводов электродвигателей, генераторов и электрических сетей обугливается и даже горит, что может привести к короткому замыканию и пожару. Неизолированные же провода могут при высокой температуре расплавиться и оборваться.

\*Видеман Густав Генрих (1826–1899), немецкий физик.

\*Франц Рудольф (1827–1902), немецкий физик.

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Плавкий предохранитель. Пережигание проволоки.

[http://www.youtube.com/watch?v=1SJ\\_NFRYPjg](http://www.youtube.com/watch?v=1SJ_NFRYPjg)

2. Закон Джоуля – Ленца. Цепочка из различных металлов.

<http://www.youtube.com/watch?v=N638UEoSRy0>

• Давайте подумаем!

**48.1.** Почему при одной и той же величине тока тонкая проволока нагревается сильнее, чем толстая?

**48.2.** Какой провод лучше всего применять для электрических нагревательных приборов?

**48.3.** Для чего служат плавкие предохранители? Что выдерживает бóльший ток: плавкий предохранитель или цепь, в которую он включен?

**48.4.** Какими специальными характеристиками должны обладать: а) провод спирали нагревательного прибора и б) провод в плавком предохранителе?

**48.5.** Перегоревшую спираль плитки при ремонте немного укоротили. Как это отразилось на работе плитки?

## §49 Элементарная классическая теория электропроводности металлов

Результаты многочисленных экспериментов доказали, что перенос заряда в металлах осуществляется электронами, открытыми в 1897 году Дж. Томсоном\*. Электроны перемещаются по металлу практически свободно. Существование свободных электронов объясняется тем, что при образовании кристаллической решётки от атомов отрываются валентные электроны, которые находятся на внешних электронных оболочках и слабо связаны с ядрами атомов. Оторвавшиеся электроны становятся собственностью всего куска металла, образуя так называемый *электронный* газ.

На основе представлений о свободных электронах П. Друде\* была создана классическая теория электропроводности металлов. Затем её усовершенствовал Х. Лоренц\*, поэтому эту теорию называют теорией Друде – Лоренца.

Согласно классической теории электропроводности металлов электроны проводимости ведут себя подобно молекулам идеального газа. В промежутках между столкновениями они движутся свободно, пробегая некоторый путь, который называется длиной свободного пробега. Основные положения теории Друде – Лоренца сводятся к следующему.

1. В отличие от молекул газа электроны сталкиваются не между собой, а с ионами, образующими кристаллическую решётку. Именно этими соударениями свободных электронов с ионами обусловлено электрическое сопротивление металлов.

---

\* Томсон Джозеф Джон (1856–1940), английский физик, лауреат Нобелевской премии 1906 г.

\* Друде Пауль Карл Людвиг (1863–1906), немецкий физик.

\* Лоренц Хендрик Антон (1853–1928), нидерландский физик.

2. Столкнувшись с ионом, электрон полностью передаёт приобретённую энергию решётке. Сообщенная решётке энергия идёт на увеличение внутренней энергии металла. Проявлением данного факта является нагревание проводника при прохождении по нему тока.

3. Теплопроводность металлов значительно выше теплопроводности неметаллических кристаллов. Из этого следует, что теплопередача в металлах осуществляется в основном не кристаллической решёткой, а свободными электронами.

Классическая теория электропроводности смогла объяснить законы Ома и Джоуля – Ленца, а также дала качественное объяснение закона Видемана – Франца. Наряду с этим она встретила с существенными затруднениями:

1. Если электрон ведёт себя как молекула, то его скорость должна быть пропорциональна  $\sqrt{T}$ . Тогда и сопротивление должно расти пропорционально  $\sqrt{T}$ . Этот вывод противоречит опытным фактам, в соответствии с которыми зависимость сопротивления от температуры является линейной.

2. Из классической теории электропроводности следует, что молярная теплоёмкость металлов должна быть в 1,5 раза выше, чем у диэлектриков. Но на практике теплоёмкости металлов и неметаллических кристаллов заметно не отличаются.

Эти несоответствия объяснила квантовая теория металлов.

В качестве примера рассмотрим, как можно вывести закон Ома в дифференциальной форме, пользуясь основными положениями классической теории электропроводности металлов.

В промежутках между столкновениями с ионами кристаллической решётки электроны движутся свободно, пробегая некоторый путь, называемый длиной свободного пробега. При включении поля на хаотическое тепловое движение, которое происходит со скоростью  $\langle u \rangle$ , накладывается упорядоченное (направленное) движение электронов. Обозначим скорость направленного движения через  $\langle v \rangle$ .

Плотность тока связана со средней скоростью направленного движения следующим соотношением (см. формулу (44.6)):

$$j = en \langle v \rangle, \quad (49.1)$$

где  $n$  – концентрация электронов проводимости,  $e$  – заряд электрона.

Предположим, что электрическое поле, ускоряющее электроны, однородно. Со стороны этого поля на электрон действует сила

$$F = eE, \quad (49.2)$$

где  $E$  – напряжённость поля.

По второму закону Ньютона

$$F = ma. \quad (49.3)$$

Подставим (49.2) в (49.3) и найдём ускорение, которое получит электрон:

$$a = \frac{eE}{m}. \quad (49.4)$$

К концу пробега скорость направленного движения электронов в среднем достигнет значения

$$v_{\max} = at = \frac{eE}{m}t, \quad (49.5)$$

где  $t$  – среднее время между двумя последовательными столкновениями электрона с ионами решётки.

В классической теории электропроводности не учитывается распределение электронов по скоростям, т. е. считается, что все электроны имеют примерно одинаковую скорость хаотического движения. Тогда время между двумя последовательными столкновениями будет равно

$$t = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle}. \quad (49.6)$$

Скорость направленного движения изменяется за время пробега линейно, поэтому её среднее значение за пробег равно половине максимального:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{2} v_{\max} = \frac{e \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E. \quad (49.7)$$

Подставим выражение (49.7) в уравнение (1). Получим:

$$j = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E. \quad (49.8)$$

Из формулы (49.8) следует, что плотность тока пропорциональна напряжённости поля, т. е. данное выражение является законом Ома в дифференциальной форме.

$$j = \sigma E.$$

Из сравнения делаем вывод, что удельная электропроводность будет равна

$$\sigma = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle}. \quad (49.9)$$

## §50 Электрические измерения

### 50.1 Электроизмерительные приборы

**Электроизмерительный прибор** – совокупность технических средств, при помощи которых происходит измерение той или иной электрической величины. Электроизмерительные приборы делятся на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. В приборах непосредственной оценки измеряемая величина определяется непосредственно по показанию стрелки на шкале прибора или светового «зайчика» на градуированной шкале. В цифровых приборах показания снимаются с цифрового табло. К таким приборам относятся амперметры, вольтметры, ваттметры, омметры, гальванометры. К приборам сравнения относятся многочисленные компенсаторы и электрические мосты. В них измеряемая величина определяется сравнением с известной однородной величиной.

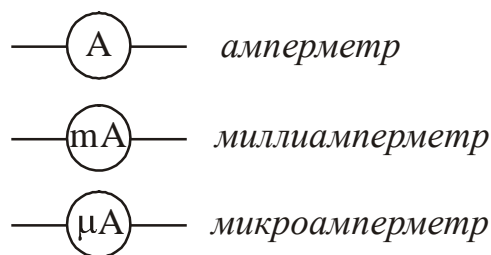


Рисунок 50.1

Для измерения электрических величин в приборах непосредственной оценки используются физические явления, создающие вращательный момент и перемещение подвижной системы прибора. Вращательный момент может быть создан взаимодействием магнитного поля постоянного магнита и тока в катушке, магнитного поля катушки с током и ферромагнетика, взаимодействием магнитных полей катушек с током, взаимодействием заряженных тел. В зависимости от используемого в приборах явления взаимодействия различают следующие системы электроизмерительных приборов: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную, электростатическую, термоэлектрическую и т. д.

1. Силу тока в цепи измеряют амперметрами, миллиамперметрами, микроамперметрами. Эти приборы включают в цепь последовательно. На рис. 50.1 показано их условное изображение на схемах.

Любой измерительный прибор должен как можно меньше влиять на измеряемую величину. Нужно иметь в виду, что сам амперметр обладает некоторым сопротивлением  $R_A$ . Поэтому сопротивление участка цепи с включенным амперметром увеличивается, и при неизменном напряжении сила тока уменьшается в соответствии с законом Ома. Чтобы амперметр не влиял на измеряемый ток, его сопротивление делают очень малым. Это нужно помнить и никогда не пытаться измерять силу тока в осветительной сети, подключая амперметр к розетке. Произойдет **короткое замыкание**: сила тока при малом сопротивлении прибора достигнет столь большой величины, что обмотка амперметра сгорит.

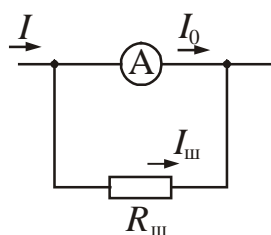


Рисунок 50.2

Для расширения пределов измерения амперметра используют **шунтирование** – подключение параллельно амперметру сопротивления  $R_{ш}$ . (рис. 50.2).

Приведём пример расчёта сопротивления шунта, который нужно подключить для увеличения предела измерения тока в  $n$  раз, т.е. для значений  $I = nI_0$ , где  $I_0$  – ток, на который рассчитан амперметр;  $I$  – ток в цепи.

Ток  $I_{ш}$ , текущий через шунт, по законам параллельного соединения равен:

$$I_{ш} = nI_0 - I_0 = I_0(n - 1). \quad (50.1)$$

Напряжение на амперметре  $U_A$  равно напряжению на шунте  $U_{ш}$ :  $U_A = U_{ш}$ . По закону Ома для однородного участка цепи:

$$U_A = I_0 R_A; \quad U_{ш} = I_{ш} R_{ш}.$$

где  $R_A$  – сопротивление амперметра;  
 $R_{ш}$  – сопротивление шунта.

$$I_0 R_A = I_{ш} R_{ш}.$$

Отсюда:

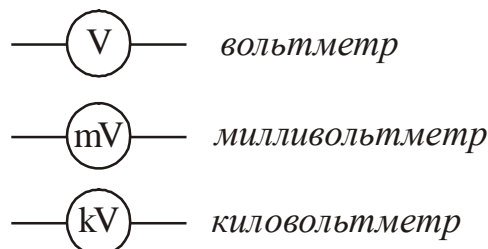
$$R_{ш} = \frac{I_0 R_A}{I_{ш}}.$$

Заменив  $I_{ш}$  по формуле (50.1), получим

$$R_{ш} = \frac{I_0 R_A}{I_0 (n-1)} = \frac{R_A}{(n-1)}. \quad (50.2)$$

Таким образом, сопротивление шунта должно быть в  $(n-1)$  раз меньше сопротивления амперметра.

2. Напряжение измеряют вольтметрами, милливольтметрами и т. д. Эти



приборы включают в цепь параллельно участку, на котором измеряется напряжение. На рис. 50.3 показано их условное изображение на схемах.

Показание вольтметра равно падению напряжения на сопротивлении прибора:

$$U_V = I_V R_V.$$

Рисунок 50.3

Напряжение на вольтметре совпадает с напряжением на участке цепи.

Если сопротивление вольтметра  $R_V$ , то после включения его в цепь, сопротивление участка будет уже не  $R$ , а  $R' = \frac{R R_V}{R + R_V} < R$ . Из-за этого измеряемое

напряжение на участке цепи уменьшится. Для того чтобы вольтметр не вносил заметных искажений в измеряемое напряжение его сопротивление должно быть большим по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряется напряжение. Вольтметр можно включать в сеть без риска, что он сгорит, если только он рассчитан на напряжение, превышающее напряжение сети.

Чтобы расширить пределы измерения напряжения в  $n$  раз и измерять напряжения до значений  $U > U_0$ , последовательно вольтметру нужно присоединить **добавочное сопротивление**  $R_d$  (рис. 50.4).

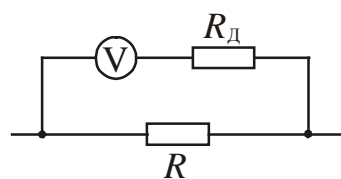


Рисунок 50.4

Приведем пример расчета добавочного сопротивления. Вольтметр имеет сопротивление  $R_V$  и рассчитан на напряжение  $U_0$ . Нужно расширить пределы измерения, т. е. сделать возможным измерение напряжений в  $n$  раз больших, чем указано на шкале прибора:

$$U = n U_0.$$

Без внешнего добавочного сопротивления предел измерений вольтметра равен  $U_0$ . Ток, отклоняющий стрелку вольтметра на всю шкалу, определится по закону Ома:

$$I = \frac{U_0}{R_V}.$$

При подключении добавочного сопротивления предел измерения будет равен  $n U_0$ , а общее сопротивление окажется равным  $R_V + R_d$ .



Следовательно,

$$I = \frac{nU_0}{R_V + R_d}.$$

В первом и во втором случаях токи одинаковые. На основании этого можно записать:

$$\frac{U_0}{R_V} = \frac{nU_0}{R_V + R_d},$$

или

$$R_d = R_V(n - 1). \quad (50.3)$$

Таким образом, добавочное сопротивление должно быть в  $(n - 1)$  раз больше сопротивления вольтметра.

3. Для регулировки силы тока в цепи и напряжения используют реостат со скользящим контактом.

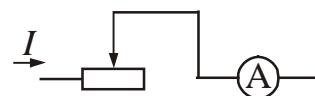


Рисунок 50.5

а). Для регулировки силы тока реостат включается в цепь последовательно (рис. 50.5).

**Практический совет:** перед началом измерений реостат включают (вводят) полностью. На рис. 50.5 это соответствует крайнему правому положению скользящего контакта.

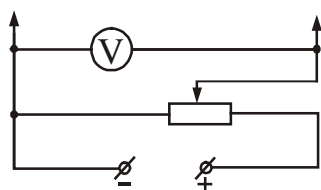


Рисунок 50.6

б). Для регулировки напряжения реостат включается параллельно источнику (рис. 50.6). В этом случае его называют потенциометром или делителем напряжения.

**Практический совет:** перед началом измерений потенциометр выводят на нуль. На рис. 50.6 это соответствует крайнему левому положению скользящего контакта.

## 50.2 Основные характеристики приборов

Качество электроизмерительных приборов определяется их чувствительностью, классом точности, пределами измерений, равномерностью шкалы и т.д.

**1. Чувствительность** – отношение линейного или углового  $\Delta\alpha$  перемещения стрелки прибора к изменению  $\Delta x$  измеряемой величины, вызвавшему это перемещение:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}.$$

Пример: Предел измерений миллиамперметра 150 мА, шкала имеет 75 делений.

$$S = \frac{75}{150} = 0,5 \left( \frac{\text{дел}}{\text{мА}} \right).$$

**2. Цена деления прибора** – это значение изменения  $\Delta x$  измеряемой величины, вызывающей отклонение указателя прибора на одно деление:

$$C = \frac{\Delta x}{\Delta \alpha}.$$

Пример: Предел измерений вольтметра 3 В, шкала имеет 150 делений.

$$C = \frac{3}{150} = 0,02 \left( \frac{\text{В}}{\text{дел}} \right).$$

**3. Класс точности прибора** определяется максимальной ошибкой прибора, выраженной в процентах от полной величины шкалы. Класс точности указывается на шкале прибора (цифра в кружке на шкале прибора). Существуют следующие классы точности: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и т.д. У приборов с высоким классом точности шкала, как правило, зеркальная.

Так, например, амперметр класса 1,5 с полной шкалой 1 А измеряет протекающий через него ток с ошибкой не превосходящей  $\frac{1,5}{100} \cdot 1 \text{ А} = 0,015 \text{ А}$ .

Ошибка 0,015 А составляет небольшую долю от измеренного тока лишь при измерении токов порядка 1 А, т. е. при отклонении стрелки на всю шкалу. При отклонении стрелки на 1/2 шкалы ошибка составит уже 3% от измеряемой величины, а при измерении еще меньших токов может составить 10% или даже 20% от величины измеряемого тока. Поэтому рекомендуется выбирать такой прибор, на котором измеряемый ток вызовет отклонение больше чем на половину шкалы.

### • Давайте подумаем!

**50.1.** Студент по ошибке включил вольтметр вместо амперметра при измерении величины тока в лампе. Что при этом произойдет с накалом нити лампы?

**50.2.** Студент по ошибке включил амперметр вместо вольтметра при измерении напряжения на горячей лампе. Что при этом произойдет с величиной тока в цепи?

**50.3.** На участке электрической цепи измеряют ток, используя поочередно два исправных амперметра. Первый амперметр показал меньшую величину тока, чем второй. Как это объяснить?

### • Обратите внимание!

*В двух смысловых значениях используют термины:*

**Заряд** – а) заряженное тело или частица; б) неотъемлемое свойство некоторых элементарных частиц (протонов, электронов и т. д.), определяющее их взаимодействие с внешним электромагнитным полем.

**Сопротивление** – а) скалярная физическая величина, характеризующая свойство проводника противодействовать пропусканию электрического тока и равная отношению напряжения  $U$  на концах проводника к силе тока  $I$ , протекающего по нему; б) структурный элемент электрической цепи (в виде законченного элемента), основное назначение которого – оказывать сопротивление электрическому току с целью регулирования тока и напряжения.

**Электрическая проводимость (электропроводность)** – а) способность вещества проводить постоянный электрический ток под действием не изменяющегося во времени электрического поля; б) величина, обратная электрическому сопротивлению.

**Электростатическая индукция** – а) векторная величина, характеризующая электростатическое поле; б) перераспределение зарядов в проводнике под действием внешнего электростатического поля.

**Термин применяется к объектам, к которым его применять нельзя**

**Электродвижущая сила (эдс)** – величина, равная отношению работы, совершаемой сторонними силами при перемещении заряда, к величине этого заряда. Электродвижущая сила является характеристикой источников эдс и не имеет ничего общего с термином «сила» из курса механики.

**Сила тока** – скалярная физическая величина, численно равная заряду, протекающему через сечение проводника за единицу времени. Термин не имеет ничего общего с термином «сила» из курса механики.

**Одно и то же понятие называется разными терминами**

**Электростатическая индукция** – электрическое смещение.

**Различайте следующие, близкие по звучанию, термины:**

**Напряжённость электрического поля** – векторная физическая величина, силовая характеристика электрического поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещённый в данную точку поля.

**Напряжение** – скалярная физическая величина, равная отношению полной работы, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении заряда, к величине заряда.

- Изучив раздел «Электростатика. Постоянный ток» студент должен **ЗНАТЬ**:

***Суть понятий:***

Заряд, точечный заряд. Электрическое поле, линии напряжённости электрического поля (силовые линии), эквипотенциальные поверхности. Диэлектрик, проводник, диполь. Уединённый проводник, конденсатор.

Ток. Напряжение. Резистор. Однородный участок цепи, неоднородный участок цепи. Источник тока. Узел, разветвлённая цепь. Вольт-амперная характеристика. Параллельное и последовательное соединение, шунт, добавочное сопротивление.

***Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:***

Заряд. Напряжённость электрического поля, потенциал, разность потенциалов. Линейная плотность заряда, поверхностная плотность заряда. Диэлектрическая проницаемость среды, диэлектрическая восприимчивость. Дипольный момент, поляризованность. Электроёмкость.

Сила тока, плотность тока. Напряжение, электродвижущая сила. Сопротивление, удельное сопротивление, проводимость, удельная проводимость, температурный коэффициент сопротивления.

***Законы:***

Закон Кулона. Принцип суперпозиции полей. Закон Ома для однородного участка цепи, для неоднородного участка цепи; для замкнутой цепи, содержащей эдс; в дифференциальной форме. Правила Кирхгофа. Закон Джоуля – Ленца. Закон Видемана – Франца.

***Теоремы:***

Теорема Гаусса для электростатического поля.

***Явления:***

Поляризация диэлектриков.

***Формулы:***

Связь между напряжённостью и потенциалом для однородного и неоднородного электростатического поля. Напряжённость и потенциал поля точечного заряда. Напряжённость поля бесконечно длинной тонкой равномерно заряженной нити, бесконечной равномерно заряженной плоскости.

Электроёмкость уединённого шара. Электроёмкость плоского, сферического и цилиндрического конденсаторов. Энергия электрического поля, объёмная плотность энергии электрического поля.

Зависимость сопротивления от температуры, расчёт сопротивления однородного проводника по его геометрическим размерам. Работа и мощность постоянного тока.

***Графики:***

Зависимость поляризованности изотропных диэлектриков от напряжённости электрического поля. Вольт-амперная характеристика проводника. Зависимость сопротивления проводников от температуры.

## ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК»

**Инструкция.** Данный тест предназначен для проверки знаний по теме “*Электростатика. Постоянный электрический ток*”. Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 41-50 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
- 2) 31-40 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
- 3) 20-30 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
- 4) меньше 20 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.

Прочитайте его ещё раз.

1. Электростатическое поле в вакууме может быть создано ...
  - 1) неподвижными электрическими зарядами      2) намагниченными телами
  - 3) движущимися электрическими зарядами      4) электрическими токами
  - 5) переменными магнитными полями.
2. Какими из перечисленных свойств обладает электростатическое поле?
  1. Оказывает силовое воздействие на материальные тела.
  2. Оказывает силовое воздействие на заряженные частицы или тела.
  3. Оказывает силовое воздействие на проводники с током.
  4. Обладает энергией.
  5. Обусловлено изменяющимся во времени магнитным полем.
3. Какое из перечисленных ниже утверждений носит название закона сохранения электрического заряда?
  1. Заряд любого тела является целым кратным элементарному заряду:  
 $q = \pm Ne$ .
  2. Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы заряженных тел остается величиной постоянной:  
 $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$ .
  3. Электрические заряды не могут исчезать и возникать вновь.
  4. В электрически замкнутой системе число положительных зарядов равно числу отрицательных зарядов.
4. В чём состоит принцип суперпозиции электрических полей?
  1. Напряжённость поля системы зарядов равна алгебраической сумме напряжённостей полей, которые создавал бы каждый из зарядов в отдельности:  $E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$ .
  2. Напряжённость поля системы зарядов равна векторной сумме напряжённостей полей, которые создавал бы каждый из зарядов в отдельности:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$ .
  3. Напряжённость электрического поля равна отношению силы, действующей на заряд, к величине заряда:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ .
5. Как следует изменить расстояние между точечными зарядами, чтобы сила взаимодействия между ними уменьшилась в 2 раза?
  1. Увеличить в  $\sqrt{2}$  раз
  2. Уменьшить в  $\sqrt{2}$  раз

3. Увеличить в 4 раза
4. Увеличить в  $\sqrt{3}$  раз
5. Уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз
6. Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов при перенесении их из среды с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  в вакуум (расстояние между зарядами  $r = \text{const}$ )?
  1. Увеличится в  $\varepsilon$  раз.
  2. Уменьшится в  $\varepsilon$  раз.
  3. Уменьшится в  $\varepsilon_0 \varepsilon$  раз.
  4. Увеличится в  $\varepsilon_0 \varepsilon$  раз.
  5. Увеличится в  $4\pi\varepsilon_0 \varepsilon$  раз.
  6. Не изменится.
7. Какая из формул является определением напряжённости электрического поля?
  1.  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$
  2.  $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$
  3.  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$ .
8. Укажите формулу, по которой рассчитывается напряжённость электрического поля точечного заряда.
  1.  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$
  2.  $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$
  3.  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$ .
9. Укажите формулу, по которой рассчитывается напряжённость электрического поля, создаваемого бесконечно длинной заряженной нитью.
  1.  $E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\tau}{r}$
  2.  $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$
  3.  $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$
10. Укажите формулу, по которой рассчитывается напряжённость электрического поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью.
  1.  $E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\tau}{r}$
  2.  $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$
  3.  $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$
11. Как изменится напряжённость электрического поля между двумя равномерно заряженными пластинами, если поверхностную плотность заряда этих пластин увеличить в 3 раза? Пластины заряжены разноименными зарядами.
  1. Увеличится в 3 раза.
  2. Увеличится в 9 раз.
  3. Уменьшится в 3 раза.
  4. Уменьшится в 9 раз.
  5. Останется прежней.
12. Численное значение потенциала в данной точке электростатического поля определяется ...
  - 1) потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещённого в данную точку поля.
  - 2) потенциальной энергией любого «пробного» заряда, помещённого в данную точку поля.
  - 3) работой, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку поля.
  - 4) силой, действующей на единичный положительный заряд, помещённый в данную точку поля.
  - 5) силой, действующей на любой «пробный» заряд, помещённый в данную точку поля.

13. Численное значение разности потенциалов двух точек электростатического поля определяется ...

- 1) разностью потенциальных энергий, которыми обладает единичный положительный заряд в данных точках поля.
- 2) средней силой, с которой электростатическое поле действует на единичный положительный заряд в данных точках поля.
- 3) разностью потенциальных энергий, которыми обладает произвольный заряд в данных точках поля.
- 4) работой, совершаемой при перемещении произвольного заряда из одной точки поля в другую.
- 5) работой, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда из одной точки поля в другую.

14. Укажите формулу, по которой рассчитывается потенциал электрического поля точечного заряда.

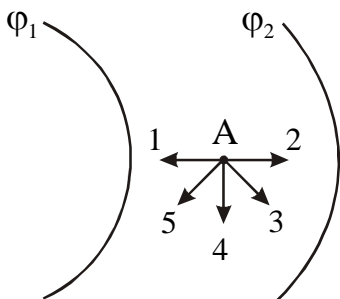
1.  $\varphi = \frac{q}{C}$

2.  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r}$

3.  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2}$

4.  $\varphi = \text{const}$

15. Точка А расположена между двумя эквипотенциальными поверхностями с потенциалами  $\varphi_1 = 2$  В и  $\varphi_2 = 1$  В (поверхности изображены на рисунке кривыми линиями). Укажите направление вектора напряжённости электростатического поля в этой точке.



16. Точка А расположена между двумя эквипотенциальными поверхностями с потенциалами  $\varphi_1 = 2$  В и  $\varphi_2 = 1$  В (поверхности изображены на рисунке кривыми линиями.). Укажите

направление вектора  $\text{grad } \varphi$  в этой точке.

17. Как взаимно расположены эквипотенциальные поверхности и линии напряжённости электростатического поля?

1. Пересекаются под углом  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ .
2. Нигде не пересекаются.
3. Линии напряжённости направлены по касательной к эквипотенциальным поверхностям.
4. Линии напряжённости перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

18. Какие из приведённых формул выражают связь между напряжённостью и потенциалом?

1.  $\vec{E} = \frac{\varphi}{r^2}$

2.  $E_l = -\frac{d\varphi}{dl}$

3.  $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$

4.  $E = \frac{\Delta\varphi}{d}$

19. Что называют электрическим диполем?

1. Электрический диполь – это два одноименных электрических заряда, разделённых диэлектриком.
2. Электрический диполь – это два разноименных электрических заряда, разделённых диэлектриком.

