53
Д53

Начальное
и среднее
профессиональное
образование

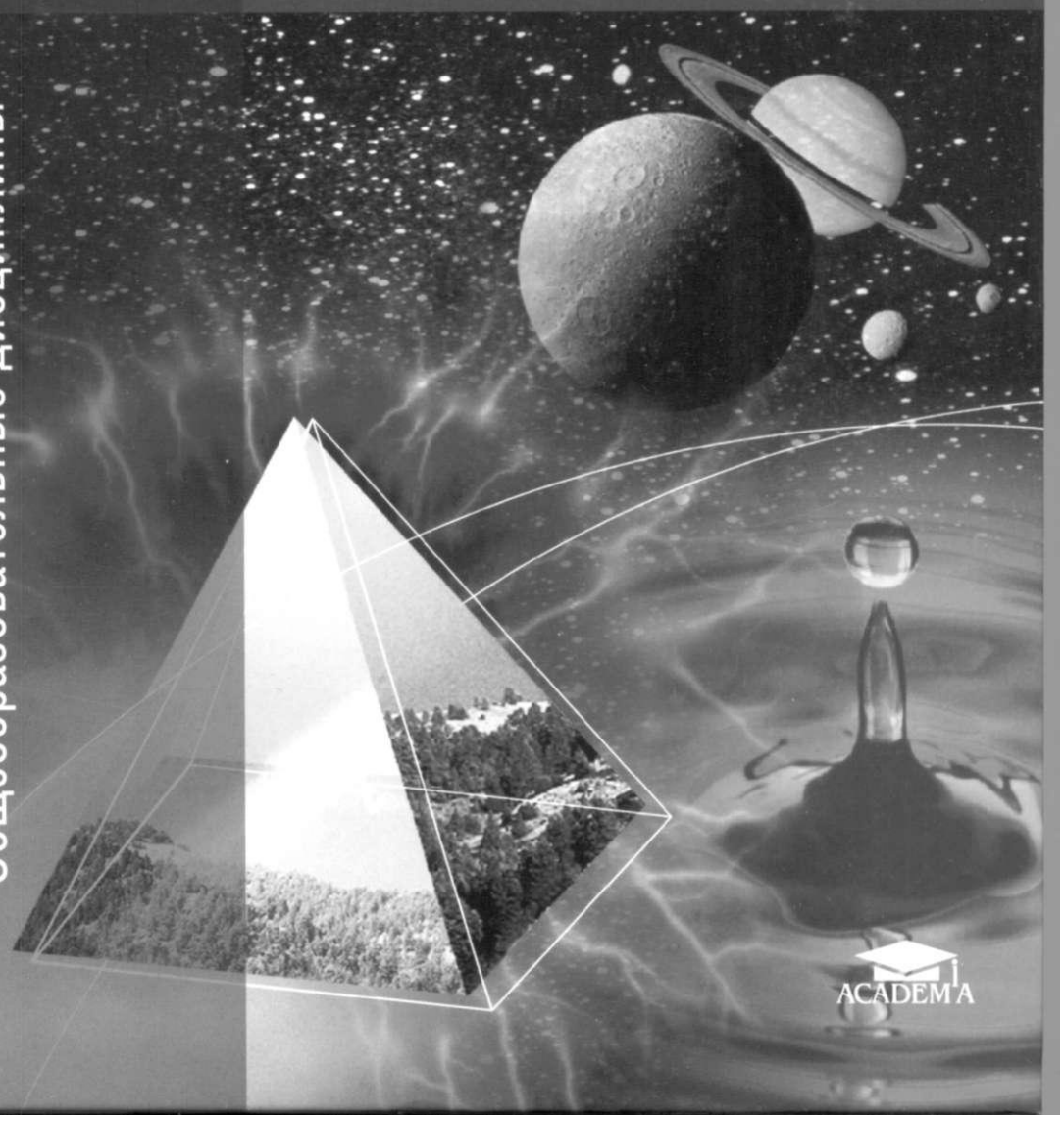
В. Ф. Дмитриева

# ФИЗИКА

## ДЛЯ ПРОФЕССИЙ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Учебник

Общеобразовательные дисциплины



ACADEMIA

# ПЕРИОДЫ И РЯДЫ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ

| ПЕРИОДЫ | РЯДЫ | (1) I (11) | (2) II (12) | (13) III (3) | (14) IV (4) | (15) V (5) | (16) VI (6) | (17) VII (7) | VIII (8) | VIII (9) | VIII (10) | VIII (18) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | **H** 1 · 1,00794 · $1s^1$ · 1 · ВОДОРОД | | | | | | [H] | | | | **He** 2 · 4,002602 · $1s^2$ · 2 · ГЕЛИЙ |
| 2 | 2 | **Li** 3 · 6,941 · $2s^1$ · 1 2 · ЛИТИЙ | **Be** 4 · 9,012182 · $2s^2$ · 2 2 · БЕРИЛЛИЙ | **B** 5 · 10,811 · $2s^22p^1$ · 3 2 · БОР | **C** 6 · 12,0107 · $2s^22p^2$ · 4 2 · УГЛЕРОД | **N** 7 · 14,00674 · $2s^22p^3$ · 5 2 · АЗОТ | **O** 8 · 15,9994 · $2s^22p^4$ · 6 2 · КИСЛОРОД | **F** 9 · 18,9984032 · $2s^22p^5$ · 7 2 · ФТОР | | | | **Ne** 10 · 20,1797 · $2s^22p^6$ · 8 2 · НЕОН |
| 3 | 3 | **Na** 11 · 22,989770 · $3s^1$ · 1 8 2 · НАТРИЙ | **Mg** 12 · 24,3050 · $3s^2$ · 2 8 2 · МАГНИЙ | **Al** 13 · 26,981538 · $3s^23p^1$ · 3 8 2 · АЛЮМИНИЙ | **Si** 14 · 28,0855 · $3s^23p^2$ · 4 8 2 · КРЕМНИЙ | **P** 15 · 30,97361 · $3s^23p^3$ · 5 8 2 · ФОСФОР | **S** 16 · 32,066 · $3s^23p^4$ · 6 8 2 · СЕРА | **Cl** 17 · 35,4527 · $3s^23p^5$ · 7 8 2 · ХЛОР | | | | **Ar** 18 · 39,948 · $3s^23p^6$ · 8 8 2 · АРГОН |
| 4 | 4 | **K** 19 · 39,0983 · $4s^1$ · 1 8 8 2 · КАЛИЙ | **Ca** 20 · 40,078 · $4s^2$ · 2 8 8 2 · КАЛЬЦИЙ | **Sc** 21 · 44,955910 · $3d^14s^2$ · 2 9 8 2 · СКАНДИЙ | **Ti** 22 · 47,867 · $3d^24s^2$ · 2 10 8 2 · ТИТАН | **V** 23 · 50,9415 · $3d^34s^2$ · 2 11 8 2 · ВАНАДИЙ | **Cr** 24 · 51,9961 · $3d^54s^1$ · 1 13 8 2 · ХРОМ | **Mn** 25 · 54,938049 · $3d^54s^2$ · 2 13 8 2 · МАРГАНЕЦ | **Fe** 26 · 55,845 · $3d^64s^2$ · 2 14 8 2 · ЖЕЛЕЗО | **Co** 27 · 58,933200 · $3d^74s^2$ · 2 15 8 2 · КОБАЛЬТ | **Ni** 28 · 58,6934 · $3d^84s^2$ · 2 16 8 2 · НИКЕЛЬ | |