3. Электрический диполь – это система двух одинаковых по величине разноимённых точечных электрических зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы.
4. Электрический диполь – это система двух одинаковых по величине одноимённых точечных электрических зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы.
20. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  среды – это ...
  - 1) физическая величина, характеристика поля, которая показывает, во сколько раз напряжённость электрического поля в диэлектрике больше, чем в вакууме.
  - 2) физическая величина, характеристика поля, которая показывает, во сколько раз напряжённость электрического поля в диэлектрике меньше, чем в вакууме.
  - 3) физическая величина, характеристика вещества, которая показывает, во сколько раз напряжённость электрического поля в вакууме больше, чем в диэлектрике.
  - 4) физическая величина, характеристика вещества, которая показывает, во сколько раз напряжённость электрического поля в вакууме меньше, чем в диэлектрике.
21. Электроёмкостью уединённого проводника называется ...
  - 1) физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу.
  - 2) физическая величина, равная отношению потенциала проводника к его заряду.
  - 3) физическая величина, равная произведению заряда проводника на его потенциал.
22. Электроёмкость проводника зависит от ...
  - 1) материала проводника и его агрегатного состояния.
  - 2) его линейных размеров и геометрической формы.
  - 3) удельного электрического сопротивления материала проводника.
  - 4) температуры проводника.
23. Укажите формулу, по которой рассчитывается электроёмкость плоского конденсатора.
 

1.  $C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln(R_2/R_1)}$

2.  $C = \frac{Q}{q}$

3.  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$

4.  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 d}{S}$
24. Чему равно отношение электроёмкостей двух уединённых проводящих шаров с радиусами, равными  $R$  и  $2R$ ?
 

1.  $\frac{C_1}{C_2} = 1$

2.  $\frac{C_1}{C_2} = 1$

3.  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{2}$

4.  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{4}$

5.  $\frac{C_1}{C_2} = 4$
25. Как изменится электроёмкость проводника при приближении к нему другого проводника?



1. Не изменится.
  2. Увеличится.
  3. Уменьшится.
  4. Увеличивается только во время приближения, а потом становится прежней.
26. Как изменится электроёмкость плоского конденсатора, если площадь увеличить в 2 раза, а расстояние между ними уменьшить в 6 раз?
1. Увеличится в 8 раз.
  2. Уменьшится в 8 раз.
  3. Увеличится в 3 раза.
  4. Уменьшится в 3 раза.
  5. Увеличится в 12 раз.
  6. Не изменится.
27. Три конденсатора, электроёмкости которых равны  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ , соединены последовательно. Какие из перечисленных ниже условий справедливы?
1.  $q_0 = q_1 + q_2 + q_3$   
 $U_0 = U_1 = U_2 = U_3$   
 $C_0 = C_1 + C_2 + C_3$
  2.  $q_0 = q_1 + q_2 + q_3$   
 $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$   
 $C_0 = C_1 + C_2 + C_3$
  3.  $q_0 = q_1 = q_2 = q_3$   
 $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$   
 $\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$
  4.  $q_0 = q_1 + q_2 + q_3$   
 $U_0 = U_1 = U_2 = U_3$   
 $\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$
28. Три конденсатора, электроёмкости которых равны  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ , соединены параллельно. Какие из перечисленных ниже условий справедливы?
1.  $q_0 = q_1 + q_2 + q_3$   
 $U_0 = U_1 = U_2 = U_3$   
 $C_0 = C_1 + C_2 + C_3$
  2.  $q_0 = q_1 + q_2 + q_3$   
 $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$   
 $C_0 = C_1 + C_2 + C_3$
  3.  $q_0 = q_1 = q_2 = q_3$   
 $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$   
 $\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$
  4.  $q_0 = q_1 + q_2 + q_3$   
 $U_0 = U_1 = U_2 = U_3$   
 $\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$
29. Укажите формулу, по которой рассчитывается энергия поля заряженного конденсатора.
1.  $W = \frac{CU^2}{2}$
  2.  $W = \frac{qU^2}{2}$
  3.  $W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$
  4.  $W = \frac{q^2}{2C}$
30. Укажите формулу, по которой рассчитывается объёмная плотность энергии электрического поля.
1.  $w = \frac{CU^2}{2}$
  2.  $w = \frac{qU^2}{2}$
  3.  $w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$
  4.  $w = \frac{q^2}{2C}$
31. Какая из формул является определением силы тока?
1.  $i = \frac{dq}{dt}$
  2.  $i = \frac{U}{R}$
  3.  $i = \frac{\epsilon}{R + r}$
  4.  $i = \int_S j dS$

32. Какая из формул является определением плотности тока?

$$1. \quad i = \frac{dq}{dt} \qquad 2. \quad j = \frac{di}{dS} \qquad 3. \quad j = \frac{1}{\rho E} \qquad 4. \quad j = \sqrt{\frac{P}{\rho}}$$

33. Как изменится плотность тока в медном проводнике, если ток в нём увеличить в 3 раза, а площадь поперечного сечения уменьшить в 2 раза?

1. Уменьшится в 12 раз.
2. Увеличится в 3 раза.
3. Увеличится в 12 раз.
4. Увеличится в 6 раз.
5. Уменьшится в 3 раза.

34. Какая из формул является определением электродвижущей силы?

$$1. \quad \mathcal{E} = -L \frac{di}{dt} \qquad 2. \quad \mathcal{E} = \frac{A^{\text{стоп}}}{q} \qquad 3. \quad \mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad 4. \quad \mathcal{E} = \frac{1}{ne} \frac{Bi}{a}$$

35. Укажите формулу, выражающую закон Ома для замкнутой цепи, содержащей источник тока.

$$1. \quad i = \frac{dq}{dt} \qquad 2. \quad i = \frac{U}{R} \qquad 3. \quad i = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \qquad 4. \quad P = i^2 R$$

36. Укажите формулу, выражающую закон Ома в дифференциальной форме.

$$1. \quad i = \frac{dq}{dt} \qquad 2. \quad j = \frac{di}{dS} \qquad 3. \quad \vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \qquad 4. \quad P = j^2 R$$

37. Укажите формулу, выражающую закон Ома для однородного участка цепи.

$$1. \quad i = \frac{dq}{dt} \qquad 2. \quad i = \frac{U}{R} \qquad 3. \quad i = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \qquad 4. \quad P = i^2 R$$

38. Сопротивление участка цепи уменьшили в 2 раза, а напряжение увеличили в 3 раза. Как изменится сила тока?

1. Увеличилась в 6 раз.
2. Уменьшилась в 1,5 раза.
3. Увеличилась в 5 раз.
4. Увеличилась в 3 раза.
5. Увеличилась в 1,5 раза.
6. Не изменится.

39. Сопротивление проводника зависит от ...

- 1) эдс источника, к которому подключен проводник.
- 2) силы тока в цепи.
- 3) геометрических размеров и материала проводника.
- 4) разности потенциалов на концах проводника.

40. Три проводника, сопротивления которых  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , соединены последовательно. Какие из перечисленных ниже утверждений справедливы?

$$\begin{array}{ll} 1. \quad I_0 = I_1 + I_2 + I_3 & 2. \quad I_0 = I_1 + I_2 + I_3 \\ U_0 = U_1 = U_2 = U_3 & U_0 = U_1 + U_2 + U_3 \\ R_0 = R_1 + R_2 + R_3 & R_0 = R_1 + R_2 + R_3 \\ I_0 = I_1 = I_2 = I_3 & I_0 = I_1 + I_2 + I_3 \\ 3. \quad I_0 = U_1 + U_2 + U_3 & 4. \quad I_0 = U_1 = U_2 = U_3 \\ R_0 = R_1 + R_2 + R_3 & \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{array}$$

41. Три проводника, сопротивления которых  $R_1, R_2, R_3$ , соединены параллельно. Какие из перечисленных ниже утверждений справедливы?

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| 1. $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$ | 2. $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$                                      |
| $U_0 = U_1 = U_2 = U_3$    | $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$   |
| $R_0 = R_1 + R_2 + R_3$    | $R_0 = R_1 + R_2 + R_3$   |
| 3. $I_0 = I_1 = I_2 = I_3$ | 4. $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$                                      |
| $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$    | $U_0 = U_1 = U_2 = U_3$   |
| $R_0 = R_1 + R_2 + R_3$    | $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ |

42. Укажите формулу зависимости сопротивления проводника от температуры.

- |                      |                            |                           |                       |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1. $R = \frac{U}{I}$ | 2. $R = R_0(1 + \alpha t)$ | 3. $R = R_0 e^{\alpha t}$ | 4. $R = R_0 \alpha t$ |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|

43. Укажите формулу, по которой рассчитывается сопротивление проводника.

- |                           |                            |                      |             |
|---------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|
| 1. $R = \rho \frac{l}{S}$ | 2. $R = R_0(1 + \alpha t)$ | 3. $R = \frac{I}{U}$ | 4. $R = UI$ |
|---------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|

44. Укажите формулу зависимости удельного электрического сопротивления проводника от температуры.

- |                              |                                  |   |                             |
|------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|
| 1. $\rho = \frac{1}{\sigma}$ | 2. $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ | 3. $\rho = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$ | 4. $\rho = \rho_0 \alpha t$ |
|------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|

45. Удельным сопротивлением проводника называется ...

- 1) отношение напряжения на участке цепи к силе тока.
- 2) величина, обратная сопротивлению участка цепи.
- 3) произведение силы тока на сопротивление.
- 4) сопротивление проводника длиной 1 м, площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.
- 5) величина, обратная удельной проводимости участка цепи.

46. Удельной проводимостью участка цепи называется ...

- 1) отношение напряжения на участке цепи к силе тока.
- 2) величина, обратная сопротивлению участка цепи.
- 3) произведение силы тока на сопротивление.
- 4) сопротивление проводника длиной 1 м, площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.
- 5) величина, обратная удельному сопротивлению.

47. Укажите буквенное обозначение и единицу измерения каждой из перечисленных величин. *Пример:* Сила –  $F$  – Н (ньютон).

Заряд, потенциал, линейная плотность заряда, поверхностная плотность заряда, напряжённость электрического поля, электроёмкость.

48. Укажите буквенное обозначение и единицу измерения каждой из перечисленных величин. *Пример:* Сила –  $F$  – Н (ньютон).

Сила тока, плотность тока, напряжение, сопротивление, удельное сопротивление, электродвижущая сила, проводимость, удельная проводимость.

49. Укажите формулы, по которым рассчитывается мощность электрического тока.

$$1. P = IU \quad 2. P = \frac{U^2}{R} \quad 3. P = j^2 \rho \quad 4. P = I^2 R$$

50. Укажите формулы, выражающие закон Джоуля – Ленца.

$$1. Q = I^2 R t \quad 2. Q = \int_0^t i^2(t) R dt \quad 3. i = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad 4. Q = \Delta U + A$$

### Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!»

**35.1.** Существование двух видов электрических зарядов следует, из того, что кулоновское взаимодействие зарядов проявляется как в виде взаимного притяжения, так и в виде взаимного отталкивания зарядов.

**35.2.** Не может, так как электрический заряд имеет дискретную структуру.

**35.3.** Да, предусмотрена: Закон сохранения заряда отмечает факт неизменности только алгебраической суммы зарядов, а одновременное обращение в нуль, равных по модулю слагаемых противоположных знаков не изменяет значения суммы.

**35.4.** Положительный заряд тела получается за счёт недостатка в нём электронов. Следовательно, масса такого тела меньше массы того же тела в электрически нейтральном состоянии на сумму масс недостающих электронов.

**35.5.** Общее: центральный характер сил, однотипная зависимость их значений от расстояния. Различия: силы тяготения однозначны (только притяжение): кулоновские силы двузначны (может быть и притяжение, и отталкивание). Явление тяготения есть всегда, а электрическое взаимодействие может и не быть (есть нейтральные частицы).

**36.1.** Потенциал шара на его поверхности определяется по формуле  $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon R}$ , где  $q$  – заряд шара;  $R$  – радиус шара. Радиусы шаров одинаковы, следовательно, более высокий потенциал у шара с большим зарядом.

**36.2.** Потенциал шара на его поверхности определяется по формуле  $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon R}$ , где  $q$  – заряд шара;  $R$  – радиус шара. Заряды шаров одинаковы, следовательно, шар меньшего диаметра имеет более высокий потенциал.

**36.3.** Можно. При измерениях все значения потенциалов увеличатся на 100 В, но разность потенциалов не изменится.

**37.1.** Нет. Если бы силовые линии пересекались, то в точке пересечения можно было бы провести две касательные, однако в каждой точке поля вектор напряжённости имеет вполне определённое направление. Аналогично можно сказать и про эквипотенциальные поверхности.

**37.2.** Нет, не могут. Если бы существовала замкнутая силовая линия то, перенося вдоль неё заряд, мы совершили бы работу, не равную нулю.

**37.3.** Нет. Направление касательной к линии напряжённости совпадает с направлением силы, действующей на заряд, а значит, с направлением ускорения заряда. Траектория же движения заряда – это линия, касательная к которой совпадает с направлением скорости заряда.

**38.1.** Линии напряжённости электрического поля начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных и направлены в сторону убывания потенциала. Следовательно, заряд положительный.

**38.2.** Линии напряжённости электрического поля начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных и направлены в сторону убывания потенциала. Следовательно, заряд отрицательный.

**38.3.** Со стороны электрического поля на электрон действует сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Так как заряд электрона отрицательный, то сила будет направлена в сторону, противоположную вектору напряжённости электрического поля  $\vec{E}$ . Вектор  $\vec{E}$  направлен в сторону убывания потенциала, поэтому электроны в электрическом поле стремятся перейти в область с высоким потенциалом.

**39.1.** Поток вектора напряжённости  $\vec{E}$  через замкнутую поверхность определяется по теореме Гаусса. Если внутри поверхности в вакууме находится  $n$  зарядов, то она запишется в сле-

дующем виде:  $\Phi_E = \varepsilon_0 \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i$ . Алгебраическая сумма зарядов, образующих диполь,

равна нулю. Следовательно, поток вектора напряжённости равен нулю:  $\Phi_E = 0$ , хотя поле диполя не равно нулю:  $\vec{E} \neq 0$ .

**40.1.** Поверхность должна иметь форму плоскости, перпендикулярной оси диполя.

**40.2.** В однородном электрическом поле на диполь будет действовать только вращающий момент, который стремится повернуть диполь вдоль поля.

**41.1.** Жёсткими называются молекулярные диполи, электрический момент которых при воздействии на них внешних сил остается постоянным. Действие электрического поля на жёсткие диполи молекул выражается в стремлении ориентировать их по полю, но хаотическое тепловое движение молекул нарушает ориентирующее действие поля. Поэтому поляризуемость молекул будет в сильной степени зависеть от температуры. Следовательно, от температуры будет зависеть и диэлектрическая проницаемость.

**41.2.** Стекло не всегда изолятор. При температуре выше 300°C оно становится проводником.

**42.1.** Для того, чтобы заряды в проводнике находились в равновесии, должны выполняться следующие условия: 1) напряжённость поля внутри проводника должна быть равна нулю, а потенциал быть постоянным; 2) напряжённость поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности, так как касательная составляющая вектора  $\vec{E}$  вызвала бы перемещение носителей заряда по поверхности проводника. Это противоречит условию равновесия. Линии напряжённости перпендикулярны поверхностям равного потенциала, поэтому в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной. Таким образом, потенциал  $\varphi$  во всех точках проводника будет иметь одно и то же значение.

**42.2.** Под действием электростатического поля положительно заряженного тела в проводнике происходит перераспределение зарядов, то есть наблюдается явление электростатической индукции. Поэтому незаряженный проводник будет притягиваться.

**42.3.** Напряжённость поля внутри проводника равна нулю.

**42.4.** Для предохранения от взрыва при электризации трением. Такой порошок оказывается практически заземлённым.

**43.1.** Нет. В присутствии других проводников их ёмкости будут меняться.

**43.2.** 1) Конденсатором называется система из двух проводников, в которой при наличии разности потенциалов все линии напряжённости, начинающиеся на одном проводнике, заканчиваются на другом. Но так как линии напряжённости могут начинаться и заканчиваться только на зарядах, то заряды, возникающие на обкладках конденсатора, всегда равны по величине и противоположны по знаку.

2) Если площадь обкладок сделать разной, то может измениться ёмкость конденсатора. При этом может измениться разность потенциалов или общая величина зарядов на обкладках, но они обязательно будут равными по величине и противоположными по знаку.

**43.3.** Ёмкость плоского конденсатора определяется по формуле  $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$ . Диэлектрические

проницаемости  $\varepsilon$  диэлектриков больше 1. Следовательно, электроёмкость при внесении диэлектрика увеличится.

**43.4.** При соединении с обкладками может возникнуть разрядный ток, поэтому после замыкания цепи с конденсаторами их следует разрядить проводящим стержнем на изолирующей ручке.

**43.5.** Если соединить одинаковые конденсаторы последовательно, то будет выполняться соотношение  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ , или (что то же самое),  $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  то есть результирующая ём-

кость будет в 2 раза меньше. Если соединить их параллельно, то  $C = C_1 + C_2$ , то есть результирующая ёмкость будет в 2 раза больше.

**43.6.** Энергия заряженного конденсатора  $W = \frac{q^2}{2C}$ , где  $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$ . Если раздвинуть пластины, то ёмкость  $C$  уменьшится и, следовательно, увеличится энергия.

**43.7.** Превращается во внутреннюю энергию диэлектрика (керосина).

**44.1.** Если шарам разных радиусов сообщить одинаковые отрицательные заряды, то они будут иметь разные потенциалы. После соединения их проводником происходит перераспределение зарядов, то есть возникает ток. Ток будет проходить до тех пор, пока потенциалы шаров не сравняются.

**45.1.** Согласно закону Ома для неоднородного участка цепи:  $U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{\text{стор}}$ . Здесь  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов между конечными точками участка цепи, которая возникает за счёт кулоновских электрических сил, действующих во внешней цепи. Её назначение – приводить в движение свободные электроны в проводнике. По определению разность потенциалов – величина, численно равная работе кулоновских сил, которую нужно совершить для перемещения единичного положительного заряда между заданными точками участка цепи.

$\varepsilon_{\text{стор}}$  – электродвижущая сила, обязанная своим происхождением сторонним силам, действующим внутри источника тока. Её назначение – восполнять убыль в разности потенциалов во внешней цепи и таким образом поддерживать в ней ток. По определению эдс – величина, численно равная работе источника сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по замкнутому пути.

Сумма обеих работ называется напряжением (или падением напряжения), которое по закону Ома равно  $U = IR$ , где  $R$  – полное сопротивление участка, включающее в себя и сопротивление источника эдс (внутреннее сопротивление).

Разность потенциалов на клеммах источника меньше постоянной эдс на величину падения напряжения на сопротивлении внутри источника. Но разность потенциалов будет больше эдс, если за счёт работы второго источника она идёт на увеличение эдс, что бывает, например, в случае зарядки аккумулятора.

**46.1.** Для неомических устройств (например, полупроводникового диода) вольт-амперная характеристика имеет нелинейный характер и, следовательно, соотношение  $U=IR$  не применимо.

**46.2.** По закону Ома  $I = \frac{U}{R}$ . Сопротивление нити накала в холодном состоянии меньше, поэтому ток больше.

**48.1.** В соответствии с законом Джоуля – Ленца  $Q = I^2 R t$ , то есть количество выделенной теплоты прямо пропорционально сопротивлению. Тонкая проволока обладает бóльшим сопротивлением, поэтому нагревается больше.

**48.2.** Для электрических нагревательных приборов лучше всего применять провод, материал которого обладает следующими свойствами: большое удельное сопротивление, малый температурный коэффициент сопротивления, тугоплавкость, химическая стойкость при высоких температурах и дешевизна. Одним из таких материалов является нихром.

**48.3.** Плавкий предохранитель служит для предохранения цепей от последствий короткого замыкания. Бóльший ток выдерживает цепь.

**48.4.** а) Согласно техническим нормам для каждой проводки, рассчитанной на освещение и на использование электронагревательных приборов, установлены предельные длительно допустимые токовые нагрузки. В пределах этих норм нагревательный провод должен давать достаточный накал спиралей, но не допускать их перегорания. Кроме того, не должен происходить чрезмерный нагрев соединительных проводов вне участков, где работают нагревательные приборы. б) Провод в плавком предохранителе рассчитывается на немедленное перегорание при коротком замыкании в цепи. Однако при перегрузках до 50-60% от максимальной время перегорания провода настолько велико, что изоляция перегруженных проводов успевает сильно нагреться. Защитой от короткого замыкания и перегрузок служат установочные автоматы (ограничители).

**48.5.** Сопротивление спирали пропорционально ее длине  $R = \rho \frac{l}{S}$ . Уменьшение длины спирали уменьшает её сопротивление. Напряжение не изменилось, поэтому в соответствии с законом Ома  $I = \frac{U}{R}$  ток возрастет. Мощность тока (накал спирали)  $P = I^2 R$  увеличится, так как она пропорциональна квадрату силы тока.

**50.1.** Для того чтобы вольтметр не вносил заметных искажений в измеряемое напряжение его сопротивление должно быть большим по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряется напряжение. Лампа не загорится, поскольку при таком включении почти всё напряжение падает на вольтметре, у которого сопротивление, как правило, больше, чем у лампы.

**50.2.** Так как сопротивление амперметра очень мало, то через амперметр пойдёт очень большой ток (практически возникнет короткое замыкание), ведущий к порче амперметра (перегоранию катушки) и аккумулятора.

**50.3.** При включении амперметра сопротивление участка цепи возрастает на величину сопротивления амперметра, а ток соответственно уменьшается. Так как второй амперметр показал бóльший ток, то его сопротивление меньше, чем сопротивление первого амперметра.

# КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Электростатика. Постоянный ток»

№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.
1	1	11	1	21	1	31	1	41	4
2	2,4	12	1,3	22	2	32	2	42	2
3	2	13	1,5	23	3	33	4	43	1
4	2	14	2	24	3	34	2	44	2
5	1	15	2	25	2	35	3	45	4
6	1	16	1	26	5	36	3	46	5
7	1	17	4	27	3	37	2	47	–
8	2	18	2,3	28	1	38	1	48	–
9	1	19	3	29	1,4	39	3	49	1,2,4
10	3	20	3	30	3	40	3	50	1,2



## ЧАСТЬ 4. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### Глава 13. Магнитное поле в вакууме

**Магнетизм** – форма взаимодействия электрических токов, электрических токов и магнитов. В наиболее общем виде магнетизм можно определить, как материальное взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами. Передача магнитного взаимодействия осуществляется на расстоянии с помощью магнитного поля. Магнитные поля существуют в космическом пространстве, они влияют на движение заряженных частиц, образующих космические лучи. Широкий диапазон явлений магнетизма, простирающийся от магнетизма элементарных частиц до магнетизма космического пространства, обуславливает его большую роль в науке и технике.

Магнитные свойства присущи в той или иной степени всем без исключения телам, поэтому при рассмотрении магнитных свойств веществ введён общий термин – *магнетики*.

#### §51 Магнитное поле

##### 51.1 Характеристики магнитного поля

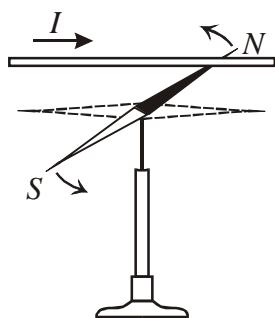


Рисунок 51.1

В 1820 году датский физик Х. Эрстед\* обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная параллельно прямолинейному проводнику, при пропускании через него постоянного тока  $I$  стремится расположиться перпендикулярно проводнику (рис. 51.1). При изменении направления тока стрелка поворачивалась на  $180^\circ$ . То же самое происходило, когда стрелка переносилась вверх и располагалась над проводом.

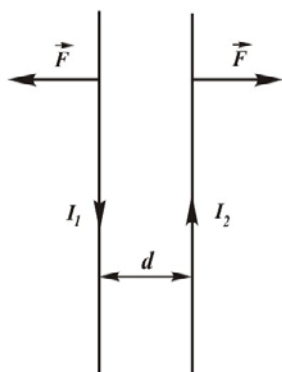


Рисунок 51.2

В том же году А. Ампер\* установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них тока в одном направлении и отталкиваются, если токи имеют противоположные направления (рис. 51.2). Сила взаимодействия проводников пропорциональна величине токов и обратно пропорциональна расстоянию между ними:

$$F \sim \frac{I_1 I_2}{d}.$$

Если проводник с током поместить между полюсами подковообразного магнита, то он будет или втягиваться или выталкиваться из него в зависимости от направления тока (рис. 51.3).

\*Эрстед Ханс Кристиан (1777–1851), датский физик.

\*Ампер Андре Мари (1775–1836), французский физик, математик и химик.

Сила действия со стороны магнитного поля пропорциональна силе тока и длине проводника:  $F \sim I \cdot l$ . Таким образом, эксперименты показали, что вокруг проводников с током и постоянных магнитов существует магнитное поле.

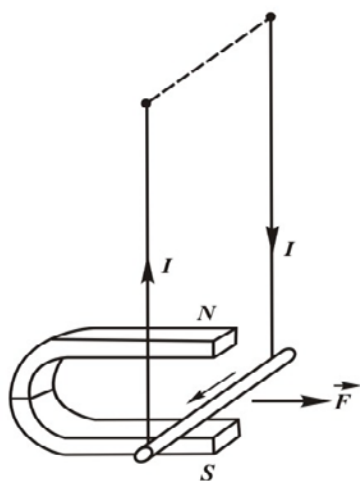


Рисунок 51.3

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Опыт Эрстеда со стрелкой.  
[http://www.youtube.com/watch?v=F4JL2vvYd8c&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh\\_BBV3Grt](http://www.youtube.com/watch?v=F4JL2vvYd8c&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh_BBV3Grt)
2. Опыт Эрстеда с рамкой.  
[http://www.youtube.com/watch?v=PSrP8084urk&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh\\_BBV3Grt](http://www.youtube.com/watch?v=PSrP8084urk&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh_BBV3Grt)
3. Взаимодействие параллельных токов.  
[http://www.youtube.com/watch?v=g37PEIxxgCVs&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh\\_BBV3Grt](http://www.youtube.com/watch?v=g37PEIxxgCVs&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh_BBV3Grt)

**Магнитное поле** – материальная среда, существующая вокруг проводников с током и постоянных магнитов, и проявляющая себя силовым действием на другие проводники с током, постоянные магниты, движущиеся электрические заряды. В отличие от электрического поля магнитное поле не оказывает действия на покоящийся заряд.

Для характеристики способности магнитного поля оказывать силовое действие на проводники с током вводится физическая величина, называемая **магнитной индукцией**.

Магнитное поле исследуют с помощью замкнутого контура с током. Контур должен иметь малые размеры по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется. Это может быть проволочная рамка произвольной формы (рис. 51.4 а). Подводящие проводники сплетают вместе, чтобы результирующая сила, действующая на них со стороны магнитного поля, была равна нулю.

Расположим на расстоянии, значительно большем размеров рамки, провод. Если пропустить ток через рамку и провод, то рамка поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (рис. 51.4 б). Как известно из курса механики, тело поворачивается под действием момента сил. Если брать разные по площади рамки с разными токами, то моменты сил, действующие на эти рамки в данной точке поля, будут разными. Однако, отношение максимального момента сил к произведению силы тока в рамке на её площадь будет для данной точки поля одним и тем же. Это отношение принимают в качестве величины, характеризующей магнитное поле, и называют индукцией магнитного поля в данной точке.

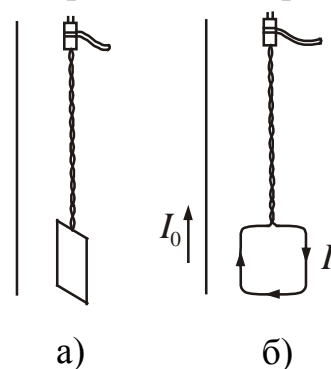


Рисунок 51.4

**Магнитная индукция ( $\vec{B}$ )** – векторная физическая величина, силовая характеристика магнитного поля, численно равная отношению максимального вращающего момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле, к произведению силы тока  $I$  в контуре на его площадь  $S$ :

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}. \quad (51.1)$$

Из опытов Ампера следует, что на проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила, пропорциональная силе тока в проводнике и длине проводника. Величина силы также зависит от ориентации проводника в магнитном поле. Но отношение максимальной силы, действующей на проводник с током, к произведению силы тока на длину проводника, для данной точки поля остается постоянным. Поэтому можно дать другое определение магнитной индукции.

**Магнитная индукция ( $\vec{B}$ )** – векторная физическая величина, силовая характеристикой магнитного поля, численно равная отношению максимального значения силы, действующей на проводник с током в однородном магнитном поле, к произведению силы тока  $I$  в нём на длину проводника  $l$ :

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}. \quad (51.2)$$

$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2} = \text{Тл (тесла}^*)$$

Тесла – очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 5 Тл.

Кроме вектора магнитной индукции для характеристики магнитного поля используют дополнительную характеристику  $\vec{H}$ , называемую **напряжённостью магнитного поля**. Магнитная индукция и напряжённость связаны между собой соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (51.3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;

$H$  – напряжённость магнитного поля.

**Магнитная проницаемость среды  $\mu$**  – физическая величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция поля в данной среде отличается от магнитной индукции поля в вакууме. Для вакуума  $\mu = 1$ .

---

\*Тесла Никола (1856–1943), америк. ученый, физик, инженер. Серб по происхождению.

**Напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$**  – векторная величина, являющаяся количественной характеристикой магнитного поля. Напряжённость магнитного поля определяет тот вклад в магнитную индукцию, который дают внешние источники поля.

$$[H] = \text{А/м}.$$

## 51.2 Графическое изображение магнитных полей

Графически магнитные поля можно изображать с помощью силовых линий магнитного поля (линий магнитной индукции).

Линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной к ней, называется **силовой линией магнитного поля (линией магнитной индукции)**.

Силовые линии чертят так, чтобы их густота была пропорциональна модулю вектора  $\vec{B}$  в данном месте. Линии индукции магнитного поля ни в одной точке поля не обрываются, т. е. они всегда непрерывны. Они не имеют ни начала, ни конца. Этим силовые линии магнитного поля отличаются от силовых линий электростатического поля, которые всегда начинаются и заканчиваются на электрических зарядах или уходят в бесконечность. Векторное поле, имеющее непрерывные силовые линии, называется **вихревым полем**. **Магнитное поле – это вихревое поле.**

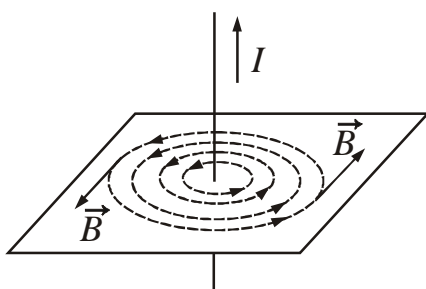


Рисунок 51.5

Линии магнитной индукции прямого проводника с током представляют собой окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной к проводнику. Центры окружностей находятся на оси проводника (рис. 49.5). Направление определяется по мнемоническому **правилу буравчика**: направление линий магнитной индукции совпадает с направлением ручки буравчика, ввинчиваемого вдоль направления тока.

Линии магнитной индукции кругового тока представлены на рис. 51.6. Линии индукции поля, создаваемого постоянным магнитом – на рис. 51.7.

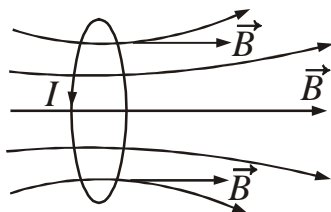


Рисунок 51.6

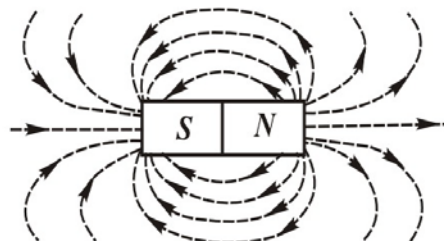


Рисунок 51.7

Если во всех точках некоторой части пространства вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  не изменяет своего направления и численного значения, то магнит-

ное поле в этой части пространства называется **однородным**. В противном случае магнитное поле является неоднородным.

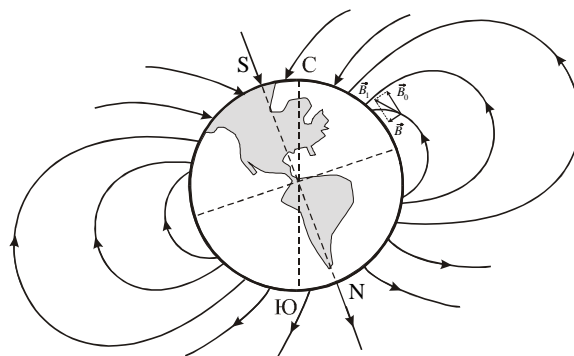


Рисунок 51.8

Земля окружена магнитным полем (рис. 51.8). Точки Земли, в которых напряжённость магнитного поля имеет вертикальное направление, называют магнитными полюсами. Таких точек две: северный магнитный полюс (находится в южном полушарии) и южный магнитный полюс (в северном полушарии). Магнитные полюсы Земли не совпадают с географическими полюсами и со временем изменяют свое положение. Прямая, проходящая через магнитные полюсы, называется магнитной осью Земли. Ось такого большого магнита составляет с осью вращения Земли угол  $11,5^\circ$ .

Вектор индукции магнитного поля Земли на экваторе направлен горизонтально, а в других местах – под некоторым углом к горизонтальной плоскости. Среднее значение индукции магнитного поля Земли на поверхности составляет около  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл. Напряжённость магнитного поля на экваторе 27 А/м, у магнитных полюсов – 52,5 А/м. В районах магнитных аномалий напряжённость магнитного поля резко возрастает. Например, в районе Курской магнитной аномалии она равна  $\approx 160$  А/м.

### **Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Магнитное поле токов различных конфигураций. Силовые линии магнитного поля.

<http://www.youtube.com/watch?v=xPic6xzv6wc>

### **• Давайте подумаем!**

**51.1.** Всегда ли электрический ток производит тепловое действие? Создает магнитное поле?

**51.2.** Мимо сидящего в аудитории студента лаборант проносит заряженный проводник. Для кого из них существует магнитное поле? Для кого – электрическое?

**51.3.** Могут ли векторы магнитной индукции  $\vec{B}$  и напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  быть направлены во взаимно противоположные стороны в какой-либо точке среды?

**51.4.** В чём состоит принципиальное отличие линий магнитной индукции стационарных магнитных полей от силовых линий электростатических полей?

**51.5.** По длинному металлическому проводу течёт электрический ток. Можно ли избавиться от его магнитного поля, двигаясь вдоль провода со скоростью, равной средней скорости упорядоченного движения электронов в ней?

## §52 Законы магнитного поля. Расчёт магнитных полей

### 52.1 Закон Био – Савара – Лапласа

В 1820 году французские ученые Био\* и Савар\* провели исследование магнитных полей токов, текущих по тонким проводникам различной формы. Лаплас\* проанализировал экспериментальные данные и получил соотношение, которое позволяет определить магнитную индукцию  $d\vec{B}$  поля, создаваемого элементом тока. Под элементом тока понимают произведение тока  $I$  на элемент длины  $d\vec{l}$  проводника.

По закону Био – Савара – Лапласа индукция  $d\vec{B}$  магнитного поля, создаваемого элементом тока  $I d\vec{l}$  в произвольной точке А, определяется выражением:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}. \quad (52.1)$$

В скалярном виде:

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (52.2)$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями элемента тока и радиус-вектора  $\vec{r}$ , идущего от элемента тока к точке, в которой определяется индукция (рис. 52.1).

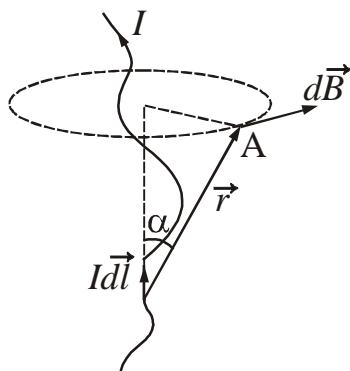


Рисунок 52.1

Аналогичные формулы можно записать для напряжённости магнитного поля:

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}, \quad (52.3)$$

$$dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2}. \quad (52.4)$$

Магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма полей, создаваемых элементарными участками токов:

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}.$$

Если магнитное поле создается системой проводников с током, то индукция результирующего поля в любой его точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых каждым током в отдельности:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Данное утверждение носит название **принципа суперпозиции полей**.

\*Био Жан Батист (1774–1862), французский физик. \*Савар Феликс (1791–1841), французский физик. \*Лаплас Пьер Симон (1749–1827), французский астроном, математик и физик.

## 52.2 Примеры расчёта магнитных полей с применением закона Био – Савара – Лапласа

Применим закон Био – Савара – Лапласа для расчёта полей, создаваемых проводниками правильной геометрической формы в вакууме.

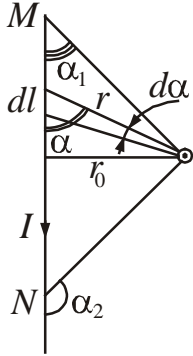


Рисунок 52.2

1. **Поле прямого тока.** Все элементы тока прямолинейного проводника дают сонаправленные векторы  $d\vec{B}$  (для указанного на рис. 52.2 направления тока векторы  $d\vec{B}$  направлены перпендикулярно плоскости чертежа к нам). Векторное сложение можно заменить скалярным:

$$B = \int_l dB = \int_l \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}. \quad (52.5)$$

Приведём подынтегральное выражение к одной переменной  $\alpha$ . Из рис. 50.2 следует, что

$$r = \frac{r_0}{\sin \alpha}, \quad dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{r_0 d\alpha}{\sin^2 \alpha}.$$

Полученные выражения подставим в формулу (52.5):

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{r_0 d\alpha \sin^3 \alpha}{\sin^2 \alpha r_0^2} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \sin \alpha d\alpha.$$

Интегрирование даёт соотношение:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (52.6)$$

Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  обозначены на рис. 52.2.

Рассмотрим проводник бесконечной длины. Практически это выполняется при условии  $r_0 \ll l$ . Получим выражение для индукции магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным проводником. В этом случае можно считать, что  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \pi$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} 2,$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0}, \quad (52.7)$$

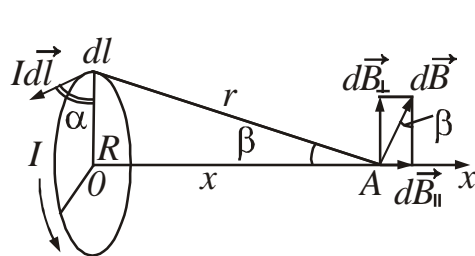
где  $r_0$  – расстояние от проводника с током до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Аналогичную формулу можно записать для напряжённости магнитного поля:

$$H = \frac{I}{2\pi r_0}. \quad (52.8)$$

**2. Поле кругового тока на его оси.** Найдём индукцию магнитного поля  $\vec{B}$  в точке А, расположенной на оси кругового тока радиуса  $R$ , на расстоянии  $x$  от его центра (рис. 52.3).

Индукция  $d\vec{B}$  поля, созданного элементом тока  $I d\vec{l}$ , согласно формуле (52.2):



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}.$$

Разложим вектор  $d\vec{B}$  на две составляющие:  $d\vec{B}_{||}$  – направленную вдоль оси  $Ox$  и  $d\vec{B}_{\perp}$  – перпендикулярную к ней.

Рисунок 52.3

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}_{||} + \int_l d\vec{B}_{\perp}.$$

При суммировании полей всех элементов тока по длине окружности, составляющие  $d\vec{B}_{\perp}$  в сумме дадут нуль, т. е.

$$\int_l d\vec{B}_{\perp} = 0.$$

Векторы  $d\vec{B}_{||}$  сонаправлены, поэтому векторную сумму заменим скалярной:

$$B = \int_l dB_{||} = \int_l dB \sin \beta.$$

Из рис. 52.3 находим

$$r^2 = R^2 + x^2, \quad \sin \beta = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}}.$$

Подставив полученные соотношения и учитывая, что  $\sin \alpha = 1$ , имеем:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl R}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

При интегрировании учтём, что  $l$  меняется в пределах от 0 до  $l = 2\pi R$ :

$$B = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl R}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

В результате получим:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (52.9)$$



Аналогичную формулу можно записать для напряжённости магнитного поля:

$$H = \frac{IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (52.10)$$

При  $x = 0$  получим выражение для расчёта индукции в центре кругового тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (52.11)$$

Напряжённость магнитного поля в центре кругового тока:

$$H = \frac{I}{2R}. \quad (52.12)$$

**3. Поле соленоида.** Соленоид представляет собой цилиндрическую катушку, состоящую из большого числа витков, навитых на круглый цилиндрический каркас. На рис. 52.4 показано сечение соленоида. Магнитная индукция  $\vec{B}$  поля соленоида конечной длины равна геометрической сумме магнитных индукций  $\vec{B}_i$  полей всех витков этого соленоида:

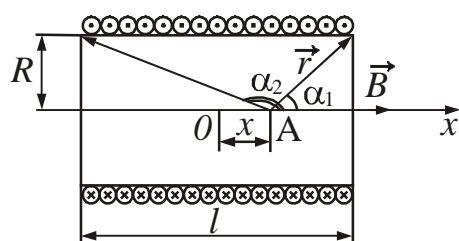


Рисунок 52.4

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i. \quad (52.13)$$

Внутри соленоида направление индукции  $\vec{B}$  совпадает с направлением оси.

Используя формулы (52.9) и (52.13), можно получить формулу для расчёта индукции магнитного поля в произвольной точке А, лежащей на оси соленоида конечной длины:

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (52.14)$$

где  $n = \frac{N}{l}$  – число витков на единицу длины соленоида (плотность намотки);

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, под которыми из точки А видны концы соленоида (рис. 52.4).

Напряжённость магнитного поля в произвольной точке на оси соленоида конечной длины

$$H = \frac{I n}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (52.15)$$

Если длина соленоида намного больше его радиуса ( $l \gg R$ ), то он считается *бесконечно длинным*. Для бесконечно длинного соленоида  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \pi$ . Тогда:

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{\mu_0 I n}{2} \cdot 2,$$

$$B = \mu_0 I n. \quad (52.16)$$

Соответственно, напряжённость магнитного поля внутри бесконечно длинного соленоида:

$$H = I n. \quad (52.17)$$

### 52.3 Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока

Напомним, что понятие циркуляции уже вводилось для вектора напряжённости электрического поля (см. п. 36.3)

**Циркуляцией** вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  по замкнутому контуру  $L$  называется интеграл вида:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B dl \cos(\vec{B}, d\vec{l}), \quad (52.18)$$

где  $L$  – замкнутый контур произвольной формы,

$d\vec{l}$  – вектор элементарной длины контура, направленный по обходу контура.

**Циркуляция вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в вакууме по произвольному замкнутому контуру  $L$  равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром.**

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k, \quad (52.19)$$

где  $N$  – число проводников с током, охватываемых контуром  $L$  произвольной формы.

Уравнение (52.19) называют **законом полного тока**. Закон справедлив для проводников с током любой формы и любых размеров. При вычислении алгебраической суммы токов ток считается положительным, если направление его силовых линий совпадает с направлением обхода контура. Если направление силовых линий тока противоположно направлению обхода контура, то ток считается отрицательным.

Закон полного тока можно сформулировать и для циркуляции вектора напряжённости:

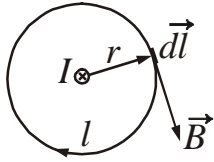
**Циркуляция вектора напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  по произвольному замкнутому контуру  $L$  равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.**

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N I_k. \quad (52.20)$$

Закон полного тока играет примерно ту же роль, что и теорема Гаусса для вектора напряжённости  $\vec{E}$  электростатического поля. При наличии симметрии он позволяет очень просто находить  $\vec{B}$ . Это бывает в тех случаях, когда вычисление циркуляции вектора  $\vec{B}$  можно свести, разумно выбрав контур, к произведению  $B$  на длину контура или его часть. Если этого нет, то расчёт приходится проводить другими способами, например, с помощью закона Био – Савара – Лапласа или путём решения соответствующих дифференциальных уравнений. Расчёт становится значительно сложнее.

В качестве примера рассчитаем индукцию магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным прямолинейным проводником с током.

Контур выберем в виде окружности радиуса  $r$  (рис. 52.5), совпадающую с линией магнитной индукции (ток  $I$  идёт от нас за чертёж). Запишем закон полного тока:



$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i,$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B dl \cos(\vec{B}, d\vec{l}).$$

Рисунок 52.5

Угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{l}$  равен нулю,  $\cos 0 = 1$ . Внутри выбранного контура находится ток  $I$ . Тогда:

$$\int_L B dl = \mu_0 I.$$

Так как замкнутый контур обхода выбран в виде окружности, то для данного расстояния  $r$  от провода  $B = \text{const}$ . После интегрирования получим:

$$B 2\pi r = \mu_0 I,$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (52.21)$$

Полученный результат совпадает с формулой (52.7).

#### 52.4 Магнитный поток. Теорема Гаусса для магнитного поля

**Потоком вектора магнитной индукции или магнитным потоком ( $d\Phi$ ) сквозь площадку  $dS$  называется скалярная физическая величина**

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S} = B dS \cos \alpha, \quad (52.22)$$

где  $d\vec{S} = \vec{n} dS$ ,  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к площадке;

$\alpha$  – угол между направлением нормали  $\vec{n}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 52,6).

$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$  (вебер\*).

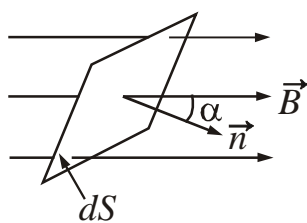


Рисунок 52.6

Магнитный поток через площадку в зависимости от ориентации нормали может быть как положительным, так и отрицательным.

Магнитный поток сквозь произвольную поверхность  $S$ :

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S}. \quad (52.23)$$

Если поле однородно ( $\vec{B} = \text{const}$ ), а поверхность плоская, то

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (52.24)$$

Силовые линии магнитного поля являются замкнутыми, поэтому любая силовая линия пересекает **замкнутую** поверхность  $S$  дважды: один раз в положительном по отношению к нормали направлении, а другой раз в отрицательном направлении. Следовательно:

**Поток вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  сквозь произвольную замкнутую поверхность равен нулю:**

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (52.25)$$

Данное утверждение называется теоремой Гаусса\* для магнитного поля. Теорема Гаусса для магнитного поля отражает следующие факты:

1) линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца. Число линий магнитной индукции, выходящих из любого объёма, ограниченного **замкнутой** поверхностью  $S$ , всегда равно числу линий, входящих в этот объём.

2) в природе отсутствуют свободные магнитные заряды, на которых начинались бы или заканчивались линии магнитной индукции (силовые линии).

Теорема Гаусса для магнитного поля входит в систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля (см. ч. 2).

### • Давайте подумаем!

**52.1.** Опыты показывают, что за пределами кругового тока магнитная индукция меньше, чем внутри области, обтекаемой этим током. Как это объяснить?

**52.2.** Какой факт служит подтверждением того, что в природе отсутствуют магнитные заряды?

**52.3.** Ток течёт по длинной тонкостенной медной трубе. Существует ли магнитное поле внутри трубы и вне её?

\*Вебер Вильгельм Эдуард (1804–1891), немецкий физик.

\*Гаусс Карл Фридрих (1777–1855), немецкий математик, астроном и физик.

## §53 Действие магнитного поля на проводник с током

### 53.1 Закон Ампера

Обобщив экспериментальные данные по исследованию действия магнитного поля на различные проводники с током, Ампер установил, что *сила  $d\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент тока, равна векторному произведению элемента тока  $Id\vec{l}$  на магнитную индукцию  $\vec{B}$ .*

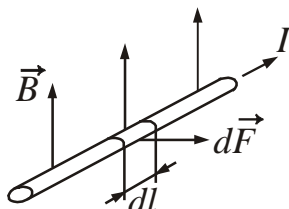


Рисунок 53.1

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}, \quad (53.1)$$

$$dF = IBdl \sin \alpha, \quad (53.2)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 53.1).

Направление силы  $d\vec{F}$  определяют по правилу векторного произведения. На практике чаще применяют mnemonic правило левой руки: если расположить ладонь левой руки так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока, то отставленный на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле (рис. 53.1).

Если проводник имеет конечные размеры, то

$$F = \int_l d\vec{F} = \int_l Id\vec{l} \times \vec{B}. \quad (53.3)$$

#### Примеры:

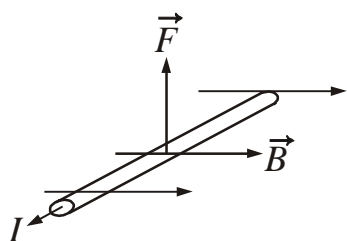


Рисунок 53.2

1. Сила, действующая на прямолинейный проводник с током в однородном магнитном поле (рис. 53.2). Для однородного поля  $\vec{B} = \text{const}$ , поэтому

$$F = \int_l Id\vec{l} \times \vec{B} = \int_l IB \sin \alpha dl,$$

$$F = IBl \sin \alpha, \quad (53.4)$$

где  $l$  – длина проводника.

$\alpha$  – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

2. Сила взаимодействия двух бесконечно длинных прямолинейных проводников с током.

Рассмотрим два параллельных проводника с токами  $I_1$  и  $I_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга (рис. 53.3). Пусть длина каждого проводника  $l$ . Каждый из проводников с током находится в магнитном поле тока другого проводника. Сила, с которой второй ток действует на первый, равна

$$F_{12} = I_1 B_2 l \sin \alpha,$$

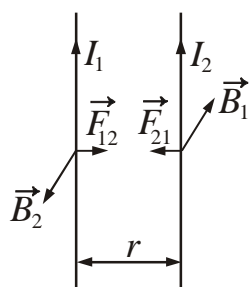


Рисунок 53.3

$$\alpha = 90^\circ, \sin 90^\circ = 1.$$

Так как проводники длинные, то

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}.$$

Сделаем замену, получим

$$F_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} l. \quad (53.5)$$

Можно показать, что сила  $F_{21}$ , с которой первый ток действует на второй, равна силе  $F_{12}$ , с которой второй ток действует на первый.

Определим направление сил  $F_{12}$  и  $F_{21}$ , пользуясь правилом левой руки (см. рис. 53.3). Получаем, что параллельные токи одного направления притягиваются. Если поменять направление одного из токов, то можно показать, что параллельные токи противоположных направлений отталкиваются. Данный факт подтверждается опытами Ампера (см. §51).

Сила, действующая на единицу длины проводника:

$$F_l = \frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}. \quad (53.6)$$

На основании формулы (53.6) дается определение единицы силы тока – амперу.

**Ампер – это сила такого неизменяющегося тока, который, проходя по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины проводника.**

Действие магнитного поля на токи находит широкое практическое применение в электродвигателях, электроизмерительных приборах и т. д.

**Посмотрите лекционную демонстрацию.**

Тележка Эйхенвальда (Сила Ампера).

<http://www.youtube.com/watch?v=YBiWiNcLQQI>

### 53.2 Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле

Рассмотрим цепь с током, образованную неподвижными проводами и скользящим по ним подвижным проводником длиной  $l$  (рис. 53.4). Цепь находится в однородном магнитном поле ( $\vec{B} = \text{const}$ ), направленном перпендикулярно к плоскости чертежа.

По закону Ампера на проводник действует сила

$$F = IBl.$$

При перемещении проводника на расстояние  $dx$  эта сила совершит элементарную работу

$$\delta A = F dx = IB l dx = IB dS, \quad (53.7)$$

где  $dS = l dx$  – элементарная площадка (на рис. 53.4 – заштрихована).

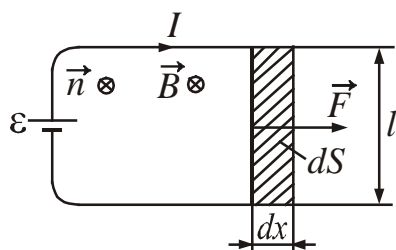


Рисунок 53.4

Произведение  $BdS$  даёт магнитный поток  $d\Phi$  (см. формулу (52.22)). Сделаем замену в (53.7), получим

$$\delta A = I d\Phi, \quad (53.8)$$

где  $d\Phi$  – магнитный поток через площадку  $dS$ , которую пересекает проводник при движении.

Для нахождения работы, совершаемой при перемещении проводника в магнитном поле, надо проинтегрировать выражение (53.8).

$$A = \int_1^2 I d\Phi. \quad (53.9)$$

Для  $I = \text{const}$ :

$$A = I \Delta\Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1), \quad (53.10)$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – изменение магнитного потока.

Таким образом, работа, совершаемая силой Ампера при перемещении проводника с током, равна произведению силы тока на изменение магнитного потока через поверхность, пересечённую проводником при рассматриваемом движении.

• Давайте подумаем!

**53.1.** Металлический проводник даже при наличии в нём тока имеет полный заряд, равный нулю. Почему в таком случае магнитное поле вызывает силу, действующую на проводник?

**53.2.** Почему параллельные проводники, по которым идут токи в одном направлении, притягиваются, а параллельные электронные пучки отталкиваются?

**53.3.** Почему струя жидкого расплавленного металла при пропускании по ней постоянного тока сужается (уменьшается площадь поперечного сечения)? Какое применение может иметь это явление в металлургии?

## §54 Магнитный момент. Контур с током в магнитном поле

### 54.1 Магнитный момент

**Магнитным моментом** ( $\vec{p}_m$ ) **плоского замкнутого контура с током**  $I$  **называется векторная физическая величина, численно равная произведению тока**  $I$  **на площадь контура**  $S$ :

$$\vec{p}_m = IS \vec{n}, \quad (54.1)$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор положительной нормали к поверхности, ограниченной этим контуром. Положительной называется нормаль, направление которой связано с направлением тока в контуре правилом правого винта. Поэтому вектор  $\vec{p}_m$  направлен перпендикулярно плоскости контура так, что из его конца ток в контуре виден идущим против часовой стрелки (рис. 55.1).

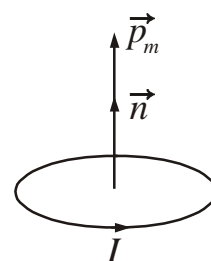


Рисунок 54.1

$$[p_m] = \text{А} \cdot \text{м}^2.$$

Магнитный момент является очень важной характеристикой контура с током. Этой характеристикой определяется как поле, создаваемое контуром, так и поведение контура во внешнем магнитном поле.

### 54.2 Сила, действующая на контур с током в однородном магнитном поле

Рассмотрим, как ведёт себя контур с током в однородном магнитном поле ( $\vec{B} = \text{const}$ ). В соответствии с формулой (53.2) на элемент контура действует сила

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (54.2)$$

Сила, действующая на весь контур, равна

$$\vec{F} = \oint_l I d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (54.3)$$

Постоянные величины  $I$  и  $\vec{B}$  можно вынести за знак интеграла:

$$\vec{F} = I \left( \oint_l d\vec{l} \right) \times \vec{B},$$

Из курса математики известно, что  $\oint_l d\vec{l} = 0$ , поэтому  $\vec{F} = 0$ . Таким образом, результирующая сила, действующая на контур с током в однородном магнитном поле, равна нулю. Это справедливо для контуров любой формы при произвольном расположении контура относительно поля.



### 54.3 Вращающий момент, создаваемый силами, приложенными к контуру

Рассмотрим плоский контур, находящийся в однородном магнитном поле ( $\vec{B} = \text{const}$ ). Пусть контур ориентирован так, что линии магнитной индукции параллельны плоскости контура (рис. 54.2). На стороны 1–2 и 3–4 контура действуют силы  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{34}$ :

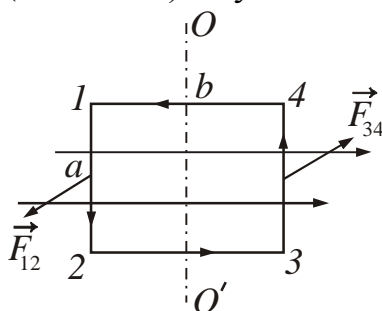


Рисунок 54.2

$$F_{12} = F_{34} = IBa, \quad (54.4)$$

где  $a$  – сторона 1–2 контура.

Силы, приложенные к противоположным сторонам, образуют пару сил, момент которой равен:

$$M = F_{12}l, \quad (54.5)$$

В результате контур поворачивается относительно оси  $OO'$ .

На рис. 54.3 показан вид на контур сверху. Из рисунка следует, что плечо пары сил

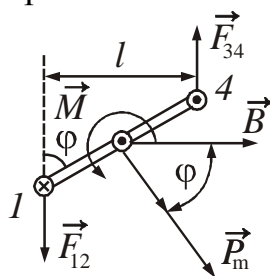


Рисунок 54.3

$$l = b \sin \varphi,$$

где  $b$  – сторона 1–4 контура;

$\varphi$  – угол между направлением вектора  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к контуру (рис. 54.3).

Заменив в (54.5)  $F_{12}$  по формуле (54.4), получим

$$M = IBab \sin \varphi. \quad (54.6)$$

Произведение  $ab$  даёт площадь контура  $S$ .

Таким образом,

$$M = IB S \sin \varphi. \quad (54.7)$$

Выражение (54.7) можно преобразовать, воспользовавшись понятием магнитного момента. Заменив произведение  $IS$  через магнитный момент, получим

$$M = p_m B \sin \varphi. \quad (54.8)$$

Формулу (54.8) можно записать в векторном виде:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B} \quad (54.9)$$

Вектор вращающего момента  $\vec{M}$  направлен вдоль оси вращения  $OO'$  так, что из его конца вращение рамки под действием пары сил видно происходящим против часовой стрелки (рис. 54.3).

Если магнитное поле направлено перпендикулярно к плоскости контура, то векторы  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$  будут сонаправлены. В этом случае вращающий момент  $\vec{M}$  равен нулю (см. формулу (54.8)).

Силы, действующие на разные элементы контура, будут либо растягивать его (рис. 54.4 а), либо сжимать (рис. 54.4 б) в зависимости от направления поля и тока.

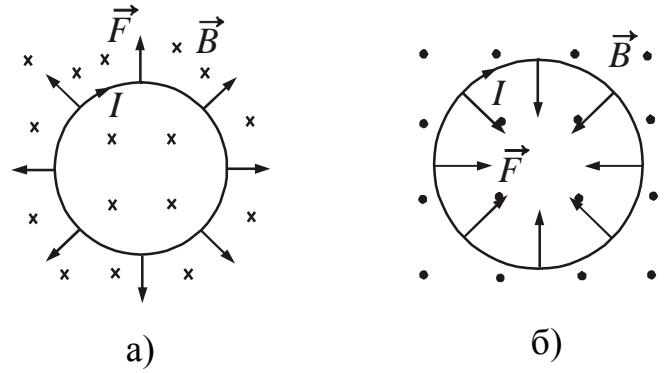


Рисунок 54.4

#### 54.4 Работа, совершаемая при вращении контура с током в однородном магнитном поле

При повороте контура на угол  $d\varphi$  (см. рис. 54.3) совершается элементарная работа

$$\delta A = \vec{M} d\vec{\varphi} = M d\varphi \cos(\vec{M}, d\vec{\varphi}). \quad (54.10)$$

Так как

$$M = p_m B \sin \varphi,$$

а векторы  $\vec{M}$  и  $d\vec{\varphi}$  сонаправлены (при этом  $\cos(\vec{M}, d\vec{\varphi}) = 1$ ), то

$$\delta A = p_m B \sin \varphi d\varphi. \quad (54.11)$$

Работа, совершаемая при повороте контура на конечный угол от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ , определяется интегрированием:

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \delta A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_m B \sin \varphi d\varphi = -(p_m B \cos \varphi_2 - p_m B \cos \varphi_1). \quad (54.12)$$

Из формулы (54.12) можно сделать вывод, что работа по повороту контура определяется лишь его конечным и начальным положениями.

Следовательно, величину  $-p_m B \cos \varphi$  можно назвать **потенциальной энергией взаимодействия контура с током с магнитным полем**. Обозначим её через  $W_{\Pi}$

$$W_{\Pi} = -p_m B \cos \varphi. \quad (54.13)$$

Выражение (54.13) можно записать как скалярное произведение векторов  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ :

$$W_{\Pi} = -\vec{p}_m \vec{B}. \quad (54.14)$$

### 54.5 Контур с током в неоднородном магнитном поле

Рассмотрим контур с током, находящийся в неоднородном магнитном поле. Поле называется **неоднородным**, если направление и (или) численное значение вектора магнитной индукции изменяются, т. е.  $\vec{B} \neq \text{const}$ . Предположим, что поле быстрее всего изменяется в направлении оси  $Ox$ , совпадающей с направлением  $\vec{B}$  в том месте, где расположен центр контура.

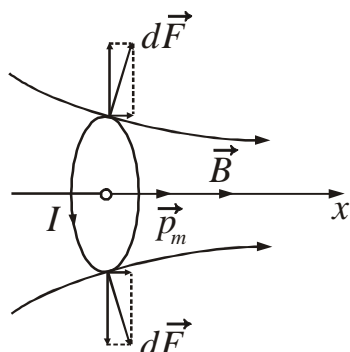


Рисунок 54.5

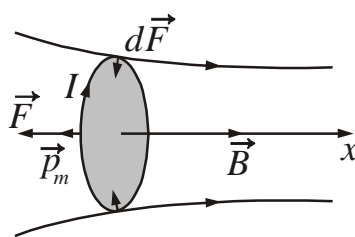


Рисунок 54.6

Магнитный момент  $\vec{p}_m$  контура ориентирован по полю (рис. 54.5). Так как  $\vec{B} \neq \text{const}$ , выражение (54.2) может быть не равным нулю. Сила  $d\vec{F}$ , действующая на элемент контура, перпендикулярна к  $\vec{B}$ , т. е. линии магнитной индукции в месте пересечения её с  $d\vec{l}$ .

Результирующая сил, приложенных к элементам контура, направлена в сторону возрастания  $\vec{B}$  и, следовательно, втягивает контур в область более сильного поля. Если изменить направление тока на противоположное ( $\vec{p}_m$  будет направлен против  $\vec{B}$ ), то направления всех  $d\vec{F}$  и их результирующей  $\vec{F}$  изменятся на обратные. При такой ориентации  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$  контур будет выталкиваться из поля (рис. 54.6).

Величина силы, втягивающей или выталкивающей контур, определяется соотношением:

$$F_x = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha, \quad (54.15)$$

где  $p_m$  – магнитный момент контура;

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ ;

$\frac{\partial B}{\partial x}$  – градиент индукции магнитного поля – величина, характеризующая

степень неоднородности поля, численно равная изменению индукции, приходящемуся на единицу длины.

Таким образом, в неоднородном магнитном поле контур не только сжимается (растягивается), но и втягивается (выталкивается) в область неоднородного поля.

#### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Контур с током в однородном поле (тележка).

[http://www.youtube.com/watch?v=oRzzmGyysS4&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh\\_BBv3GrT](http://www.youtube.com/watch?v=oRzzmGyysS4&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh_BBv3GrT)

2. Контур с током в однородном магнитном поле. Момент сил.

[http://www.youtube.com/watch?v=CgEmIroaKFQ&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh\\_BBv3GrT](http://www.youtube.com/watch?v=CgEmIroaKFQ&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh_BBv3GrT)

### 3. Контур с током в неоднородном поле (тележка).

[http://www.youtube.com/watch?v=0C0Exxfa8Ro&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh\\_BBV3GrT](http://www.youtube.com/watch?v=0C0Exxfa8Ro&list=PLWM8IO-3TQjPns4A7jeEAGURh_BBV3GrT)

#### • Давайте подумаем!

**54.1.** Если пропустить постоянный ток через рамку и провод, то рамка поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (см. рис. 53.7). Куда направлена сила, действующая на квадрат со стороны магнитного поля проводника?

**54.2.** Железный шарик помещён в однородное магнитное поле. С какой силой это поле действует на шарик?

**54.3.** Будет ли действовать какая-либо результирующая сила или вращающий момент на немагнитный железный стержень, если он помещён в однородное магнитное поле?

**54.4.** За счёт какого источника энергии совершается работа при перемещении контура с током в магнитном поле?

**54.5.** Зависит ли работа, необходимая для поворота контура с током во внешнем магнитном поле на  $180^\circ$ , от первоначальной ориентации контура?

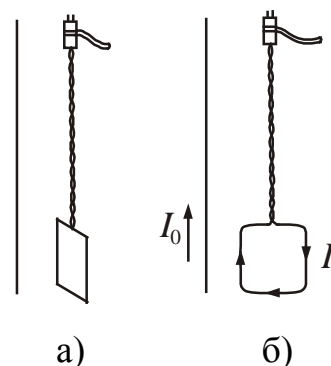


Рисунок 54.7

## §55 Сила Лоренца

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле. Сила  $\vec{F}_L$ , действующая на электрический заряд, движущийся в магнитном поле, называется **силой Лоренца\***. Сила Лоренца рассчитывается по формуле:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (55.1)$$

Модуль силы Лоренца равен:

$$F_L = qBv \sin \alpha, \quad (55.2)$$

где  $q$  – заряд частицы;

$B$  – индукция магнитного поля, в котором движется заряд;

$v$  – скорость заряда;

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы Лоренца определяется по правилу векторного произведения. На практике можно использовать правило левой руки (см. §53), при этом надо учитывать знак заряда. Для отрицательных частиц направление силы меняется на противоположное.

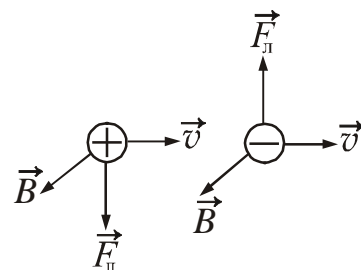


Рисунок 55.1

\*Лоренц Хедрик Антон (1853–1928), нидерландский физик.

Взаимные расположения векторов  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_L$  для положительного ( $q > 0$ ) и отрицательного ( $q < 0$ ) зарядов показаны на рис. 55.1.

С помощью силы Лоренца можно дать ещё одно определение магнитной индукции  $\vec{B}$ .

**Магнитная индукция ( $\vec{B}$ ) – векторная физическая величина, силовая характеристикой магнитного поля, численно равная отношению максимального значения силы, действующей на единичный положительный заряд, который в данной точке движется с единичной скоростью.**

$$B = \frac{F_{L \max}}{qv}. \quad (55.3)$$

Сила Лоренца направлена всегда перпендикулярно скорости движения заряженной частицы и сообщает ей центростремительное ускорение. Не изменяя модуля скорости, а лишь изменяя её направление, **сила Лоренца не совершает работы**, и кинетическая энергия заряженной частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Рассмотрим частные случаи.

1. Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Под действием силы Лоренца заряженная частица движется по окружности постоянного радиуса  $R$  (рис. 55.2).

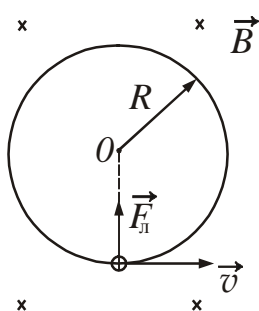


Рисунок 55.2

$$F_L = qBv, \quad (55.4)$$

( $\sin \alpha = 1$ , так как  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ).

По второму закону Ньютона:

$$F = ma_n, \quad (55.5)$$

где  $m$  – масса частицы.

Нормальное (центростремительное) ускорение:

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

Приравняем выражения (55.4) и (55.5), заменив  $a_n$ :

$$qBv = m \frac{v^2}{R}.$$

Найдём радиус окружности:

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (55.6)$$

Период вращения (время одного полного оборота):

$$T = \frac{l}{v} = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{qB},$$

где  $l = 2\pi R$  – длина окружности.

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (55.7)$$

2. Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом  $\alpha$  к линиям магнитной индукции.

Разложим скорость  $\vec{v}$  частицы на две составляющие (рис. 55.3):  $\vec{v}_{\parallel}$  – параллельную вектору  $\vec{B}$ , и  $\vec{v}_{\perp}$  – перпендикулярную вектору  $\vec{B}$ . Скорость  $\vec{v}_{\parallel}$  в магнитном поле не изменяется и обеспечивает перемещение заряженной частицы вдоль силовой линии. Скорость  $\vec{v}_{\perp}$  в результате действия силы Лоренца будет изменяться только по направлению. Движение частицы можно рассматривать как сложение двух движений: равномерного вращения по окружности со скоростью  $\vec{v}_{\perp}$  и равномерного перемещения вдоль поля со скоростью  $\vec{v}_{\parallel}$ . В результате частица движется по винтовой линии.

На основании формулы (55.6):

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin \alpha}{qB}. \quad (55.8)$$

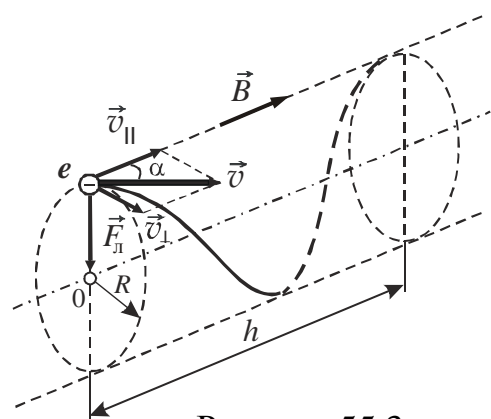


Рисунок 55.3

Шаг  $h$  винтовой линии (расстояние между соседними витками)

$$h = v_{\parallel} T.$$

Заменяя  $T$  по формуле (55.7), получим

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}. \quad (55.9)$$

Если рассмотренное движение происходит в неоднородном магнитном поле, индукция которого возрастает в направлении движения частицы, то  $R$  и  $h$  уменьшаются с ростом  $B$ . На этом основана фокусировка частиц в магнитном поле.

Если на движущийся электрический заряд кроме магнитного поля индукцией  $\vec{B}$  действует и электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}$ , то результирующая сила  $\vec{F}$ , приложенная к заряду, равна векторной сумме силы  $\vec{F}_e = q\vec{E}$  и силы Лоренца (55.1):

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (55.10)$$

Выражение (55.10) также называется силой Лоренца, иногда – обобщённой силой Лоренца.

Рассмотренные случаи движения заряженных частиц в магнитном поле используются в ускорителях заряженных частиц, в масс-спектрометрах (приборы для разделения ионов по массам), в различных устройствах электронной оптики и т. д.

• Давайте подумаем!

**55.1.** Почему сила Лоренца не совершает работы?

**55.2.** Заряженная частица движется в однородном магнитном поле, оставаясь в плоскости, перпендикулярной этому полю. Какова её траектория, если на частицу действует только сила Лоренца?

## §56 Эффект Холла

Если металлическую пластинку, вдоль которой течёт постоянный электрический ток, поместить в магнитное поле, перпендикулярное току, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов. Это явление было обнаружено Э. Холлом\* в 1879 году и называется **эффектом Холла**.

Величина разности потенциалов  $U$  зависит от тока  $I$ , индукции магнитного поля  $B$  и толщины пластинки  $b$ :

$$U_H = R_H \frac{IB}{b}, \quad (56.1)$$

где  $R_H$  – постоянная Холла.

Значение и знак постоянной Холла определяются природой проводника.

Направления магнитной индукции  $\vec{B}$ , тока  $I$  указаны на рис. 56.1. Одной из основных причин эффекта Холла является отклонение носителей заряда, движущихся в магнитном поле, под действием силы Лоренца. Наблюдается эффект Холла во всех проводниках и полупроводниках, независимо от материала.

Для металлов постоянная Холла определяется следующим образом:

$$R_H = \frac{1}{nq}, \quad (56.2)$$

где  $q$  – заряд носителя;

$n$  – концентрация носителей заряда.

Измерения постоянной Холла были проведены в очень широком интервале температур. Оказалось, что **в металлах постоянная Холла не зависит от температуры**, следовательно, и **концентрация свободных электронов**

**практически не зависит от температуры**. Это означает, что тепловое движение не играет никакой роли в образовании свободных электронов в металлах.

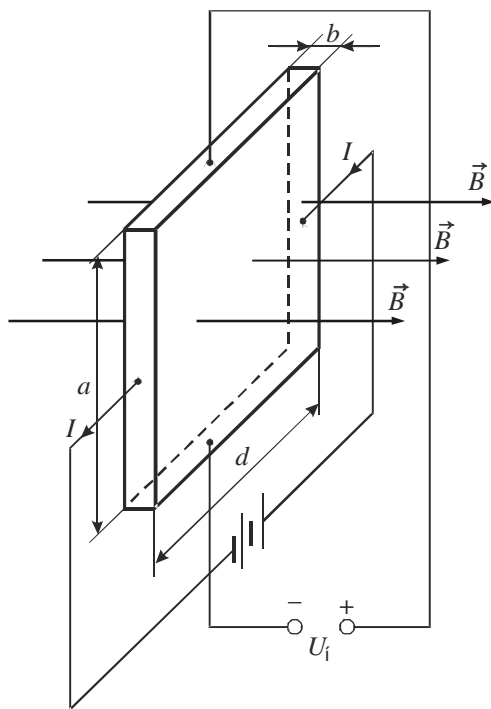


Рисунок 56.1

\*Холл Эдвин Герберт (1855–1938), американский физик.



При исследовании эффекта Холла в полупроводниках (селене, кремнии, германии, окислах ряда металлов и т.д.) выяснилось, что постоянная Холла для них примерно в  $10^5$  раз больше, чем в металлах; электропроводность в  $10^5$  раз меньше, примерно во столько же раз меньше и концентрация свободных электронов. **Постоянная Холла полупроводников с ростом температуры резко падает**, следовательно, **концентрация свободных электронов растет при увеличении температуры полупроводника**. Второй характерной особенностью полупроводников является то, что у некоторых из них разность потенциалов имеет противоположный знак – при таких же направлениях тока и индукции магнитного поля, как на рис. 56.1, нижняя грань пластины заряжается положительно. Это означает, что проводимость осуществляется за счёт движения положительных зарядов.

Измерения постоянной Холла позволяют определять концентрацию носителей тока  $n$  при известном типе носителей. Было обнаружено, что для одновалентных металлов концентрация электронов проводимости равна концентрации атомов. Это значит, что в *электронном газе* металла на каждый атом приходится один свободный электрон. Эффект Холла применяется для измерения величины магнитной индукции (датчики Холла), определения величины сильных разрядных токов.

• Давайте подумаем!

**56.1.** Будет ли наблюдаться эффект Холла, если по металлической пластинке пропускать переменный электрический ток?

**56.2.** Какие данные о свойствах проводников можно получить на основе экспериментального изучения эффекта Холла в них?

## Глава 14. Магнитное поле в веществе

### §57 Магнитное поле в веществе

#### 57.1 Намагничивание магнетика

**Магнетик** – термин, применяемый ко всем веществам при рассмотрении их магнитных свойств. Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств микрочастиц, образующих вещество, а также характером взаимодействия между ними.

Эксперименты показывают, что все вещества являются магнетиками, т.е. способны под действием магнитного поля намагничиваться. Одним из первых

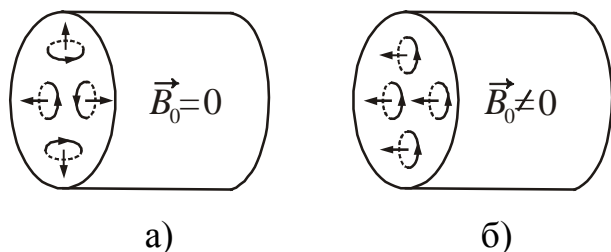


Рисунок 57.1

объяснение намагничивания тел дал А. Ампер. Он выдвинул гипотезу, согласно которой **в молекулах вещества циркулируют круговые (молекулярные) токи**. Каждый такой ток обладает магнитным моментом  $\vec{p}_m$  и создает в окружающем пространстве магнитное



поле. Магнитное поле намагниченного тела складывается из магнитных полей этих круговых токов. В ненамагниченном теле все элементарные токи расположены хаотически (рис. 57.1 а), поэтому во внешнем пространстве не наблюдается никакого магнитного поля. Процесс намагничивания тела заключается в том, что под влиянием внешнего магнитного поля его элементарные токи в большей или меньшей степени устанавливаются параллельно друг другу (рис. 57.1 б). Суммарный магнитный момент магнетика становится отличным от нуля.

В веществе различают два вида токов, создающих магнитное поле – макротоки и микротоки. **Макротоками** называются токи проводимости. **Микротоками** (молекулярными) называются токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах. Таким образом, магнитное поле в веществе является векторной суммой двух полей: внешнего магнитного поля, создаваемого макротоками, и внутреннего или собственного магнитного поля, которое создается микротоками.

Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  магнитного поля в веществе характеризует результирующее магнитное поле и равен геометрической сумме магнитных индукций внешнего  $\vec{B}_0$  и внутреннего  $\vec{B}'$  магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}' + \vec{B}_0. \quad (57.1)$$

Первичным источником магнитного поля в магнетиках являются макротоки. Их магнитные поля являются причиной намагничивания вещества, помещённого во внешнее магнитное поле.

Количественно намагничивание характеризуется вектором намагниченности.

**Намагниченность** ( $\vec{J}$ ) – векторная физическая величина, численно равная суммарному магнитному моменту молекул, заключённых в единице объёма.

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_{m_i}, \quad (57.2)$$

где  $\Delta V$  – физически бесконечно малый объём, взятый вблизи рассматриваемой точки;

$\vec{p}_{m_i}$  – магнитный момент отдельной молекулы.

$$[J] = \frac{A \cdot m^2}{m^3} = \frac{A}{m}.$$

Единица измерения намагниченности совпадает с единицей измерения напряжённости магнитного поля.

## 57.2 Классификация магнетиков

По характеру зависимости намагниченности  $\vec{J}$  от напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  магнетики делятся на три группы:

- диамагнетики
- парамагнетики
- ферромагнетики

Намагниченность изотропных парамагнетиков и диамагнетиков, находящихся в слабых магнитных полях, прямо пропорциональна напряжённости магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (57.3)$$

где  $\chi$  – **магнитная восприимчивость**. Магнитная восприимчивость зависит от физико-химических свойств материала. Для вакуума  $\chi = 0$ .

Безразмерная величина

$$\mu = 1 + \chi \quad (57.4)$$

называется **магнитной проницаемостью** вещества. Она является характеристикой магнитных свойств вещества. Для вакуума  $\mu = 1$ .

## 57.3 Диамагнетики. Парамагнетики

1. **Диамагнетики** – вещества, которые намагничиваются навстречу направлению действующего на них внешнего магнитного поля. Диамагнетизм обнаруживают только те вещества, атомы которых сами по себе не обладают магнитным моментом. При внесении такого вещества в магнитное поле в электронной оболочке каждого его атома по закону электромагнитной индукции возникают индукционные токи (см. §58). Эти токи создают в каждом атоме индуцированный магнитный момент, направленный по правилу Ленца противоположно внешнему магнитному полю, поэтому вектор намагниченности  $\vec{J}$  диамагнетиков направлен противоположно направлению напряжённости намагничивающего поля  $\vec{H}$ .

Магнитная восприимчивость  $\chi$  диамагнетиков отрицательна:  $\chi < 0$ . Численное значение  $\chi$  находится в пределах  $10^{-4} \div 10^{-5}$ . Магнитная проницаемость  $\mu < 1$ , но отличие от единицы невелико. Магнитная восприимчивость диамагнетиков практически не зависит от температуры, потому что диамагнитный эффект обусловлен внутриатомными процессами, на которые тепловое движение частиц не оказывает влияния. **Внешним проявлением диамагнетизма является выталкивание диамагнетика из неоднородного магнитного поля.** Особенно сильно этот эффект выражен у сверхпроводников.

К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, ряд металлов (висмут, олово, медь, цинк, серебро, золото, ртуть и др.), многие жидкости (вода, глицерин, нефть и её производные), большинство полупроводников (кремний, германий), а также вещества в сверхпроводящем состоянии.

**2. Парамагнетики** – вещества, которые намагничиваются в направлении действующего на них внешнего магнитного поля. Направление намагниченности  $\vec{J}$  парамагнетиков совпадает с направлением напряжённости намагничивающего поля  $\vec{H}$ .

Парамагнитные свойства объясняются наличием у атомов собственных магнитных моментов. Если внешнего магнитного поля нет, то из-за теплового движения магнитные моменты распределяются хаотично, поэтому намагниченность вещества в целом равна нулю. Внешнее магнитное поле индуцирует момент как у диамагнетиков, но при этом ещё вызывает преимущественную ориентацию собственных магнитных моментов атомов в одном направлении. Суммарный магнитный момент, вызванный ориентирующим действием внешнего поля, как правило, больше, чем индуцированный момент. Вещество намагничивается по направлению внешнего магнитного поля, то есть ведёт себя как парамагнетик.

Магнитная восприимчивость положительна:  $\chi > 0$ . Численное значение  $\chi$  находится в пределах  $10^{-3} \div 10^{-4}$ . Магнитная проницаемость парамагнетиков  $\mu > 1$ . Но отличие от единицы незначительно. Магнитная восприимчивость парамагнетиков сильно зависит от температуры. Чем выше температура, тем сильнее тепловое движение атомов, и как следствие – слабее намагничивание. Зависимость подчиняется закону Кюри\* (1895 год):

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (57.5)$$

где  $C$  – постоянная Кюри;  
 $T$  – абсолютная температура.

***Парамагнетики втягиваются в неоднородное магнитное поле.***

К парамагнетикам относятся кислород, воздух, оксид азота, щелочные и щёлочно-земельные металлы, алюминий, титан, молибден, марганец, палладий, платина, растворы железных и никелевых солей и др.

Парамагнитный эффект находит практическое применение в физике для получения сверхнизких температур.

Обратите внимание на то, что ***магнитная проницаемость  $\mu$  и парамагнитных, и диамагнитных веществ не зависит от напряжённости внешнего намагничивающего поля***, т. е. представляет собой постоянную величину, характеризующую данное вещество.

**Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Модель намагничивания парамагнетика.

<http://www.youtube.com/watch?v=nOjBP1MA89o&list=PLWM8IO-3TQjPLbEwfdiidIy-HwOkj1Mxv>

2. Диа- и парамагнетики в неоднородном поле.

<http://www.youtube.com/watch?v=Jf4xb4GjjEU&list=PLWM8IO-3TQjPLbEwfdiidIy-HwOkj1Mxv>

---

\*Кюри Пьер (1859–1906), французский физик, лауреат Нобелевской премии 1903 г.

## 57.4 Ферромагнетики

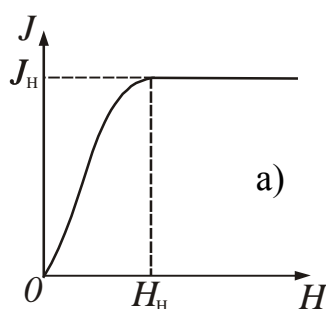
**Ферромагнетики** – вещества, способные обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. Свое название они получили по наиболее распространенному представителю – железу.

Ферромагнетизм наблюдается только у твёрдых веществ. К ферромагнетикам кроме железа, принадлежат никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения, некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами (например, сплав, содержащий 61% Cu, 24% Mn, 15% Al), а также сплавы системы неодим-железо-бор. Ферромагнетики являются сильномагнитными веществами. Их намагниченность в огромное число раз (до  $10^{10}$ ) превосходит намагниченность диа- и парамагнетиков, принадлежащих к категории слабомагнитных веществ.

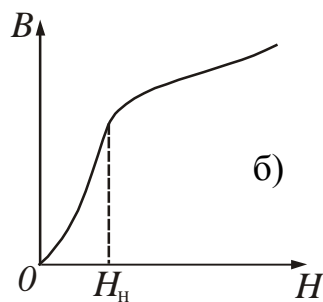
Ферромагнетики обладают следующими характерными свойствами:

1. Имеют очень большие значения  $\mu$  и  $\chi$  ( $\mu$  достигает значений  $10^4 \div 10^5$ ). Это означает, что ферромагнетики создают сильное добавочное магнитное поле.

2. Величины  $\mu$  и  $\chi$  не остаются постоянными, а являются функциями напряжённости внешнего поля. Поэтому намагниченность  $J$  и магнитная индукция  $B$  также не пропорциональны напряжённости  $H$  внешнего магнитного поля, а зависят от неё сложным образом (рис. 57.2).

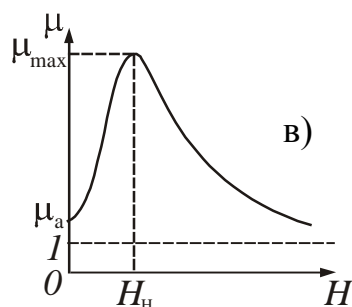


Зависимость намагниченности  $J$  от напряжённости  $H$  внешнего магнитного поля характеризуется наличием магнитного насыщения  $J_n$ , наступающего при  $H > H_n$  (рис. 57.2 а).  $H_n$  – напряжённость насыщения.



Магнитная индукция  $B$  растёт с возрастанием поля  $H$  и при  $H \geq H_n$  кривая переходит в прямую (рис. 57.2 б).

Зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от  $H$  имеет сложный характер.  $\mu_a$  – **начальная магнитная проницаемость** – предельное значение магнитной проницаемости при напряжённости магнитного поля, стремящейся к нулю. Эта характеристика имеет важнейшее значение при техническом использовании многих материалов. Экспериментально её определяют в слабых полях с напряжённостью порядка 0,1 А/м.



При стремлении напряжённости  $H$  к бесконечности магнитная проницаемость  $\mu$  асимптотически стремится к единице (рис. 57.2 в).

3. Ферромагнетикам свойственно явление магнитного гистерезиса. **Гистерезис** – явление отставания изменения  $B$  индукции магнитного поля от изменения напряжённости  $H$  переменного по величине и направлению внешнего магнитного поля.

Рисунок 57.2

На рис. 57.3 кривая 0–1 соответствует основной кривой намагничивания. Если довести намагничивание до насыщения (точка 1), а затем уменьшать напряжённость намагничивающего поля, то индукция  $B$  следует не по первоначальной кривой 0–1, а изменяется по кривой 1–2.

При  $H = 0$  сохраняется остаточная намагниченность, которая характеризуется **остаточной индукцией** –  $B_r$ .

Индукция обращается в нуль лишь под действием поля  $H_c$ , имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряжённость  $H_c$ , при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в нуль, называется **коэрцитивной силой**. Увеличивая обратное поле, затем уменьшая его и накладывая вновь положительное поле, получим, что индукция изменяется в соответствии с кривой 1–2–3–4–5–1, которая называется **петлей гистерезиса**. Перемагничивание ферромагнетика связано с изменением ориентации областей спонтанной намагниченности (см. п. 6) и требует совершения работы за счёт энергии внешнего магнитного поля. Количество тепла, выделившееся при перемагничивании, пропорционально площади петли гистерезиса. В зависимости от формы и площади петли ферромагнетики делят на:

- магнитномягкие (узкая петля гистерезиса,  $H_c \sim 1 \div 100$  А/м);
- магнитножесткие (широкая петля гистерезиса,  $H_c \sim 10^3 \div 10^5$  А/м).

Магнитномягкие материалы обеспечивают малые потери энергии при перемагничивании, поэтому применяются в основном в технике переменных токов, в частности в сердечниках трансформаторов. Магнитножесткие материалы хорошо сохраняют свои магнитные свойства, их используют для изготовления постоянных магнитов.

4. При намагничивании ферромагнетиков происходит изменение их линейных размеров и объёма. Это явление называется **магнитострикцией**. Относительное удлинение ферромагнетиков достигает величины  $\sim 10^{-5} - 10^{-2}$ . При этом магнитострикция может быть как положительной, так и отрицательной, т. е. размеры образца в направлении поля могут как увеличиваться (железо в слабых полях), так и уменьшаться (никель). Магнитострикция используется для получения ультразвуковых колебаний до 100 кГц.

5. Перечисленные выше свойства ферромагнитных веществ обнаруживаются при температурах, меньших точки Кюри. **Точка Кюри** ( $T_c$ ) – температура, при которой ферромагнетик теряет свои ферромагнитные свойства и становится парамагнетиком. Магнитная восприимчивость при температурах выше точки Кюри ( $T \geq T_c$ ) подчиняется закону Кюри – Вейса\*:

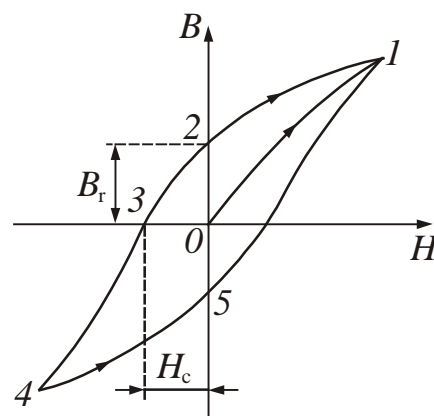


Рисунок 57.3

\*Вейс Пьер Эрнест (1865–1940), французский физик.

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}, \quad (58.6)$$

где  $C$  – постоянная Кюри.

Точка Кюри для никеля – 350°C, для сплава пермаллоя – 550°C, для электротехнической стали – 753°C, для железа – 790°C, для кобальта – 1150°C.

При понижении температуры ниже точки Кюри ферромагнитные свойства восстанавливаются.

6. Экспериментально доказано, что особые свойства ферромагнетиков обусловлены их доменным строением. Гипотеза о существовании доменов в ферромагнетиках была выдвинута Вейсом в 1907 году. Увидеть магнитные домены через микроскоп удалось лишь в 1931 году.

**Домены** – макроскопические области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания. Домены имеют размеры порядка  $1 \div 10$  мкм. В пределах каждого домена ферромагнетик спонтанно намагничен до насыщения и обладает определённым магнитным моментом. Направления этих моментов для разных доменов различны, поэтому при отсутствии внешнего поля суммарный момент образца равен нулю и образец в целом является ненамагниченным.

При включении внешнего магнитного поля домены, ориентированные по полю, растут за счёт доменов, ориентированных против поля. Такой рост в слабых полях имеет обратимый характер. В более сильных полях происходит одновременная переориентация магнитных моментов в пределах всего домена. Этот процесс является необратимым и служит причиной гистерезиса и остаточного намагничивания.

Теория ферромагнетизма разработана Я. И. Френкелем\* и В. Гейзенбергом\*. Согласно этой теории решающую роль в создании спонтанной намагниченности играют силы обменного взаимодействия, которые имеют квантовый характер.

Магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены наличием у электронов собственных (их также называют спиновыми) магнитных моментов. При определённых условиях в кристаллах возникают обменные силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу.

### **Посмотрите лекционные демонстрации.**

1. Точка Кюри.

[http://www.youtube.com/watch?v=ERWR8\\_qSmEI&list=PLWM8IO-3TQjPLbEwfdiidIy-HwOkj1Mxv](http://www.youtube.com/watch?v=ERWR8_qSmEI&list=PLWM8IO-3TQjPLbEwfdiidIy-HwOkj1Mxv)

2. Эффект Баркгаузена. Хруст костей ферромагнетика.

[http://www.youtube.com/watch?v=YiW\\_YFuHE3w&list=PLWM8IO-3TQjPLbEwfdiidIy-HwOkj1Mxv](http://www.youtube.com/watch?v=YiW_YFuHE3w&list=PLWM8IO-3TQjPLbEwfdiidIy-HwOkj1Mxv)

---

\*Френкель Яков Ильич (1865 – 1940), российский физик-теоретик.

\*Гейзенберг Вернер Карл (1901–1976), немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1932 г.

### 57.5 Условия на границе раздела двух магнетиков

Рассмотрим границу между двумя изотропными магнетиками с магнитными проницаемостями  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Пусть в магнетиках создано магнитное поле, магнитная индукция которого в первом магнетике  $\vec{B}_1$ , во втором  $\vec{B}_2$ .  $\vec{H}_1$  и  $\vec{H}_2$  – напряжённость магнитного поля соответственно в первом и втором магнетике. Векторы  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  можно представить в виде суммы нормальной и тангенциальной составляющих (рис. 57.4):

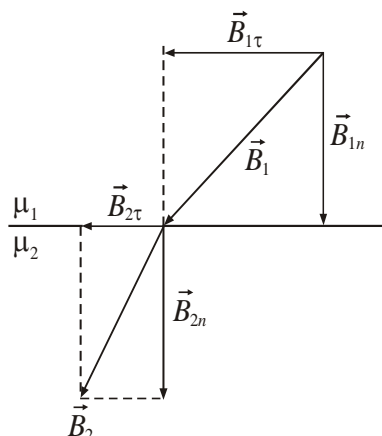


Рисунок 57.4

$$\vec{B}_1 = \vec{\tau} B_{1\tau} + \vec{n} B_{1n},$$

$$\vec{B}_2 = \vec{\tau} B_{2\tau} + \vec{n} B_{2n},$$

где  $\vec{\tau}$  – единичный вектор, направленный по касательной к поверхности раздела,  $\vec{n}$  – единичный вектор, направленный из первой среды во вторую по нормали к касательной.

Если по границе раздела не текут макроскопические токи, то для изотропного магнетика можно получить два граничных условия.

1. При переходе через границу раздела двух сред нормальная составляющая магнитной индукции не изменяется.

$$B_{2n} = B_{1n}. \quad (57.7)$$

Так как  $B = \mu\mu_0 H$ , то для напряжённости магнитного поля это условие запишется в виде:

$$\frac{H_{2n}}{H_{1n}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (57.8)$$

2. При переходе через границу раздела двух сред составляющая напряжённости магнитного поля, касательная к поверхности раздела двух сред, не изменяется.

$$H_{2\tau} = H_{1\tau}. \quad (57.9)$$

Для магнитной индукции второе условие имеет вид:

$$\frac{B_{2\tau}}{B_{1\tau}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (57.10)$$

Таким образом, при переходе через границу раздела двух магнетиков вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  ведет себя аналогично вектору электрического смещения  $\vec{D}$ , а вектор напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  – аналогично вектору напряжённости электрического поля  $\vec{E}$ .

### • Давайте подумаем!

**57.1.** Как ведут себя легкие небольшие стержни из висмута (диамагнетик) и магния (парамагнетик), которые свободно подвешены между полюсами электромагнита?

**57.2.** Почему магнит притягивает немагниченный железный предмет, например, железный гвоздь?



**57.3.** Имеется два одинаковых железных стержня, один из которых намагничен. Как узнать, какой из них намагничен, не пользуясь ничем, кроме этих стержней?

**57.4.** Можно ли транспортировать раскаленные стальные болванки в цехе металлургического завода при помощи электромагнитного крана?

**57.5.** В состав электротехнических сталей, применяемых, например, для сердечников трансформаторов, в качестве примеси вводят кремний. Какие свойства при этом улучшаются?

**57.6.** Изменяться ли индукция и напряжённость магнитного поля в соленоиде, если в него вставить: 1) алюминиевый сердечник; 2) железный?

## Глава 15. Электромагнитная индукция

### §58 Электромагнитная индукция

#### 58.1 Явление электромагнитной индукции

Опыты Эрстеда и Ампера показали, что вокруг проводников с током возникает магнитное поле. М. Фарадей\* выдвинул обратную идею: под действием изменяющегося магнитного поля в замкнутом проводнике должен возникать электрический ток. Для доказательства этой идеи Фарадей проделал ряд опытов. Один из них заключается в следующем.

Если полосовой магнит перемещать вдоль оси катушки К (рис. 58.1), то в ней появляется ток, который регистрирует гальванометр G.

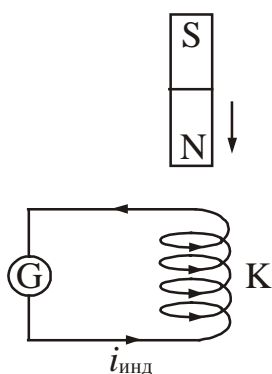


Рисунок 58.1

Направление тока зависит от того, каким полюсом был обращен магнит к катушке и от направления его движения. Тот же результат получался, если магнит оставался неподвижным, а катушка надевалась на магнит или снималась с него. Открытое Фарадеем явление было названо явлением электромагнитной индукции.

**Электромагнитной индукцией называется явление возникновения электродвижущей силы в проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.**

Возникшая эдс  $\mathcal{E}_i$  называется электродвижущей силой электромагнитной индукции. Если проводник замкнут, то возникает ток, который называют **индукционным**. Тогда можно дать другое определение явления.

**Электромагнитной индукцией называется явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.**

\*Фарадей Майкл (1791–1867), английский физик.



Дальнейшие эксперименты показали, что *эдс электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур*.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (58.1)$$

Магнитный поток может меняться за счёт изменения площади контура, при изменении угла между вектором индукции и нормалью, а также при изменении значения вектора магнитной индукции.

Выражение (58.1) называется законом Фарадея для электромагнитной индукции. Знак « $-$ » введён в формулу в соответствии с правилом Ленца.

Правило Ленца можно сформулировать следующим образом.

**Индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.**

**Пример:** При приближении полосового магнита к замкнутому контуру (рис. 58.2) в нём наводится индукционный ток, который своим магнитным действием препятствует приближению магнита и возрастанию магнитного потока, пронизывающего контур. При удалении магнита (рис. 58.3) от контура в нём наводится индукционный ток противоположного направления, который препятствует удалению магнита и уменьшению магнитного потока, пронизывающего контур.

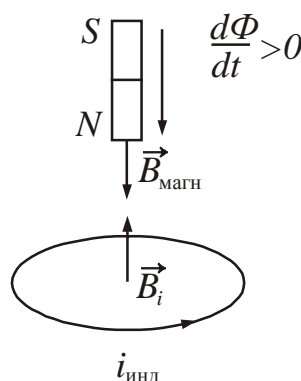


Рисунок 58.2

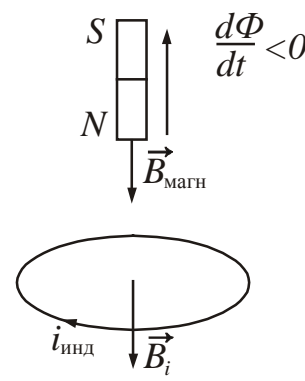


Рисунок 58.3

Если замкнутый контур состоит из  $N$  последовательно соединённых витков (например, соленоид), то закон электромагнитной индукции записывается следующим образом:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(N\Phi)}{dt}.$$

Величину  $\Psi = N\Phi$  называют полным магнитным потоком или **потоко-сцеплением**. С учетом этого:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (58.2)$$

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Закон Фарадея. Гибкий контур.

<http://www.youtube.com/watch?v=JbYaeOYOMTQ&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

2. Вихревое электрическое поле. Включение - выключение.

<http://www.youtube.com/watch?v=XccVfkMxjZ8&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

3. Перемещение проводника в магнитное поле.

<http://www.youtube.com/watch?v=xZjBqwXxiRw&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

4. Закон Фарадея. Потокосцепление.

[http://www.youtube.com/watch?v=OnoA59bW\\_XI&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2](http://www.youtube.com/watch?v=OnoA59bW_XI&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2)

## 58.2 Вихревое электрическое поле

Возьмём неподвижную проводящую катушку и будем вносить в неё магнит. Магнитное поле, пронизывающее катушку, при этом изменяется, в катушке возникнет индукционный ток. Ток возможен только при наличии эдс. Возникновение индукционного тока говорит о том, что в проводнике возникли сторонние силы, которые действуют на носители тока (электроны). Эти сторонние силы не связаны с химическими или тепловыми процессами. Они не могут быть магнитными силами, потому что магнитные силы работы над зарядами не совершают.

Следовательно, можно предположить, что индукционный ток обусловлен возникающим в проводнике электрическим полем, которое порождается переменным магнитным полем. Эта фундаментальная идея электродинамики была установлена Дж. Максвеллом.

Электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем, называется **индуцированным (вихревым) электрическим полем**. Оно создается в любой точке пространства, где имеется переменное магнитное поле, независимо от того, имеется ли там проводящий контур или нет. Контур позволяет лишь обнаружить возникающее электрическое поле. Таким образом, Дж. Максвелл обобщил представления М. Фарадея о явлении электромагнитной индукции, показав, что **физический смысл явления электромагнитной индукции состоит в возникновении индуцированного (вихревого) электрического поля, вызванного изменением магнитного поля**. Эдс индукции – это работа индуцированного электрического поля по перемещению единичного заряда по рассматриваемому замкнутому контуру.

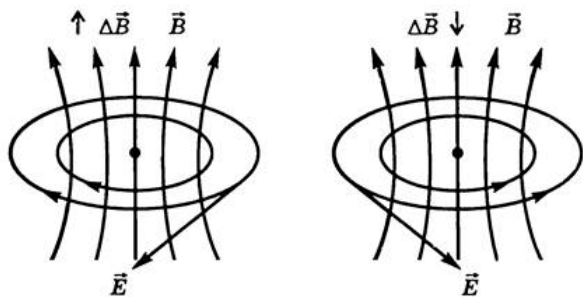


Рисунок 58.4

Линии индукции магнитного поля и линии напряжённости вихревого электрического поля расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 58.4).

Основные отличия индуцированного (вихревого) электрического поля от электростатического приведены в таблице 58.1

Таблица 58.1. Основные отличия вихревого электрического поля от электростатического

Электростатическое поле	Вихревое электрическое поле
1. Создается неподвижными электрическими зарядами.	1. Вызывается переменным магнитным полем.
2. Силовые линии поля разомкнуты. Поле является потенциальным.	2. Силовые линии замкнуты. Поле является вихревым.
3. Работа сил поля по перемещению единичного заряда по замкнутому контуру равна нулю.	3. Работа сил поля по перемещению единичного заряда по замкнутому контуру равна эдс индукции.

Взаимосвязь между электрическими и магнитными полями приводит к тому, что раздельное рассмотрение электрического и магнитного полей становится относительным. Действительно, электростатическое поле порождается неподвижными зарядами. Но если заряды неподвижны относительно одной инерциальной системы отсчёта, то относительно других инерциальных систем они могут двигаться. Следовательно, в этих системах они будут порождать и электрическое, и магнитное поле.

Неподвижный провод с постоянным током создаёт в каждой точке пространства постоянное магнитное поле. Но относительно других инерциальных систем отсчёта он тоже может двигаться, поэтому созданное им магнитное поле в этих системах будет меняться и создавать вихревое электрическое поле.

### 58.3 Принцип работы генератора переменного тока

Одним из важнейших применений явления электромагнитной индукции является преобразование механической энергии в электрическую.

Рассмотрим рамку, состоящую из  $N$  витков, которая вращается в магнитном поле ( $\vec{B} = \text{const}$ ) с постоянной угловой скоростью  $\omega$  (рис. 58.5).

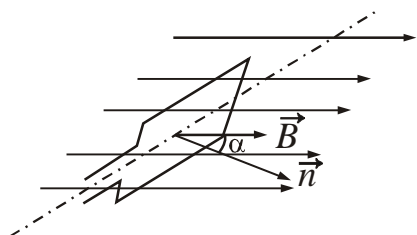


Рисунок 58.5

Полный магнитный поток, пронизывающий рамку, в любой момент времени определяется соотношением:

$$\Psi = NBS \cos \alpha,$$

где  $S$  – площадь рамки,

$\alpha$  – угол между векторами нормали  $\vec{n}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$ .

При равномерном вращении  $\alpha = \omega t$ .

Найдём эдс индукции, возникающую в рамке при её вращении, используя закон Фарадея (см. формулу 58.2):

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(NBS \cos \omega t)}{dt} = NBS\omega \sin \omega t$$

или

$$\varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t = \varepsilon_{\max} \sin \omega t, \quad (58.3)$$

где величину  $\varepsilon_{\max} = NBS\omega$  можно рассматривать как амплитудное значение переменной эдс.

Возникновение эдс индукции во вращающейся в магнитном поле рамке явилось основой для создания генераторов переменного тока. **Генератор переменного тока** – устройство, вырабатывающее переменный электрический ток.

Если концы рамки присоединить к вращающимся вместе с ней двум медным кольцам, соприкасающимся с двумя неподвижными угольными щётками, а к щёткам присоединить электрическую цепь, то по цепи потечёт переменный ток  $i$ , изменяющийся так же, как изменяется эдс  $\varepsilon$ .

По закону Ома:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{NBS\omega}{R} \sin \omega t, \\ i = i_{\max} \sin \omega t, \quad (58.4)$$

где  $i_{\max} = \frac{NBS\omega}{R}$  – максимальное (амплитудное) значение силы тока;

$i$  – мгновенное значение тока.

Большинство приборов, измеряющих переменный ток и переменное напряжение, показывают не мгновенные значения тока и напряжения, а действующие (эффективные) значения. Действующие значения силы тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$  определяются мощностью, выделяемой в цепи переменного тока. Они связаны с амплитудными значениями силы тока и напряжения следующими соотношениями:

$$I_d = \frac{i_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad U_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (58.5)$$

Действующие значения напряжения и тока являются важнейшими электротехническими параметрами устройств. Именно эти величины указываются в паспортах любых электроустановок и устройств.

В рассмотренном генераторе эдс индукции возникает при изменении положения контура в постоянном магнитном поле. Существуют генераторы, в которых эдс индукции возникает за счёт изменения магнитного поля. Такие генераторы называются линейными.

### Посмотрите лекционную демонстрацию.

1. Динамо-машина (генератор переменного тока).

<http://www.youtube.com/watch?v=xDCVTFMWfU8&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

2. Линейный генератор своими руками:

<https://www.youtube.com/watch?v=ASBE7OPjXkI>

## 58.4 Токи Фуко

Индукционные токи, которые возникают в сплошных массивных проводниках, находящихся в переменных магнитных полях, называют **вихревыми токами или токами Фуко\***. Направление токов Фуко, как и индукционных токов в линейных проводниках, подчиняется правилу Ленца: эти токи направлены так, чтобы их магнитное поле противодействовало изменению магнитного потока, индуцирующего вихревые токи. Поэтому движущиеся в сильном магнитном поле хорошие проводники испытывают сильное торможение, обусловленное взаимодействием токов Фуко с магнитным полем. Это свойство используют для демпфирования (успокоения) подвижных частей гальванометров, сейсмографов и др. приборов.

Тепловое действие токов Фуко используются в индукционных печах. Такая печь представляет собой катушку, питаемую высокочастотным током большой силы. Если поместить внутрь катушки проводящее тело, в нём возникают интенсивные вихревые токи. Эти токи могут разогреть тело до плавления. Таким способом осуществляют плавление металлов в вакууме, это дает возможность получать материалы исключительно высокой чистоты.

В проводниках, по которым текут переменные токи, также возникают токи Фуко. Они направлены так, что ослабляют ток внутри провода и усиливают вблизи поверхности. В результате быстропеременный ток как бы вытесняется на поверхность проводника. Это явление называется скин-эффектом (*skin* (англ.) – кожа). Из-за скин-эффекта внутренняя часть проводников в высокочастотных цепях оказывается бесполезной. Поэтому в высокочастотных цепях применяют проводники в виде трубок.

При скин-эффекте плотность тока по сечению проводника будет неодинаковой: максимальной у поверхности и минимальной на оси проводника. Протекание тока при этом будет сопровождаться неравномерным нагревом – почти всё тепло выделяется в приповерхностном слое. Этот эффект используется для закаливания поверхности металлических изделий, подвергающихся ударным нагрузкам: коленчатые валы, шестерни и т. д. Так как разогреву подвергается только поверхностный слой, а основная масса остается холодной, то закалённая деталь имеет твёрдую поверхность, но не обладает хрупкостью (металл под тонким слоем поверхности сохраняет свою вязкость). Изменяя частоту поля, можно регулировать глубину закаливания деталей.

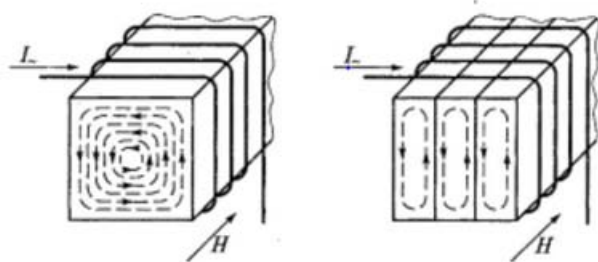


Рисунок 58.6

Токи Фуко бывают и нежелательными. В электрических машинах и трансформаторах они приводят к значительным потерям энергии. На рис. 58.6 а показано распределение токов Фуко в сплошном сердечнике.

\*Фуко Жан Бернар Леон (1819–1868), французский физик-экспериментатор.

Поэтому сердечники трансформаторов набирают из тонких пластин, разделённых изолирующими прослойками. Пластины располагают параллельно вектору напряжённости магнитного поля (рис. 58.6 б). Токи Фуко в этом случае образуются в плоскостях, перпендикулярных вектору напряжённости магнитного поля. Такое расположение пластин уменьшает потери энергии.

Ещё одним примером использования токов Фуко является индукционная плита – кухонная электрическая плита, разогревающая металлическую посуду индуцированными токами, создаваемыми высокочастотным магнитным полем частотой 20 – 100 кГц. При работе с плитой желательно использовать посуду из материала, который эффективно поглощал бы энергию магнитного поля. Подходящим материалом являются металлы-ферромагнетики, в частности обыкновенная сталь. Скин-слой в этих материалах намного тоньше, поэтому сопротивление вихревым токам намного выше и количество выделившегося тепла больше. Современные индукционные плиты автоматически распознают пригодную посуду и только в этом случае переходят в рабочий режим (включают магнитное поле). Индукционная печь:

<https://www.youtube.com/watch?v=OwXOdRSq7xo>

### Посмотрите лекционные демонстрации.

1. Электромагнитное торможение: маятник.

<http://www.youtube.com/watch?v=fSOQGed92Yk&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

2. Парение катушки с током. "Гроб Магомеда".

<http://www.youtube.com/watch?v=zPCEBVyUAI8&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

3. Парящий магнит. Постоянный магнит над сверхпроводником.

<http://www.youtube.com/watch?v=p3tsHuua00k&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

### • Давайте подумаем!

**58.1.** Замкнутое металлическое кольцо движется в однородном магнитном поле поступательно. Возникнет ли индукционный ток в кольце?

**58.2.** Нормаль к круглому витку проволоки некоторого диаметра образует угол  $\alpha$  с направлением однородного магнитного поля. Виток движется так, что его нормаль вращается вокруг направления магнитного поля с постоянной скоростью, причем угол  $\alpha$  остается неизменным. Чему равна эдс, возникающая в витке?

**58.3.** Рамка произвольной формы вращается в однородном магнитном поле. Ось вращения совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля. Будет ли в рамке индуцироваться эдс?

**58.4.** Металлический стержень, не соединённый с другими проводниками, движется в магнитном поле. Почему, несмотря на наличие эдс индукции, по стержню не идёт ток?

**58.5.** В короткозамкнутую катушку один раз быстро, другой раз – медленно вдвигают магнит. Одинаковый ли заряд проходит через катушку в первый и во второй раз?



**58.6.** Имеется вертикально расположенная катушка, на которой лежит металлический предмет. Почему этот предмет нагревается, когда по виткам катушки течёт переменный ток, и остается холодной, когда течёт постоянный ток?

## §59 Самоиндукция

*Самоиндукция – это явление возникновения электродвижущей силы в проводящем контуре при изменении электрического тока, идущего по этому контуру.* Самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции. При изменении тока в контуре меняется поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром. В результате этого в нём возбуждается эдс самоиндукции. При увеличении силы тока в цепи эдс самоиндукции препятствует его возрастанию, а при уменьшении тока – его убыванию. Можно сказать, что самоиндукция подобна явлению инерции в механике. Из эксперимента следует, что величина эдс самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока и величине, называемой индуктивностью.

### 59.1 Индуктивность контура

Электрический ток, текущий в проводящем контуре (например, в катушке), создаёт магнитное поле. Это поле охватывает всё окружающее пространство, в том числе и пространство внутри контура (катушки). Полный магнитный поток  $\Psi$ , пронизывающий контур, будет прямо пропорционален току:

$$\Psi = LI. \quad (59.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  между полным магнитным потоком (потокосцеплением) и силой тока называется индуктивностью контура.

*Индуктивность ( $L$ )* – это скалярная физическая величина, характеризующая магнитные свойства контура и равная отношению полного магнитного потока, сцепленного с контуром, к силе тока, текущему по этому контуру:

$$L = \frac{\Psi}{I}. \quad (59.2)$$

За единицу индуктивности в СИ принимается индуктивность такого контура (проводника), который при силе тока в нём 1 А создаёт сцепленный с ним полный магнитный поток  $\Psi$ , равный 1 Вб. Эту единицу называют генри.

$$[L] = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \text{Гн (генри*)}.$$

Линейная зависимость  $\Psi$  от  $I$  наблюдается только в том случае, если магнитная проницаемость  $\mu$  среды, которой окружён контур, не зависит от напряжённости  $H$  поля. Это означает, что среда должна быть неферромагнитная. В противном случае  $\mu$  сложным образом зависит от тока и, следовательно, зависимость полного магнитного потока от тока также будет довольно сложная.

---

\*Генри Джозеф (1799–1878), американский физик.

Однако, соотношение (59.1) распространяют и на этот случай, считая индуктивность  $L$  функцией тока  $I$ .

Из сказанного следует, что индуктивность зависит от геометрической формы и размеров контура, а также магнитных свойств среды, в которой он находится. Если контур жёсткий и вблизи него нет ферромагнетиков, то индуктивность является величиной постоянной. Индуктивность можно рассчитывать на основе геометрии проводника.

**Пример.** Расчёт индуктивности соленоида.

Возьмём соленоид такой длины, чтобы его можно было считать бесконечно длинным. На практике это означает, что  $d \ll l$  (рис. 59.1). При протекании по обмотке тока  $I$  внутри соленоида возбуждается однородное магнитное поле, индукция которого

$$B = \mu_0 \mu n I,$$

где  $n = \frac{N}{l}$  – плотность намотки;

$I$  – сила тока.

Полный магнитный поток, сцепленный с соленоидом

$$\Psi = \Phi N,$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, пронизывающий один виток,

$N$  – число витков соленоида.

$$\Phi = B S,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля;

$S$  – площадь поперечного сечения соленоида.

Записанные соотношения подставим в формулу (59.2), получим:

$$L = \frac{\mu_0 \mu n S N^2}{l} = \mu_0 \mu n^2 l S, \quad (59.3)$$

$$\text{или} \quad L = \mu_0 \mu n^2 S l = \mu_0 \mu n^2 V, \quad (59.4)$$

$$\text{или} \quad L = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{l}, \quad (59.5)$$

где  $lS = V$  – объём соленоида.

Из формулы (59.4) следует, что индуктивность соленоида, не имеющего ферромагнитного сердечника, пропорциональна квадрату плотности намотки витков.

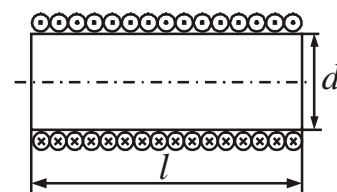


Рисунок 59.1



## 59.2 Эдс самоиндукции

Самоиндукция является частным случаем явления электромагнитной индукции. Воспользуемся законом Фарадея для электромагнитной индукции (см. формулу (58.2)):

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Согласно (59.1) полный магнитный поток:

$$\Psi = LI.$$

Сделаем замену, получим:

$$\varepsilon_s = -\frac{d(LI)}{dt}. \quad (59.6)$$

Если сила тока в контуре изменяется, то эдс самоиндукции будет равна:

$$\varepsilon_s = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right) = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dI} \cdot \frac{dI}{dt}\right) = -\left(L + I\frac{dL}{dI}\right) \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (59.7)$$

Величину  $\left(L + I\frac{dL}{dI}\right)$  обозначим через  $L_{\text{дин}}$  и назовём динамической индуктивностью. В случае изменяющейся силы тока

$$\varepsilon_s = -L_{\text{дин}} \frac{dI}{dt}. \quad (59.8)$$

Если контур жёсткий и вблизи него нет ферромагнетиков, то индуктивность  $L$  является величиной постоянной, и её называют статической. В этом случае:

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}, \quad (59.9)$$

так как в выражении (59.7) производная индуктивности по току при этих условиях обращается в нуль:  $\frac{dL}{dI} = 0$ .

Из формул (59.8) и (59.9) следует, что **эдс самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока**. Знак « $-$ » обусловлен правилом Ленца, согласно которому индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.

Соотношение (59.9) дает возможность определить индуктивность как коэффициент пропорциональности между скоростью изменения силы тока в контуре и возникающей вследствие этого эдс самоиндукции. Однако, такое определение правомерно лишь в случае, когда  $L = \text{const}$ .

### 59.3 Токи при замыкании и размыкании цепи

При любом изменении токов, том числе при их включении и выключении, в проводящем контуре возникает эдс самоиндукции. В результате этого в контуре возникают индукционные токи, которые называют *экстратоками*. По правилу Ленца экстратоки всегда направлены так, чтобы препятствовать изменению токов, создаваемых источниками. При выключении источника экстраток имеет такое же направление, что и ток, создаваемый источником, при включении – направлен в сторону, противоположную току источника. Следовательно, наличие индуктивности приводит к тому, что возникающий индукционный ток, накладываются на основной ток, замедляет его возрастание или препятствует его убыванию.

Установим характер изменения тока в цепи, содержащей индуктивность. Будет считать, что индуктивность не зависит от тока, т.е.  $L = \text{const}$ .

#### а) Замыкание цепи

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника, эдс которого  $\varepsilon$ , и параллельно соединённых резистора сопротивлением  $R$  и катушки индуктивностью  $L$ .  $\Pi$  – переключатель (рис. 59.2).

После замыкания переключателя ток не сразу достигнет установившегося значения  $I_0$ , а будет нарастать постепенно. Одновременно будет увеличиваться магнитный поток, пронизывающий катушку. По закону электромагнитной индукции изменяющийся магнитный поток вызовет появление эдс индукции и соответствующий ей индукционный экстраток замыкания. По закону Ома:

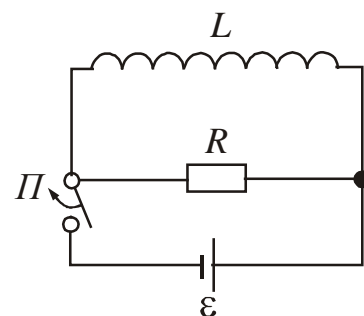


Рисунок 59.2

$$IR = \varepsilon + \varepsilon_s = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}$$

Разделив это уравнение на  $L$ , приведём его к следующему виду:

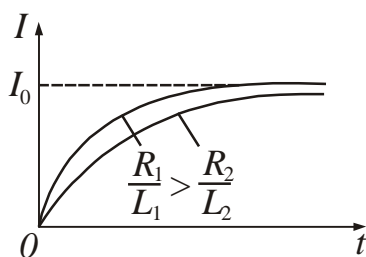


Рисунок 59.3

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L}I = \frac{\varepsilon}{L}.$$

Решая данное линейное неоднородное дифференциальное уравнение (попробуйте выполнить это самостоятельно) и, учтя, что в момент времени  $t = 0$  сила тока равна нулю, получим:

$$I = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (59.10)$$

График возрастания силы тока приведён на рис. 59.3. Из графика следует, что чем меньше индуктивность цепи и больше её сопротивление, тем быстрее нарастает ток.

### б) Размыкание цепи.

В момент времени  $t = 0$  отключим источник переключателем  $\Pi$  (рис. 59.2). Сила тока начнёт убывать, в цепи возникает эдс самоиндукции. По закону Ома:

$$IR = \varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Разделим уравнение на  $L$ , получим:

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I = 0.$$

Решая данное линейное однородное дифференциальное уравнение (попробуйте выполнить это самостоятельно) и, учтя, что при  $t = 0$  сила тока имела значение  $I_0$ , получим:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (59.11)$$

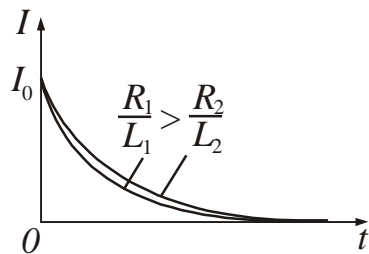


Рисунок 59.4

После отключения источника сила тока в цепи убывает по экспоненциальному закону. График зависимости  $I = f(t)$  приведён на рис. 59.4. Из графика следует, что чем больше индуктивность и чем меньше сопротивление, тем медленнее спадает ток в цепи.

При завершении размыкания сопротивление разомкнутой цепи стремится к бесконечности. Можно показать, что при значительном увеличении сопротивления цепи эдс самоиндукции может намного превзойти эдс источника. Это может вызвать пробой изоляции, порчу электроизмерительных приборов, пробой воздушного зазора между контактами выключателя. Поэтому контур, содержащий индуктивность, надо размыкать плавно, т.е. наращивать сопротивление цепи медленно.

### Посмотрите лекционную демонстрацию.

Ток при замыкании и размыкании цепи с индуктивностью. Можно ли, выключая прибор, сжечь его?

<http://www.youtube.com/watch?v=r8fE65jvWEo&list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2>

### • Давайте подумаем!

**59.1.** Можно ли считать индуктивность соленоида с железным сердечником постоянной величиной для этого соленоида?

**59.2.** Как уменьшить индуктивность катушки, имеющей железный сердечник, при условии, что габариты обмотки (её длина и поперечное сечение) останутся неизменными?

**59.3.** Если магнитный поток, пронизывающий каждый виток проволоки, один и тот же, то индуктивность катушки рассчитывается по формуле  $L = \frac{N\Phi}{I}$ . Каким

способом можно рассчитать индуктивность катушки, витки которой пронизываются различными потоками?

**59.4.** Правилами электробезопасности запрещено производить монтажные переключения в электрических цепях, когда они находятся под напряжением свыше 30 В. Почему такие переключения особенно недопустимы, если в цепь включены катушки индуктивности (дрессели, трансформаторы и пр.)?

**59.5.** График изменения индукционного тока при размыкании цепи, в которой имеется катушка индуктивности, приведён на рис 59.4. Что означает площадь фигуры, ограниченной графиком и осью времени? Изменение какой магнитной величины можно определить по графику?

## §60 Взаимная индукция

**Взаимной индукцией называется явление возникновения электродвижущей силы в одном из контуров при изменении тока в другом.**

Рассмотрим два близко расположенных контура 1 и 2 (рис. 60.1). В кон-

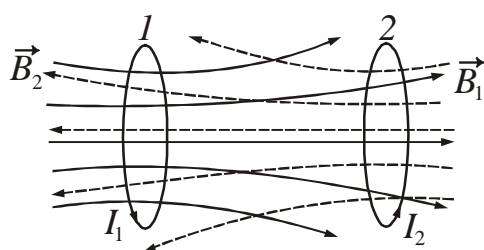


Рисунок 60.1

туре 1 течет ток  $I_1$ , который создает магнитный поток  $\Phi_{21}$ , пронизывающий контур 2. Силовые линии магнитного поля, создаваемого током  $I_1$ , изображены на рисунке сплошными линиями. Поток  $\Phi_{21}$  пропорционален силе тока  $I_1$ :

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1. \quad (60.1)$$

Согласно закону электромагнитной индукции при изменении тока  $I_1$  в контуре 2 индуцируется эдс:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (60.2)$$

Коэффициент пропорциональности  $L_{21}$  называется взаимной индуктивностью контуров 2 и 1.

**Взаимная индуктивность** – это скалярная физическая величина, характеризующая магнитную связь двух или более контуров и численно равная магнитному потоку, который создаётся током в один ампер в одном контуре и пронизывает второй контур. Взаимная индуктивность зависит от размеров и формы контуров 1 и 2, от их взаимного расположения. Если среда ферромагнитная, то коэффициент взаимной индукции будет зависеть ещё и от магнитной проницаемости среды. Измеряется взаимная индуктивность в генри.

Аналогично, при протекании в контуре 2 тока силы  $I_2$  возникает магнитный поток  $\Phi_{12}$ , сцепленный с контуром 1:

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2, \quad (60.3)$$

где  $L_{12}$  – коэффициент взаимной индукции контуров 1 и 2.

При изменении тока  $I_2$  в контуре 1 индуцируется эдс:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (60.4)$$

Если контуры находятся в неферромагнитной среде, то  $L_{12} = L_{21}$ . Поэтому можно не делать различия между  $L_{12}$  и  $L_{21}$  и просто говорить о взаимной индуктивности двух контуров.

Найдём взаимную индуктивность двух катушек, намотанных на общий тороидальный железный сердечник (рис. 60.2). Все силовые линии магнитного поля, создаваемого электрическим током в одном из контуров, пронизывают другой контур. По первой катушке, содержащей  $N_1$  витков, течет ток  $I_1$ . При этом внутри катушки создаётся магнитное поле

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 N_1 I_1}{l}, \quad (60.5)$$

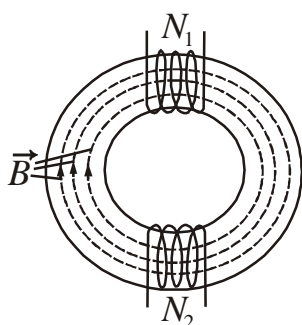


Рисунок 60.2

где  $l$  – длина сердечника;

Полный магнитный поток, пронизывающий вторую катушку с числом витков  $N_2$ , будет равен

$$\Psi_{21} = \frac{\mu\mu_0 N_1 N_2 S}{l} I_1, \quad (60.6)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника:

Сравнение выражения (60.6) с формулой (60.1) позволяет сделать вывод, что

$$L_{21} = \frac{\mu\mu_0 N_1 N_2 S}{l}. \quad (60.7)$$

Аналогичное значение можно получить для  $L_{12}$ :

$$L_{12} = \frac{\mu\mu_0 N_1 N_2 S}{l}. \quad (60.8)$$

В данном случае нельзя утверждать, что  $L_{12}$  равно  $L_{21}$ , т. к. величина, входящая в формулы, зависит от напряжённости  $H$  поля в сердечнике.

На явлении взаимоиндукции основана работа трансформатора, который служит для повышения или понижения напряжения переменного тока.

## §61 Энергия магнитного поля

Рассмотрим цепь, изображённую на рис. 61.1. Если замкнуть переключатель  $P$ , то по цепи потечёт ток, который создает в катушке (соленоиде) магнитное поле. Если разомкнуть переключатель, то через сопротивление  $R$  будет течь убывающий ток, поддерживаемый возникающей в соленоиде эдс самоиндукции. Работа, совершаемая этим током за время  $dt$ :

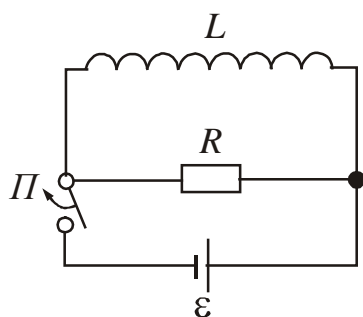


Рисунок 61.1

$$\delta A = \varepsilon_s I dt = -L \frac{dI}{dt} I dt = -LI dI, \quad (61.1)$$

(эдс самоиндукции  $\varepsilon_s$  заменили по формуле (59.9)).

Работа, совершаемая в цепи за время, в течение которого ток уменьшается от первоначального значения  $I$  до нуля:

$$A = -\int_I^0 LI dI = \frac{LI^2}{2}, \quad (61.2)$$

Индуктивность  $L$  катушки считаем постоянной.

Совершение работы сопровождается исчезновением магнитного поля, которое существовало в соленоиде. Так как никаких других изменений не произошло, то можно сделать вывод, что магнитное поле является носителем энергии, за счёт которой совершается работа. По закону сохранения энергия магнитного поля:

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (61.3)$$

Выразим энергию магнитного поля через величины, характеризующие само поле. Если соленоид бесконечно длинный, то его индуктивность

$$L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

Напряжённость поля внутри соленоида  $H = nI$ .

Отсюда

$$I = \frac{H}{n}.$$

(см. формулы (59.4) и (52.17)).

Подставим значение  $L$  и  $I$  в выражение (61.3) и, проведя преобразования, получим:

$$W = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V. \quad (61.4)$$

Так как магнитное поле бесконечного соленоида однородно, то энергия распределена по его объёму с постоянной плотностью  $w$ .

**Объёмная плотность энергии** равна отношению энергии к объёму:

$$w_m = \frac{W}{V} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}. \quad (61.5)$$

Отсюда следует, что объёмная плотность энергии пропорциональна квадрату напряжённости магнитного поля.

Используя соотношение (51.3), можно формуле (61.5) придать вид:

$$w_m = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}. \quad (61.6)$$

Таким образом, *носителем энергии является магнитное поле*, которое локализовано в пространстве с объёмной плотностью  $w$ .

Напоминаем, что раздельное рассмотрение электрического и магнитного полей является относительным. В общем случае существует единое электромагнитное поле, как одна из форм материи.

• **Давайте подумаем!**

**61.1.** Какие превращения энергии происходят в электрической цепи при нарастании тока после её замыкания?

**61.2.** При нагревании выше точки Кюри магнит размагничивается. В какие виды при этом превращается энергия магнитного поля?

## §62 Магнитные измерения

**Магнитные измерения** – это измерения характеристик магнитного поля или магнитных свойств веществ (материалов). К измеряемым характеристикам магнитного поля относятся: вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$ , поток вектора магнитной индукции (магнитный поток)  $\Phi$ , градиент магнитного поля и др.

Для измерения магнитных характеристик применяют следующие методы: баллистический, магнетометрический, электродинамический, индукционный, мостовой, нейтронографический, резонансный и др.

**Баллистический метод** основан на измерении баллистическим гальванометром заряда  $q$ , переносимого индукционным током через надетую на образец измерительную катушку с числом витков  $N$  при быстром изменении сцепленного с ней магнитного потока  $\Phi$ . Изменение магнитного потока

$$\Delta\Phi = \frac{qR}{N},$$

где  $R$  – сопротивление цепи. Баллистическим методом определяют основную кривую индукции  $B = f(H)$ , кривую намагничивания  $J = f(H)$ , петлю гистерезиса, различные виды проницаемости.

**Магнетометрический метод** основан на воздействии исследуемого намагниченного образца на расположенный вблизи него постоянный магнит. Распространён действующий по этому принципу астатический магнитометр. Он состоит из двух одинаковых последовательно включённых в цепь катушек – намагничивающей и компенсационной, между которыми на подвесе укреплён магнитный датчик: система из двух линейных магнитов одинаковых размеров с равными магнитными моментами (астатическая система). Магниты расположены параллельно друг другу полюсами в разные стороны. Действие магнитных

полей катушек на астатическую систему взаимно компенсировано. Образец, помещаемый в намагничивающую катушку, нарушает скомпенсированность полей и вызывает поворот системы магнитов. По углу поворота системы определяют магнитный момент образца. Далее можно вычислить  $J$ ,  $B$  и  $H$ .

Метод даёт возможность найти зависимость  $B(H)$  и  $J(H)$ , петлю гистерезиса и магнитную восприимчивость. Благодаря высокой чувствительности магнитометрического метода его применяют для измерения геомагнитного поля и решения ряда метрологических задач.

Иногда для измерения характеристик магнитного поля, в частности в промышленных условиях, применяется *электродинамический метод*, при котором измеряется угол поворота рамки с током, находящейся в магнитном поле намагниченного образца. Преимущество метода – возможность градуирования шкалы прибора непосредственно в единицах измеряемой величины – в Тл (для  $B$ ) и А/м (для  $H$ ).

Для исследования ферромагнитных веществ в широком интервале значений  $H$  используют *индукционный метод*, который позволяет измерять  $B(H)$ ,  $J(H)$ , петлю гистерезиса и различные виды проницаемости. Он основан на измерении эдс индукции, которая возбуждается во вторичной обмотке, намотанной на образец, при пропускании намагничивающего переменного тока через первичную обмотку. Этот метод может быть также использован для измерения намагниченности в сильных импульсных магнитных полях и магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ в радиочастотном диапазоне. Этот метод используется, в частности, в индукционном магнитометре, в котором исследуемый образец колеблется в магнитном поле и при этом возбуждает эдс в измерительных катушках.

Приборы для магнитных измерений классифицируют по их назначению, условиям применения, по принципу действия чувствительного элемента (датчика, или преобразователя). Приборы для измерения напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$ , его индукции  $\vec{B}$ , магнитного момента и ряда других магнитных характеристик вещества обычно называют магнитометрами, из них некоторые имеют своё наименование: для измерения магнитного потока – флюксметры или веберметры; потенциала поля – магнитные потенциалометры; градиента – градиентометры; коэрцитивной силы – коэрцитиметры и т.д.

Индуктивность элементов электрических цепей определяют с помощью прибора, который называют измерителем индуктивности (генриметр). Современные генриметры обеспечивают измерение индуктивности в диапазоне  $10^{-8} \div 10^5$  Гн при погрешности до 0,1%.



• **Обратите внимание!**

Векторную величину  $\vec{B}$ , являющуюся силовой характеристикой магнитного поля, логично было бы по аналогии с напряжённостью  $\vec{E}$  электрического поля назвать напряжённостью магнитного поля. Однако по историческим причинам основную характеристику магнитного поля называли «магнитной индукцией». Название «напряжённость магнитного поля» оказалось присвоенным вспомогательной величине  $\vec{H}$ , аналогичной вспомогательной характеристике  $\vec{D}$  электрического поля. Напомним, что  $\vec{D}$  – электростатическая индукция, которая имеет второе название – вектор электрического смещения.

Приведённые ниже таблицы позволяют установить сходство и различие между парами векторов напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$ , электрического смещения  $\vec{D}$  и напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$ , поляризованности  $\vec{P}$  и намагниченности  $\vec{J}$ .

**Электрические векторы**

Наименование	Символ	Связь	Поведение на границе раздела сред
1. Напряжённость электрического поля	$\vec{E}$	Со всеми зарядами	Тангенциальная составляющая не меняется
2. Электростатическая индукция	$\vec{D}$	Только со свободными зарядами	Нормальная составляющая не меняется
3. Поляризованность	$\vec{P}$	Только с поляризованными зарядами	Вектор пропадает в вакууме

**Магнитные векторы**

Наименование	Символ	Связь	Поведение на границе раздела сред
1. Магнитная индукция	$\vec{B}$	Со всеми токами	Нормальная составляющая не меняется
2. Напряжённость магнитного поля	$\vec{H}$	Только с внешними токами	Тангенциальная составляющая не меняется
3. Намагниченность	$\vec{J}$	Только с молекулярными токами магнетика	Вектор пропадает в вакууме

### *Различайте следующие, близкие по звучанию, термины*

**Магнитная индукция** – векторная величина  $\vec{B}$ , являющаяся силовой характеристикой магнитного поля. Численно равна отношению максимального вращающего момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле, к произведению силы тока в контуре на его площадь.

**Электромагнитная индукция** – явление возникновения электродвижущей силы в проводящем контуре при любом изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.

**Самоиндукция** – явление возникновения электродвижущей силы в проводящем контуре при изменении электрического тока, идущего по этому контуру.

**Взаимная индукция** – явление возникновения электродвижущей силы в одном из контуров при изменении силы электрического тока в другом контуре.

*Термин применяется к объектам, к которым его применять нельзя*

**Коэрцитивная сила** – напряжённость магнитного поля, в котором ферромагнитный образец, первоначально намагниченный до насыщения, полностью размагничивается. Термин не имеет ничего общего с термином «сила» из курса механики.

- Изучив раздел «Электромагнетизм», студент должен **ЗНАТЬ**:

#### **Суть понятий:**

Магнитное поле, линии магнитной индукции, элемент тока. Магнетик, парамагнетик, диамагнетик, ферромагнетик, коэрцитивная сила, гистерезис, домен. Индукционный ток. ЭДС индукции.

#### **Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:**

Магнитная индукция, напряжённость магнитного поля. Магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость, намагниченность. Магнитный поток, потокосцепление, магнитный момент. Индуктивность.

#### **Гипотезы:**

Гипотеза Ампера.

#### **Законы:**

Закон Био – Савара – Лапласа. Закон полного тока. Принцип суперпозиции полей. Закон Ампера. Закон электромагнитной индукции. Закон Кюри. Закон Кюри – Вейса.

#### **Явления:**

Эффект Холла. Явление электромагнитной индукции. Явление самоиндукции. Явление взаимной индукции.

### **Формулы:**

Связь магнитной индукции с напряжённостью магнитного поля. Расчёт магнитной индукции и напряжённости магнитных полей прямого тока, кругового тока, соленоида. Сила взаимодействия бесконечно длинных параллельных токов. Вращающий момент, действующий на рамку с током в магнитном поле. Сила Лоренца. ЭДС Холла. Работа перемещения контура с током и проводника с током в магнитном поле. Индуктивность соленоида. Энергия магнитного поля, объёмная плотность энергии магнитного поля. Токи замыкания и размыкания.

### **Графики:**

Графики зависимости намагничённости, магнитной индукции и магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряжённости внешнего намагничивающего поля. Петля гистерезиса.

### **Классические опыты:**

Опыт Эрстеда. Опыты Ампера. Опыты Фарадея.

## ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»

**Инструкция.** Данный тест предназначен для проверки знаний по теме «*Электromагнетизм*». Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу ответов. Если Вы дали

- 1) 41-50 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
  - 2) 31-40 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
  - 3) 20-30 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
  - 4) меньше 20 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте конспект ещё раз.

1. Какие из перечисленных процессов приводят к возникновению магнитного поля?
  1. Движение заряженных частиц.
  2. Электризация тел.
  3. Изменение во времени электрического поля.
  4. Протекание тока по проводнику.
2. Магнитное поле в вакууме может быть создано ...
  - 1) неподвижными электрическими зарядами.
  - 2) намагничёнными телами.
  - 3) движущимися электрическими зарядами.
  - 4) электрическими токами.
  - 5) переменными электрическими полями.
3. Что доказывает опыт Эрстеда?
  1. Магнитное поле действует на намагничённые поля.
  2. Магнитное поле оказывает силовое действие на движущиеся заряженные частицы.
  3. Вокруг проводников с током возникает магнитное поле.
  4. Магнитное поле возникает при движении заряженных частиц.
4. Укажите формулу, выражающую закон Био-Савара-Лапласа.

$$1. d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \qquad 2. d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \qquad 3. d\vec{H} = \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

5. Укажите формулу, выражающую закон полного тока.

$$1. \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{k=1}^n q_k \qquad 2. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^n I_k \qquad 3. d\vec{H} = \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

6. Укажите формулу, выражающую напряжённость магнитного поля, созданного проводником конечной длины.

$$1. H = \frac{nI}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad 2. H = nI \quad 3. H = \frac{I}{2\pi R} \quad 4. H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

7. Укажите формулу, выражающую напряжённость магнитного поля, созданного бесконечно длинным проводником с током.

$$1. H = \frac{B}{\mu\mu_0} \quad 2. H = nI \quad 3. H = \frac{I}{2\pi R} \quad 4. d\vec{H} = \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}$$

8. Укажите формулу, выражающую напряжённость магнитного поля, созданного круговым током на его оси.

$$1. H = \frac{I}{2R} \quad 2. H = nI \quad 3. H = \frac{IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad 4. H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

9. Укажите формулу, выражающую напряжённость магнитного поля, созданного круговым током в центре контура.

$$1. H = \frac{I}{2R} \quad 2. H = nI \quad 3. H = \frac{I}{2\pi R} \quad 4. H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

10. Как изменится значение индукции магнитного поля в центре кругового проводника, если радиус его увеличится в 2 раза, а сила тока в проводнике уменьшится в 3 раза?

1. Уменьшится в 6 раз.
2. Увеличится в 6 раз.
3. Увеличится в 1,5 раза.
4. Уменьшится в 1,5 раза.
5. Уменьшится в 5 раз.

11. Укажите формулу, выражающую напряжённость магнитного поля, созданного соленоидом конечной длины.

$$1. H = \frac{nI}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad 2. H = nI \quad 3. H = \frac{I}{2\pi R} \quad 4. H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

12. Укажите формулу, выражающую напряжённость магнитного поля, созданного бесконечно длинным соленоидом.

$$1. H = \frac{B}{\mu\mu_0} \quad 2. H = nI \quad 3. H = \frac{I}{2\pi R} \quad 4. d\vec{H} = \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}$$

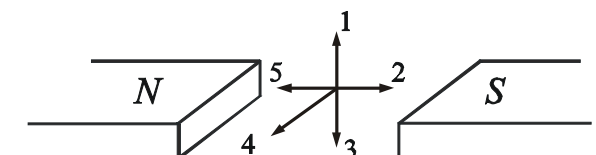
13. Какие из формул определяют силу действия магнитного поля на проводник с током (силу Ампера)?

$$1. F = IBl \sin \alpha \quad 2. d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad 3. \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad 4. F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

14. Какая из формул определяет силу взаимодействия проводников с током в вакууме?

$$1. F = IBl \sin \alpha \quad 2. d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad 3. \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad 4. F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

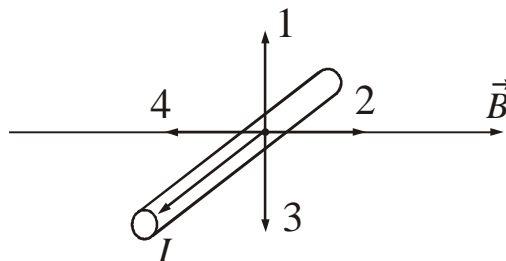
15. Укажите направление индукции магнитного поля в точке, расположенной между полюсами магнита.



16. Чем определяется значение магнитного момента контура с током?

1. Произведением силы тока на длину контура  $\vec{p}_m = \vec{I} \times \vec{l}$ .
2. Произведением силы тока на площадь контура  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$ .
3. Произведением магнитной индукции на площадь контура  $\vec{p}_m = \vec{B} \times \vec{S}$ .
4. Произведением магнитной индукции на силу тока  $\vec{p}_m = \vec{B} \cdot \vec{I}$ .

17. Какое из указанных на рисунке направлений совпадает с направлением силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током, расположенный в магнитном поле индукцией  $\vec{B}$ ?



18. Контур с током находится в однородном магнитном поле. Чему равен вращающий момент, действующий на рамку с током со стороны поля?

1.  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$
2.  $\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$
3.  $W_m = -\vec{p}_m \vec{B}$
4.  $\vec{p}_m = \vec{B} \times \vec{S}$

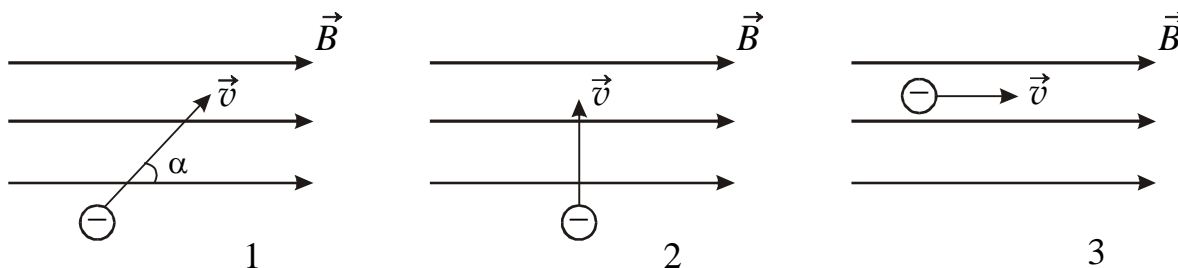
19. Какую силу принято называть силой Лоренца?

1. Силу взаимодействия двух проводников с током.
2. Силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля.
3. Силу, действующую со стороны магнитного поля на заряженную частицу.
4. Силу, действующую со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

20. Какая формула определяет силу Лоренца?

1.  $F = IBl \sin \alpha$
2.  $d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$
3.  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$
4.  $\vec{F} = q\vec{E}$

21. В каком из приведённых на рисунке случаев электрон, влетающий в однородное магнитное поле, будет двигаться по винтовой линии?



22. В каком из приведённых на рисунке случаев электрон, влетающий в однородное магнитное поле, будет двигаться прямолинейно?

23. В каком из приведённых на рисунке случаев электрон, влетающий в однородное магнитное поле, будет двигаться по окружности?

24. Какое утверждение относится к эффекту Холла?

1. Если металлическую пластинку, вдоль которой течет переменный электрический ток, поместить в перпендикулярное ей магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов.

2. Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в параллельное ей магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов.
  3. Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное ей магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов.
  4. Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное ей магнитное поле, то между гранями, перпендикулярными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов.
25. Какие из перечисленных формул определяют холловскую разность потенциалов?

$$1. U_H = \frac{1}{ne} \frac{BI}{b} \quad 2. U_H = \frac{1}{ne} \frac{I}{Ba} \quad 3. U_H = R_H a j B \quad 4. U_H = \frac{1}{ne} \frac{a}{BI}$$

26. В чём состоит явление электромагнитной индукции?

1. В замкнутом проводящем контуре при изменении потока вектора напряжённости электрического поля через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток.
2. В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток.
3. В замкнутом непроводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток.
4. Индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине его вызывающей.

27. Электродвижущая сила индукции, возникающая в замкнутом контуре, зависит от ...

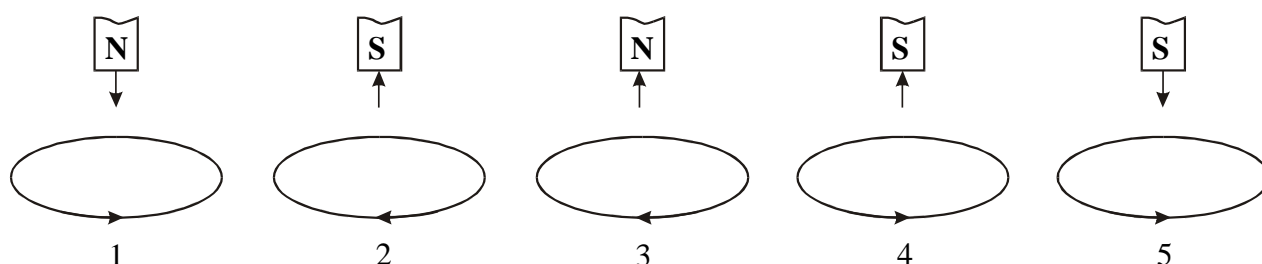
- 1) величины магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.
- 2) скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.
- 3) сопротивления контура.
- 4) величины индукции внешнего магнитного поля.

28. Какая из формул является выражением закона Фарадея для электромагнитной индукции?

$$1. \varepsilon = I(R + r) \quad 2. \varepsilon = \frac{A^{\text{стор}}}{q} \quad 3. \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 4. \varepsilon = \frac{1}{ne} \frac{BI}{b}$$

29. В чём заключается правило Ленца?

1. В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток.
  2. Индукционный ток всегда больше причины, его вызывающей.
  3. Индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.
30. На каких рисунках правильно указано направление индукционного тока в витке, относительно которого перемещается магнит (направление перемещения магнита показано стрелками)?



31. От чего зависит величина возникающей в контуре электродвижущей силы самоиндукции?
1. От индуктивности контура.
  2. От сопротивления контура.
  3. От силы тока в контуре.
  4. От скорости изменения силы тока в контуре.
  5. От ориентации контура по отношению к внешнему магнитному полю.
32. Какая из формул выражает эдс самоиндукции, если контур не имеет ферромагнитного сердечника?

$$1. \varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad 2. \varepsilon = \frac{A^{\text{стоп}}}{q} \quad 3. \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 4. \varepsilon = \frac{1}{ne} \frac{BI}{b}$$

33. Индуктивность контура (контур находится в вакууме) зависит от ...
- 1) силы тока в контуре.
  - 2) скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром.
  - 3) формы и размеров контура.
  - 4) материала проводника.
  - 5) ориентации контура относительно внешнего магнитного поля.
34. Какая из формул выражает эдс самоиндукции, если контур имеет ферромагнитный сердечник?

$$1. \varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad 2. \varepsilon = \frac{A^{\text{стоп}}}{q} \quad 3. \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 4. \varepsilon = -\frac{dI}{dt} \left( I \frac{dL}{dt} + L \right)$$



35. Индуктивность соленоида, имеющего ферромагнитный сердечник, зависит от ...
- 1) количества витков.
  - 2) геометрических размеров соленоида.
  - 3) сопротивления проводника, из которого изготовлен соленоид.
  - 4) силы тока в соленоиде.
  - 5) площади поперечного сечения проводника, из которого изготовлен соленоид.
36. Токами Фуко называют индукционные токи, которые ...
- 1) возникают в цепи, содержащей индуктивность, при размыкании этой цепи.
  - 2) возбуждаются в сплошных массивных проводниках, находящихся в изменяющихся магнитных полях.
  - 3) возбуждаются в замкнутых проводниках при изменении в них силы тока.
  - 4) возбуждаются в замкнутом проводнике при наличии разности потенциалов.
37. Какая формула выражает энергию магнитного поля, создаваемого током?
1.  $W_m = \frac{BH}{2}$
  2.  $W_m = \frac{q^2}{2C}$
  3.  $W_m = \frac{LI^2}{2}$
  4.  $W_m = -L \frac{dI}{dt}$
38. Какие формулы позволяют рассчитать плотность энергии магнитного поля?
1.  $w_m = \frac{BH}{2}$
  2.  $w_m = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$
  3.  $w_m = \frac{LI^2}{2}$
  4.  $w_m = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$
39. Для каждой из перечисленных величин укажите её буквенное обозначение и единицу измерения. *Пример:* Сила тока –  $I$  – А (ампер).
- Напряжённость магнитного поля, магнитный поток, магнитная постоянная, объёмная плотность энергии магнитного поля, магнитный момент.
40. Для каждой из перечисленных величин укажите её буквенное обозначение и единицу измерения. *Пример:* Сила тока –  $I$  – А (ампер).
- Магнитная индукция, магнитная проницаемость, индуктивность, намагниченность, магнитная восприимчивость.
41. Какое значение относительной магнитной проницаемости соответствует парамагнетикам?
1. 2000
  2. 0,9998
  3. 100
  4. 1,000023
  5. 10
42. Какие значения магнитной восприимчивости соответствуют диамагнетикам?
1. – 0,0002
  2. 0,0002
  3. 1999
  4. 0,000023
  5. – 0,0004

43. Какие значения относительной магнитной проницаемости соответствуют ферромагнетикам (данные для  $\mu$  приведены для одной и той же напряжённости внешнего магнитного поля)?

1. 5000                      2. 0,99996                      3. 1,00017                      4. 0,9998                      5. 10

44. Для какого типа магнетиков зависимость магнитной восприимчивости от температуры описывается формулой  $\chi = \frac{C}{T}$ ?

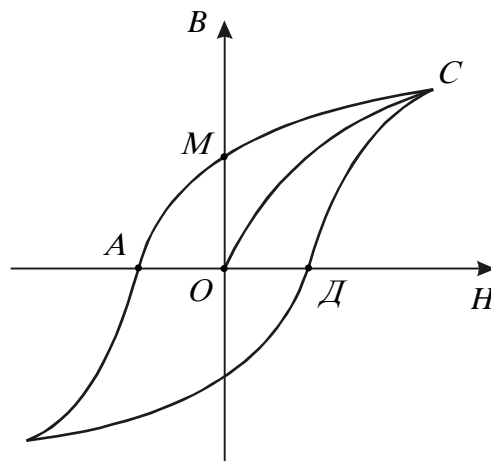
1. Парамагнетики                      3. Диамагнетики  
2. Ферромагнетики                      4. Антиферромагнетики

45. Для какого типа магнетиков зависимость магнитной восприимчивости от температуры описывается формулой  $\chi = \frac{C}{T - T_c}$ ?

1. Парамагнетики                      3. Диамагнетики  
2. Ферромагнетики                      4. Антиферромагнетики

46. Какие из перечисленных ниже утверждений относятся к характеристике ферромагнетиков?

1. Являются сильномагнитными веществами.
2. Обладают магнитной проницаемостью меньше единицы.
3. Зависимость между индукцией и напряжённостью магнитного поля нелинейная.
4. Могут обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.
5. Магнитная проницаемость нелинейно меняется с напряжённостью магнитного поля.



47. Какой из отрезков (или участков) на приведённой петле гистерезиса ферромагнетика соответствует коэрцитивной силе?

1. OC    2. AM    3. OA    4. OM    5. AC

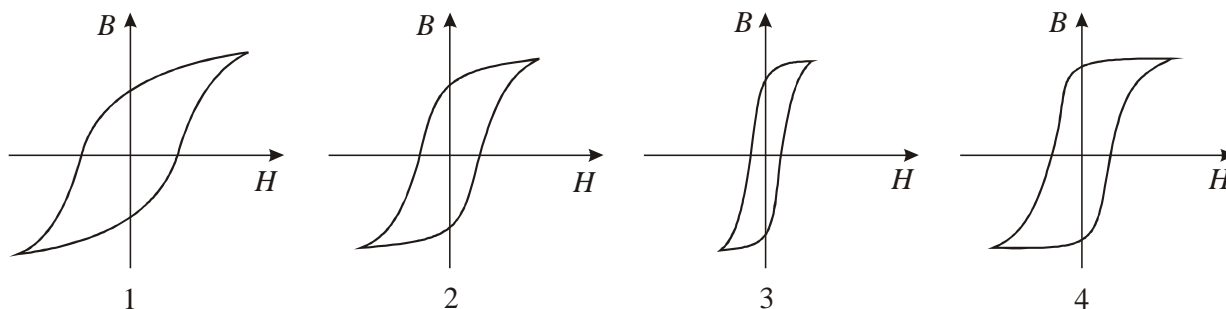
48. Какой из отрезков (или участков) на приведённой петле гистерезиса ферромагнетика соответствует остаточной индукции?

1. AM    2. OM    3. OC    4. OA    5. AC

49. Для ферромагнетиков характерно следующее:

1.  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu \geq 1$ ,  $B = \text{const}$
2.  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu \gg 1$ ,  $B = \text{const}$
3.  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu \gg 1$ ,  $B = f(H)$
4.  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu < 1$ ,  $B = f(H)$

50. Какой из ферромагнетиков, петли гистерезиса которых приведены на рисунке, является наиболее магнитно-мягким?



### Ответы на задачи рубрики «Давайте подумаем!»

**51.1.** Магнитное поле ток создает всегда. Электрический ток производит тепловое действие в том случае, если ток идёт через среду, обладающую активным сопротивлением.

**51.2.** Магнитное поле создается движущимися зарядами. Относительно студента заряд движется, следовательно, относительно него магнитное поле существует. Относительно лаборанта заряд покоится, следовательно, относительно него магнитное поле не существует. Электрическое поле создается как неподвижными зарядами, так и движущимися. Следовательно, электрическое поле существует и относительно студента, и относительно лаборанта.

**51.3.** Магнитная индукция и напряжённость связаны между собой соотношением:  $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды – всегда величина положительная, поэтому направления  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  всегда совпадают.

**51.4.** Линии индукции магнитного поля ни в одной точке поля не обрываются, т.е. они всегда непрерывны. Они не имеют ни начала, ни конца. Этим силовые линии магнитного поля отличаются от силовых линий электростатического поля, которые всегда начинаются и заканчиваются на электрических зарядах или уходят в бесконечность.

**51.5.** Нет, нельзя. Относительно наблюдателя, движущегося вслед за электронами, будут совершать упорядоченное движение ионы кристаллической решетки проводника. Это движение приведёт к появлению такого же магнитного поля, какое наблюдал неподвижный относительно проводника наблюдатель.

**52.1.** Правило буравчика показывает, что за пределами кругового тока магнитная индукция диаметрально противоположных элементов тока изображается векторами, направленными в противоположные стороны, т. е. результирующее поле равно разности векторов. Внутри контура с током подобные векторы направлены в одну сторону, т. е. результирующее поле равно сумме векторов.

**52.2.** Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.

**52.3.** Применение закона полного тока приводит к следующим заключениям: 1) внутри трубы индукция магнитного поля равна нулю  $B=0$ , так как любая замкнутая поверхность, выбранная внутри трубы, не охватывает тока; 2) вне трубы магнитная индукция будет такой же, как индукция, созданная линейным током, совпадающим с осью трубы.

**53.1.** Заряд неподвижного металлического проводника с током складывается из положительного заряда неподвижных ионов решётки и из потока слабо связанных с ней отрицательно заряженных электронов. Внешнее магнитное поле действует с силой Ампера только на движущиеся отрицательные заряды в проводнике с током.

**53.2.** В проводниках объёмный электрический заряд равен нулю, поэтому проявляются только магнитные силы – силы взаимодействия между движущимися зарядами. В электронных пучках преобладают электрические силы отталкивания между одноименными зарядами.

**53.3.** Струю металла можно представить как совокупность параллельных токов одного направления. Токи одного направления притягиваются. В металлургии это явление может использоваться для уплотнения металла.

**54.1.** Силы, действующие на верхнюю и нижнюю стороны квадрата, уравниваются. Сила, действующая на левую сторону квадрата, направлена влево, а действующая на правую сторону – вправо. Магнитное поле, создаваемое проводом, убывает по мере удаления от провода, поэтому первая из этих сил больше второй. Равнодействующая сил направлена влево.

**54.2.** Величина силы, действующей на магнит или контур с током в магнитном поле, определяется соотношением:  $F_x = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha$ , где  $\frac{\partial B}{\partial x}$  – градиент индукции магнитного поля – величина, численно равная изменению индукции, приходящемуся на единицу длины в направлении оси  $Ox$ . Магнитная индукция однородного поля не изменяется ( $B = \text{const}$ ), значит градиент индукции равен нулю. Поэтому сила равна нулю.

**54.3.** Ненамагниченный железный стержень (не имеющий собственного магнитного поля) намагнитится по внешнему полю. Но, поскольку это поле однородно, поступательного или вращательного движения он испытывать не будет (см. объяснение предыдущей задачи).

**54.4.** Энергия магнитного поля, создаваемого проводящими контурами, изменяется, если контуры с током перемещаются или изменяются токи в них. При этом совершают работу внешние силы, приложенные к этим контурам.

**54.5.** Работа  $A$ , необходимая для поворота контура с постоянным током  $I$  и площадью  $S$ , охватываемой этим током, в магнитном поле индукцией  $B$  может быть представлена в виде

$$A = p_m B (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1),$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между вектором  $B$  и нормалью к площадке  $S$  соответственно до и после поворота контура,  $p_m = IS$  – магнитный момент контура. По условию  $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi$ , тогда после преобразований получим

$$A = 2p_m B \cos \varphi_1.$$

Таким образом, работа  $A$  зависит от первоначальной ориентации контура относительно направления магнитного поля и изменяется по величине и знаку, следуя закону косинуса.

**55.1.** Работа постоянной силы рассчитывается по формуле  $A = FS \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между направлением силы и перемещения. Сила Лоренца образует с направлением перемещения угол  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos 90^\circ = 0$ . Следовательно, работа силы Лоренца равна нулю.

**55.2.** Сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, поэтому она не изменяет величину скорости (это верно и при движении в неоднородном магнитном поле.) Угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  равен  $90^\circ$ . Поэтому сила Лоренца будет равна

$$F = qvB \sin \alpha = qvB.$$

Поле однородное, поэтому  $B = \text{const}$ , скорость  $v = \text{const}$ , значит сила  $F$  тоже остается постоянной. Следовательно, при движении этой частицы сохраняется не только величина её скорости, но и величина её ускорения. Но это возможно только при равномерном движении по окружности. Следовательно, траекторией частицы является окружность.

**56.1.** Одной из основных причин эффекта Холла является отклонение носителей заряда, движущихся в магнитном поле, под действием силы Лоренца. Если ток будет переменным, то численное значение и направление движения зарядов будет непрерывно меняться. Эффект Холла при этом не наблюдается.

**56.2.** Эффект Холла является одним из эффективных методов исследования носителей заряда. Он позволяет оценить концентрацию носителей заряда.

**57.1.** Диамагнитный стержень намагничивается против поля и выталкивается в область более слабого поля. Парамагнитный стержень намагничивается вдоль поля, устанавливается вдоль линий вектора магнитной индукции и притягивается к ближнему полюсу электромагнита.

**57.2.** Железные предметы являются ферромагнетиками. Под действием магнитного поля магнита домены ферромагнетика ориентируются по полю, поэтому ненамагниченный железный предмет намагничивается. Домены разворачиваются таким образом, что ближайшими к северному полюсу магнита окажутся южные полюса доменов железного предмета. Разноименные магнитные полюса притягиваются, поэтому железный предмет притянется к магниту.

**57.3.** Нужно прикоснуться концом одного стержня к середине другого (расположив их в виде буквы Т). Если стержень, которым касаются, намагничен – будет наблюдаться притяжение, если не намагничен – взаимодействия не будет.

**57.4.** Можно, если температура стальных болванок ниже точки Кюри (для стали это величина около  $753^{\circ}\text{C}$ ). В противном случае стальные болванки теряют свои ферромагнитные свойства и превращаются в парамагнетик – вещество со слабо выраженными магнитными свойствами. Применять электромагнитный кран будет нельзя.

**57.5.** Введение в состав стали кремния приводит к повышению удельного сопротивления. Это уменьшает индукционные вихревые токи. Кроме этого, легирование стали кремнием приводит к увеличению ее магнитной проницаемости  $\mu_a = \mu_{\text{нач}}$  и  $\mu_{\text{max}}$  (см. рис. 57.2), уменьшению коэрцитивной силы  $H_c$  и снижению потерь энергии на перемагничивание (потери на гистерезис).

**57.6.** Напряжённость поля в обоих случаях не изменится. В первом случае индукция немного увеличится, так как алюминий является парамагнетиком (магнитная проницаемость немного больше 1). При введении железного сердечника индукция увеличится намного больше, так как железо является ферромагнетиком (магнитная проницаемость значительно больше 1).

**58.1.** Индукционный ток возникает в том случае, если замкнутый проводящий контур пронизывает переменный магнитный поток ( $\Phi = BS \cos \alpha$ ). В данном случае индукция магнитного поля не изменяется (поле однородное), площадь контура не меняется, угол между направлением магнитной индукции и нормали к контуру не меняется. Следовательно, индукционный ток не возникает.

**58.2.** По закону электромагнитной индукции, чтобы в витке провода возникла эдс, необходимо изменение потока магнитной индукции с течением времени. По определению, магнитный поток равен

$$\Phi = BS \cos \alpha .$$

Видно, что все три величины, определяющие изменение магнитного потока с течением времени в рассматриваемом процессе остаются неизменными. Следовательно, эдс равна нулю.

**58.3.** По закону электромагнитной индукции электродвижущая сила в проводящем контуре возникает только в том случае, если меняется магнитный поток, пронизывающий контур. По определению, магнитный поток равен  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Если ось вращения совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля, то угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью к поверхности рамки будет все время оставаться неизменным и равным  $90^{\circ}$ . Магнитный поток равен нулю и, следовательно, эдс индуцироваться не будет.

**58.4.** При движении проводника в магнитном поле в стержне возникает электрическое поле, противодействующее перемещению зарядов. Между концами стержня появляется разность потенциалов, равная и противоположная эдс электромагнитной индукции.

**58.5.** Индуцируемый заряд  $q$  связан с изменением магнитного потока  $\Delta\Phi$  сквозь катушку следующим образом:

$$q = I\Delta t = \frac{\varepsilon_{\text{инд}}}{R} \Delta t = \frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R},$$

где  $R$  – сопротивление катушки,  $\varepsilon_{\text{инд}}$  – эдс индукции. В обоих случаях  $\Delta\Phi$  одинаково, следовательно, через катушку проходит одинаковый заряд  $q$ .

**58.6.** При переменном токе в предмете возникают индукционные вихревые токи, при постоянном – нет.

**59.1.** Индуктивность соленоида зависит от магнитной проницаемости сердечника:  $L = \mu\mu_0 n^2 V$ . Железо является ферромагнитным материалом. Магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от напряжённости внешнего магнитного поля. В свою очередь напряжённость намагничивающего поля будет зависеть от силы тока, текущего по обмотке соленоида. Следовательно, индуктивность соленоида с железным сердечником не является постоянной величиной.

**59.2.** Индуктивность катушки определяется по формуле  $L = \mu\mu_0 n^2 V$ . Объём по условию остаётся неизменным, следовательно, можно уменьшить  $\mu$ , вынув железный сердечник, или уменьшить  $n$ , т. е. число витков.

**59.3.** Ток  $I$ , протекающий через витки катушки, один и тот же. Если известен магнитный поток  $\Phi_k$ , пронизывающий каждый виток, то

$$L = \sum_{k=1}^N L_k = \frac{1}{I} \sum_{k=1}^N \Phi_k, \text{ где } N - \text{число витков, } L_k - \text{индуктивность } k\text{-го витка.}$$

**59.4.** При замыкании или размыкании цепей сила тока меняется в течение очень маленьких промежутков времени. При этом возникает эдс самоиндукции, которая пропорциональна скорости изменения силы тока и индуктивности контура:  $\varepsilon_{\text{ис}} = -L \frac{dI}{dt}$ . При очень большой

индуктивности возникший индукционный ток может достигать больших значений. Это приводит к перегреву цепей и вызывает порчу оборудования.

**59.5.** За время  $dt$  по цепи проходит заряд  $dq = Idt$ . Тогда площадь фигуры, ограниченной графиком и осью времени, численно равна заряду, прошедшему по цепи. Заряд, прошедший по цепи пропорционален изменению магнитного потока через катушку (см. объяснение задачи 59.5). Следовательно, по графику можно определить изменение магнитного потока пронизывающего катушку.

**61.1.** Энергия источника питания превращается во внутреннюю (цепь нагревается) и в энергию магнитного поля.

**61.2.** Основная часть энергии магнитного поля превращается во внутреннюю энергию вещества.

**КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Электромагнетизм»**

№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.	№ во- проса	Код отв.
1	1,3,4	11	1	21	1	31	4	41	4
2	2,3,4,5	12	2	22	3	32	1	42	1,5
3	3	13	1,2	23	2	33	3	43	1,5
4	2	14	4	24	3	34	4	44	1
5	2	15	2	25	1	35	1,2,4	45	2
6	4	16	2	26	2	36	2	46	1,3,4,5
7	3	17	1	27	2	37	3	47	3
8	3	18	2	28	3	38	1,2	48	2
9	1	19	4	29	3	39	3	49	3
10	1	20	3	30	1,3,4	40	3	50	3

## ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

**Давление** ( $p$ ) – скалярная физическая величина, равная отношению нормальной составляющей силы давления  $F_{\perp}$  к площади поверхности  $S$ .

**Дипольный момент (электрический момент диполя)** ( $\vec{p}$ ) – вектор, совпадающий по направлению с плечом диполя и численно равный произведению модуля заряда на плечо.

**Диэлектрическая проницаемость среды** ( $\epsilon$ ) – скалярная физическая величина, характеристика вещества, которая показывает, во сколько раз поле внутри однородного диэлектрика меньше, чем в вакууме.

**Импульс тела** ( $\vec{p}$ ) – векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость.

**Индуктивность** ( $L$ ) – скалярная физическая величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи и равная отношению полного магнитного потока, сцепленного с контуром, к силе тока, текущему по контуру и создающему этот поток.

**Коэффициент поверхностного натяжения** ( $\alpha$ ) – скалярная физическая величина, равная отношению модуля силы поверхностного натяжения  $F$ , действующей на границу поверхностного слоя длиной  $l$ , к этой длине.

**Линейная плотность заряда** ( $\tau$ ) – скалярная физическая величина, численно равная заряду, приходящемуся на единицу длины.

**Магнитная индукция** ( $\vec{B}$ ) – векторная физическая величина, численно равная отношению максимального момента сил, действующего на рамку с током со стороны магнитного поля, к произведению силы тока в рамке на её площадь.

**Магнитная проницаемость среды** ( $\mu$ ) – скалярная физическая величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция поля в данной среде отличается от магнитной индукции поля в вакууме.

**Магнитный момент** ( $\vec{p}_m$ ) плоского замкнутого контура с током – векторная физическая величина, численно равная произведению тока на площадь, ограниченную контуром.

**Магнитный поток** ( $\Phi$ ) – скалярная физическая величина, в однородном магнитном поле равная произведению магнитной индукции на площадь контура, которую пересекает магнитное поле, и на косинус угла между направлением поля и нормалью к поверхности контура.

**Масса** ( $m$ ) – скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертных и гравитационных свойств тела. Может служить мерой энергосодержания.

**Материальная точка** – тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

**Моль** – количество вещества, в котором содержится число частиц (атомов, молекул, ионов, электронов или других структурных единиц), равное числу атомов в 0,012 кг изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ .



**Момент импульса** ( $\vec{L}$ ) материальной точки относительно точки О – векторная физическая величина, равная векторному произведению радиус-вектора  $\vec{r}$ , проведённого из точки О в место нахождения материальной точки, на вектор её импульса  $\vec{p}$ .

**Момент импульса** ( $L_z$ ) тела относительно оси  $z$  – скалярная физическая величина, сумма проекций моментов импульсов отдельных точек на эту ось. Для твёрдого тела равен произведению момента инерции тела относительно этой оси на угловую скорость вращения.

**Момент инерции** ( $J$ ) – скалярная физическая величина, мера инертных свойств твёрдого тела при вращательном движении, зависящая от распределения массы относительно оси вращения.

**Момент силы** ( $\vec{M}$ ) относительно точки О – векторная физическая величина, равная векторному произведению радиус-вектора  $\vec{r}$ , проведённого из точки О в точку приложения силы, на силу  $\vec{F}$ . Момент силы ( $M$ ) относительно оси – скалярная физическая величина, равная произведению модуля силы на плечо силы.

**Мощность** ( $N, P$ ) – скалярная физическая величина, характеризующая быстроту совершения работы и численно равная работе, совершаемой за единицу времени.

**Намагниченность** ( $\vec{J}$ ) – векторная физическая величина, численно равная суммарному магнитному моменту атомов (молекул), заключённых в единице объёма.

**Напряжение** ( $U$ ) – величина, равная полной работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами на данном участке по перемещении единичного положительного заряда.

**Напряжённость магнитного поля** ( $\vec{H}$ ) – векторная величина, являющаяся вспомогательной характеристикой магнитного поля и определяющая тот вклад в магнитную индукцию, который дают внешние источники поля.

**Напряжённость электрического поля** ( $\vec{E}$ ) – векторная физическая величина, силовая характеристика электрического поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещённый в данную точку поля.

**Объёмная плотность энергии** – скалярная физическая величина, равная энергии поля, заключённой в единице объёма.

**Относительная атомная масса** ( $A_r$ ) химического элемента – отношение массы атома этого элемента к 1/12 массы атома  $^{12}_6\text{C}$  (изотопа углерода с массовым числом 12).

**Относительная молекулярная масса** ( $M_r$ ) вещества – отношение массы молекулы этого вещества к 1/12 массы атома  $^{12}_6\text{C}$ .

**Период вращения** ( $T$ ) – время, в течение которого совершается один полный оборот.

**Плечо диполя** ( $\vec{l}$ ) – вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и численно равный расстоянию между ними.

**Плотность** ( $\rho$ ) – скалярная физическая величина, характеристика вещества, численно равная массе единицы объёма вещества.

**Плотность тока** ( $\vec{j}$ ) – векторная физическая величина, численно равная электрическому заряду, переносимому за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению движения носителей заряда.

**Поверхностная плотность заряда** ( $\sigma$ ) – скалярная физическая величина, численно равная заряду, приходящемуся на единицу площади.

**Показатель адиабаты** ( $\gamma$ ) – отношение молярной теплоёмкости при постоянном давлении к молярной теплоёмкости при постоянном объёме.

**Потенциал** ( $\varphi$ ) – скалярная физическая величина, энергетическая характеристика электростатического поля, численно равная потенциальной энергии, которой обладает в данной точке поля единичный положительный заряд.

**Работа элементарная** ( $\delta A$ ) – скалярная физическая величина, равная скалярному произведению силы  $\vec{F}$  на элементарное перемещение  $d\vec{r}$  точки приложения силы.

**Радиус-вектор** ( $\vec{r}$ ) – вектор, проведённый из начала координат в рассматриваемую точку.

**Сила** ( $\vec{F}$ ) – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело других тел или полей.

**Сила тока** ( $i$ ) – скалярная физическая величина, численно равная заряду, переносимому через поперечное сечение проводника за единицу времени.

**Скорость** ( $\vec{v}$ ) – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения положения тела в пространстве и равная первой производной радиус-вектора по времени.

**Температура** ( $T$ ,  $t$ ) равновесного состояния – мера интенсивности теплового движения её молекул (атомов, ионов).

**Температурный коэффициент сопротивления** ( $\alpha$ ) – величина, характеризующая температурную стабильность материала и численно равная относительному изменению сопротивления проводника при изменении температуры на 1 К.

**Тепло** ( $Q$ ) – количество энергии, переданное от одного тела к другому посредством теплопередачи.

**Теплоёмкость молярная** ( $C$ ) – скалярная физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить одному молю вещества, чтобы нагреть его на один кельвин.

**Теплоёмкость тела** ( $C_{\text{тела}}$ ) – скалярная физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить телу, чтобы нагреть его на один кельвин.

**Теплоёмкость удельная** ( $c$ ) – скалярная физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы нагреть его на один кельвин.

**Угловая скорость** ( $\vec{\omega}$ ) – векторная физическая величина, характеризующая быстроту вращения и равная первой производной углового перемещения по времени.

**Угловое перемещение элементарное** ( $d\vec{\phi}$ ) – вектор, модуль которого равен углу поворота, выраженному в радианах.

**Угловое ускорение** ( $\vec{\varepsilon}$ ) – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости и равная первой производной угловой скорости по времени.

**Удельное электрическое сопротивление проводника** ( $\rho$ ) – величина, характеризующая материал проводника и численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения.

**Ускорение** ( $\vec{a}$ ) – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения вектора скорости и равная первой производной вектора скорости по времени.

**Частота вращения** ( $\nu$ ) – число оборотов за единицу времени.

**Число степеней свободы** ( $i$ ) механической системы – количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы в пространстве.

**Электрическая ёмкость (электроёмкость)** ( $C$ ) – скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и численно равная заряду, сообщенному проводнику, изменяющему его потенциал на один вольт.

**Электрический заряд** ( $q$ ) – неотъемлемое свойство некоторых элементарных частиц (протонов, электронов и т. д.), определяющее их взаимодействие с внешним электромагнитным полем.

**Электрическое сопротивление** ( $R$ ) – скалярная физическая величина, характеризующая свойство проводника противодействовать пропусканию электрического тока и равная отношению напряжения на концах проводника к силе тока, протекающего по нему.

**Электродвижущая сила** (эдс) ( $\varepsilon$ ) – скалярная физическая величина, равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда внутри источника от отрицательного полюса к положительному.

**Электропроводность** ( $G$ ) – величина, обратная сопротивлению.

**Энергия** ( $W$ ) – единая мера всех форм движения материи и типов взаимодействия материальных объектов.

**Энтропия** ( $S$ ) – скалярная физическая величина, являющаяся функцией состояния системы, изменение которой при переходе системы из одного равновесного состояния в другое в любом обратимом процессе равно приведённому количеству тепла.

**Эффективный диаметр молекулы** ( $d_{\text{эф}}$ ) – минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры молекул.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

**Абсолютно твёрдое тело** 15, 22

— упругое — 22

**Абсолютный нуль температуры** 105

**Абстрагирование** 15

**Адиабата** 138

**Ампер** 17, 193, 238

**Атомная единица массы** 17, 98

**Барометрическая формула** 111

**Барьер потенциальный** 61

**Вакуум** 115

**Ватт** 55

**Вебер** 236

**Вектор** 17

— аксиальный 31

— внешних сил главный 41

— единичный 17

— проекция на ось 37

— умножение на скаляр 18

**Вектора модуль** 17

— составляющие 18

**Векторов произведение**

— — векторное 18, 19

— — скалярное 18, 19

— разность 18

— сумма 18

**Векторы коллинеарные** 17

— взаимно-противоположные 17

**Величина векторная** 16

— инвариантная 75

— скалярная 16

— физическая 15

— элементарная 17

**Вероятность термодинамическая** 129

**Вещество** 14

**Взаимодействие**

— гравитационное 34

— электромагнитное 35

**Вольт** 167, 195

**Восприимчивость**

— диэлектрическая 180

— магнитная 250

**Время** 17

— оседлой жизни 145

— собственное 78

**Вязкость газов** 118

— жидкостей 70

**Газ идеальный** 15, 101

— реальный 140

**Гидродинамика** 69

**Гидромеханика** 68

**Гидростатика** 68

**Генри** 263

**Гипотеза** 14

— Ампера 248

**Гистерезис** 183, 252

**Градиент** 20

— магнитной индукции 243

— плотности 117

— потенциала 172

— скалярной величины 20

— скорости 118

— температуры 20, 115

**Градус Цельсия** 100

**Давление** 68, 99

— гидростатическое 69

— динамическое 71

— парциальное 103

**Двигатель вечный**

— второго рода 131

— первого рода 126

**Движение броуновское** 97

— вращательное 29

— ламинарное 70

— механическое 21

— плоское 58

— поступательное 23

— прямолинейное 26

— равнозамедленное 27

— равномерное 26

— равноускоренное 27

— стационарное 70

— тепловое 98

— турбулентное 70

**Деформация упругая** 35

**Джоуль** 53

**Диамagnetик** 249

**Диаметр молекулы эффективный** 99, 114

**Динамика** 22, 33, 44

**Диполь** 177

**Дискретность заряда** 163

**Диссипация энергии** 63

**Диффузия** 116

**Диэлектрик неполярный** 178

— полярный 179

Длина свободного пробега 114  
Домен 184, 254

### Единица времени 17

- вязкости 118
  - давления 68, 99
  - длины 17
  - заряда 163
  - индуктивности 263
  - индукции магнитной 227
  - импульса 33
  - количества вещества 17, 98
  - магнитного момента 240
  - магнитного потока 236
  - массы 17, 33
  - момента импульса 46
  - — инерции 44
  - — силы 48
  - мощности 55
  - напряжения 195
  - напряжённости магнитного поля 228
  - — электрического поля 127
  - плотности вещества 33
  - — тока 193
  - потока магнитного 236
  - работы 53
  - силы 33
  - — тока 17, 193, 238
  - скорости 25
  - — угловой 30
  - сопротивления 196
  - теплоёмкости 127
  - термодинамической температуры 17, 100, 105
  - ускорения 26
  - — углового 30
  - частоты 30
  - электроёмкости 187
- Единицы физических величин 16
- — — основные 16
  - — — производные 16
- Ёмкость электрическая 187

### Жёсткость пружины 35

- Жидкость 145
- идеальная 70
  - несжимаемая 68

### Закон Ампера 237

- Архимеда 37, 69
  - Био-Савара-Лапласа 230
  - Бойля-Мариотта 137
  - взаимосвязи массы и энергии 79, 82
  - Видемана-Франца 201
  - возрастания энтропии 129
  - всемирного тяготения 34
  - вязкого трения 36
  - Гука 35
  - Гей-Люссака 136
  - Дальтона 103
  - динамики твёрдого тела 50
  - Джоуля-Ленца 202
  - Кулона 164
  - Кюри 251
  - Кюри-Вейса 253
  - Ньютона внутреннего трения 118
  - — второй 38
  - — первый 38
  - — третий 39
  - Ома 196, 198, 199
  - Паскаля 68
  - полного тока 234
  - равномерного распределения энергии 124
  - сложения скоростей 75, 77
  - сообщающихся сосудов 69
  - сохранения заряда 163
  - — импульса 41
  - — момента импульса 50
  - — энергии 62, 63
  - сухого трения 36
  - Фарадея для электромагнитной индукции 257
  - физический 16
  - Фика 117
  - Фурье 115
  - Шарля 135
- Заряд индуцированный 186
- пробный 165
  - связанный 180
  - сторонний 180
  - точечный 15, 164
  - электрический 163
  - элементарный 163
- Зонд 72

### Измерения магнитные 271

- электрические 206

Изопротесс 134  
 Изотерма 137  
 Изотерма Ван-дер-Ваальса 142  
 — Эндрюса 143  
 Импульс тела (материальной точки) 33  
 — релятивистский 79  
 — силы 39  
 Инвариантные величины 75  
 Индуктивность 263  
 Индукция магнитная 226, 227, 245  
 — остаточная 253  
 — электростатическая 186  
 Инерция 38

**Капилляр** 149  
 Капиллярные явления 149  
 Кельвин 17, 100  
 Килограмм 17, 33  
 Кинематика 22  
 Количество тепла приведённое 128  
 Конденсатор 188  
 Концентрация 102  
 Координата 23  
 Коэффициент вязкости 118  
 — диффузии 117  
 — поверхностного натяжения 146, 147  
 — полезного действия 55, 133  
 — — — цикла Карно 134  
 — сопротивления температурный 197  
 — теплопроводности 116  
 — трения 36  
 — — внутреннего 118  
 Кривая потенциальная 61  
 Критические параметры 143  
 Кулон 163

**Линии индукции магнитной** 228  
 — напряжённости электростатического поля 169  
 Линия действия силы 33  
 Лоренцево сокращение 78

**Магнетизм** 225  
 Магнетик 225, 248  
 Магнитострикция 253  
 Макросистема 98  
 Максвелл 107  
 Масса 33  
 — молярная 99  
 — относительная атомная 98

Масса относительная молекулярная 98  
 — покоя 78  
 — релятивистская 78  
 Материя 12  
 Машина тепловая 132  
 Мениск 149  
 Метод статистический 98  
 — термодинамический 98  
 Метр 17  
 Механика 21  
 Модель физическая 14  
 Модуль Юнга 35, 36  
 Моль 17, 98  
 Момент дипольный 177  
 — импульса 46  
 — инерции 44  
 — магнитный контура с током 240  
 — пары сил 48  
 — силы 47, 48  
 Мощность силы 54  
 — тока 201

**Намагниченность** 249  
 Напряжение механическое 35  
 — электрическое 195  
 Напряжённость поля магнитного 227, 228  
 — — — электрического 165  
 Начало термодинамики второе 120, 128, 129, 130, 131  
 — — — первое 120, 125, 126  
 Неравенство Клаузиуса 128  
 Несмачивание 148  
 Нуль абсолютный 105  
 Ньютон 21, 48

**Обкладки конденсатора** 188  
 Объём 100  
 Одновременность событий 74  
 Ом 196  
 Определение 15  
 Опыт Перрена 82  
 — Штерна 110  
 — Эрстеда 225  
 Орт 17

**Пар** 105, 106  
 Парамагнетик 249, 251  
 Пара сил 48  
 Параметры критические 143  
 — состояния 99

- Паскаль 68  
 Паскаль-секунда 116  
 Перемещение 23  
 — угловое 29  
 Период вращения 30  
 Плечо диполя 177  
 — пары сил 48  
 — силы 48  
 Плотность заряда линейная 174  
 — — поверхностная 175  
 — тела 16, 33  
 — тока 193  
 — энергии поля магнитного 270  
 — — — электрического 191  
 Показатель адиабаты 138  
 Поле 14, 34  
 — вихревое 228, 258  
 — гравитационное 34  
 — магнитное 226  
 — однородное 165, 229  
 — потенциальное 58, 169  
 — стационарное 165  
 — электрическое 165  
 Поляризация диэлектриков 179  
 Поляризованность 179  
 Поправки Ван-дер-Ваальса 142  
 Постоянная Больцмана 102  
 — гравитационная 34  
 — магнитная 227  
 — молярная газовая 102  
 — электрическая 164  
 Потенциал 167  
 Поток магнитный 235  
 — вектора напряжённости электрического поля 173  
 Потокосцепление 257  
 Правила Кирхгофа 200  
 Правило винта (буравчика) 228  
 — левой руки 237  
 — Ленца 257  
 Преобразования Галилея 74  
 — Лоренца 76  
 Принцип относительности Галилея 74  
 — — Эйнштейна 75  
 — постоянства скорости света 76  
 — соответствия 15, 77  
 — суперпозиции 166, 230  
 Проводник 185  
 Проницаемость среды диэлектрическая 164, 182  
 Проницаемость среды магнитная относительная 227, 250  
 Процесс адиабатный 138  
 — изобарный 136  
 — изотермический 137  
 — изохорный 135  
 — изоэнтропийный 140  
 — круговой 132  
 — необратимый 121  
 — обратимый 121  
 — равновесный 15, 121  
 — термодинамический 12  
 Путь 23  
 Пьезоэлектрик 184  
  
**Работа магнитного поля** 238, 242  
 — силы 53  
 — тока 201  
 Радиан 17  
 Радиус-вектор 18, 24  
 Разность потенциалов 168  
 Распределение Больцмана 113  
 — Максвелла 107  
  
**Самоиндукция** 263  
 Сегнетоэлектрик 183  
 Секунда 17  
 Сечение эффективное молекулы 114  
 Сила 33  
 — Ампера 237  
 — внешняя 40  
 — внутренняя 40  
 — консервативная 58  
 — коэрцитивная 184, 253  
 — Лоренца 244, 246  
 — неконсервативная 58  
 — поверхностного натяжения 146  
 — равнодействующая 37  
 — сторонняя 194  
 — тока 193  
 — трения 36  
 — тяжести 34  
 — упругая 35  
 — электродвижущая 195  
 Сименс 197  
 Система единиц 16  
 — — международная 17  
 — замкнутая 38  
 — механическая 40  
 — отсчёта 23

Система термодинамическая 121

Скорость линейная 25

— наиболее вероятная 107

— света в вакууме 76

— средняя 26

—— арифметическая 109

—— квадратичная 109

— угловая 29

Смачивание 148

Смещение электрическое 173

Соленоид 233

Сопrotивление участка электрической цепи 196

— электрическое удельное 196

Состояние неравновесное 121

— равновесное 121

Статика 22

Стерadian 17

**Т**екучесть 68

Тело абсолютно неупругое 22

—— твёрдое 15, 22

—— упругое 22

— аморфное 145

— отсчёта 23

— рабочее 132

Температура 17, 100, 105

Теорема Гаусса 172, 236

— Карно 134

— Штейнера 45

Теория 14

Теория относительности 21, 74

— электропроводности 204

Тепло 125

Теплоёмкость молярная 127

— тела 127

— удельная 127

Теплопроводность 115

Тесла 227

Ток индукционный 256

—— при замыкании и размыкании цепи 266

— переменный 260

— постоянный 193

— электрический 192

Токи вихревые Фуко 261

Точка Кюри 184, 253

— материальная 15, 22

Траектория 23

Трение 36, 118

Трубка Пито 72

— Пито-Прандтля 72

**У**гол краевой 148

Удар абсолютно неупругий 64, 65

—— упругий 64, 65

— центральный 65

Удлинение 35

Узел электрической цепи 200

Уравнение Бернулли 71

— Ван-дер-Ваальса 142

— динамики поступательного движения 67

— кинетической теории газов 104

— Майера 136

— Менделеева-Клайперона 102

— неразрывности 70

— Пуассона 138

— состояния 100

— тела вращающегося 48, 49

Ускорение 26, 27

— нормальное 27

— свободного падения 34

— тангенциальное 27

— угловое 30

Условия нормальные 100

**Ф**аза 143

Фарад 187

Ферромагнетик 249, 252

Физика 14

Формула Лапласа 111

Функция распределения 105, 107

**Х**арактеристика вольт-амперная 197

**Ч**астота вращения 30

Число Авогадро 98, 113

— соударений молекул газа 114

— степеней свободы 123

**Ц**икл 132

— Карно 133

Циркуляция вектора магнитной индукции 134

—— напряжённости электростатического поля 169

**Э**квипотенциальная поверхность 169

Эксперимент 14



Электрическая проводимость 197

— — удельная 197

Електроёмкость 187

Электрон 163

Электрон-вольт 13

Электростатика 163

Элемент тока 15, 230

Энергия 56

— внутренняя 123, 125

— кинетическая 56, 57

— механическая 56

— покоя 80

— полная 80

— поля магнитного 270

— — электрического 190

— потенциальная 58, 59, 60, 141, 167, 242

Энтродия 128, 130

Эффект Холла 247

**Я**вление взаимной индукции 268

— самоиндукции 263

— электромагнитной индукции 256

Явления переноса 115, 119

Яма потенциальная 61

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Волков, А. Ф. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособие для студентов инж.-техн. специальностей высш. учеб. заведений / А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 389 с.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высш. шк., 2002. – 718 с.
3. Иродов, И. Е. Основные законы электромагнетизма : учеб. пособие для вузов / И. Е. Иродов. – Москва : Высш. шк., 1983. – 279 с.
4. Курс физики : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 1. / под ред. В. Н. Лозовского. – Санкт-Петербург : Лань, 2000. – 576 с.
5. Курс физики : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. / под ред. В. Н. Лозовского. – Санкт-Петербург : Лань, 2000. – 592 с.
6. Ландау, Л. Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц. – Москва : Наука, 1965. – 384 с.
7. Лумпиева, Т. П. Практикум по физике. Решение задач : учеб. пособие для студентов инж.-техн. специальностей высш. учеб. заведений : в 2 т. Т. 1: Физические основы механики. Молекулярная физика и термодинамика. Электростатика. Постоянный электрический ток. Электромагнетизм / Т. П. Лумпиева, Н. М. Русакова, А. Ф. Волков. – Донецк : ДонНТУ, 2018. – 257 с.
8. Лумпиева, Т. П. Практикум по физике. Решение задач : учеб. пособие для студентов инж.-техн. специальностей высш. учеб. заведений : в 2 т. Т. 2: Колебания и волны. Волновая и квантовая оптика. Элементы квантовой механики. Основы физики твёрдого тела. Элементы физики атомного ядра / Т. П. Лумпиева, Н. М. Русакова, А. Ф. Волков. – Донецк : ДонНТУ, 2018. – 230 с.
9. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 1: Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – 3-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1987. – 432 с.
10. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 3-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1988. – 496 с.
11. Савельев, И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике : учеб. пособие / И. В. Савельев. – Москва : Наука, 1982. – 272 с.
12. Тульчинский, М. Е. Качественные задачи по физике в средней школе : пособие для учителей / М. Е. Тульчинский. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва : Просвещение, 1972. – 240 с.
13. Физика. Сборник вопросов и задач (для контроля знаний с применением машин) / В. И. Гакен [и др]. – Киев : Вищ. шк., Голов. изд-во, 1984. – 136 с.
14. Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1: Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 480 с.

15. Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2: Электрические и электромагнитные явления / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 528 с.
16. Фурсов В. К. Задачи-вопросы по физике / В. К. Фурсов. – Москва : Просвещение, 1977. – 64 с.
17. Холидей, Д. Вопросы и задачи по физике : пособие для студентов пед. ин-тов / Д. Холидей, Р. Резник ; пер. с англ. С. Н. Немирова. – Москва : Просвещение, 1969. – 239 с.
18. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва : Наука, 1981. – 507 с.

**Волков Александр Фёдорович  
Лумпиева Таисия Петровна**

**КУРС ФИЗИКИ**

**ТОМ 1**

Учебное пособие  
(на русском языке)

Редакционно-техническое оформление,  
компьютерная вёрстка *А.Ф. Волков*