| | 5 | **Cu** 29 · 63,546 · $3d^{10}4s^1$ · 1 18 8 2 · МЕДЬ | **Zn** 30 · 65,39 · $3d^{10}4s^2$ · 2 18 8 2 · ЦИНК | **Ga** 31 · 69,723 · $4s^24p^1$ · 3 18 8 2 · ГАЛЛИЙ | **Ge** 32 · 72,61 · $4s^24p^2$ · 4 18 8 2 · ГЕРМАНИЙ | **As** 33 · 74,92160 · $4s^24p^3$ · 5 18 8 2 · МЫШЬЯК | **Se** 34 · 78,96 · $4s^24p^4$ · 6 18 8 2 · СЕЛЕН | **Br** 35 · 79,904 · $4s^24p^5$ · 7 18 8 2 · БРОМ | | | | **Kr** 36 · 83,80 · $4s^24p^6$ · 8 18 8 2 · КРИПТОН |
| 5 | 6 | **Rb** 37 · 85,4678 · $5s^1$ · 1 18 8 2 · РУБИДИЙ | **Sr** 38 · 87,62 · $5s^2$ · 2 18 8 2 · СТРОНЦИЙ | **Y** 39 · 88,90585 · $4d^15s^2$ · 2 9 18 8 2 · ИТТРИЙ | **Zr** 40 · 91,224 · $4d^25s^2$ · 2 10 18 8 2 · ЦИРКОНИЙ | **Nb** 41 · 92,90638 · $4d^45s^1$ · 1 13 18 8 2 · НИОБИЙ | **Mo** 42 · 95,94 · $4d^55s^1$ · 1 13 18 8 2 · МОЛИБДЕН | **Tc** 43 · [98] · $4d^55s^2$ · 2 13 18 8 2 · ТЕХНЕЦИЙ | **Ru** 44 · 101,07 · $4d^75s^1$ · 1 15 18 8 2 · РУТЕНИЙ | **Rh** 45 · 102,90550 · $4d^85s^1$ · 1 16 18 8 2 · РОДИЙ | **Pd** 46 · 106,42 · $4d^{10}5s^0$ · 0 18 18 8 2 · ПАЛЛАДИЙ | |
| | 7 | **Ag** 47 · 107,8682 · $4d^{10}5s^1$ · 1 18 18 8 2 · СЕРЕБРО | **Cd** 48 · 112,411 · $4d^{10}5s^2$ · 2 18 18 8 2 · КАДМИЙ | **In** 49 · 114,818 · $5s^25p^1$ · 3 18 18 8 2 · ИНДИЙ | **Sn** 50 · 118,710 · $5s^25p^2$ · 4 18 18 8 2 · ОЛОВО | **Sb** 51 · 121,760 · $5s^25p^3$ · 5 18 18 8 2 · СУРЬМА | **Te** 52 · 127,60 · $5s^25p^4$ · 6 18 18 8 2 · ТЕЛЛУР | **I** 53 · 126,90447 · $5s^25p^5$ · 7 18 18 8 2 · ИОД | | | | **Xe** 54 · 131,29 · $5s^25p^6$ · 8 18 18 8 2 · КСЕНОН |
| 6 | 8 | **Cs** 55 · 132,90545 · $6s^1$ · 1 8 18 18 8 2 · ЦЕЗИЙ | **Ba** 56 · 137,327 · $6s^2$ · 2 8 18 18 8 2 · БАРИЙ | 57 ***La** · 138,9055 · $5d^16s^2$ · 2 9 18 18 8 2 · ЛАНТАН | **Hf** 72 · 178,49 · $5d^26s^2$ · 2 10 32 18 8 2 · ГАФНИЙ | **Ta** 73 · 180,9479 · $5d^36s^2$ · 2 11 32 18 8 2 · ТАНТАЛ | **W** 74 · 183,84 · $5d^46s^2$ · 2 12 32 18 8 2 · ВОЛЬФРАМ | **Re** 75 · 186,207 · $5d^56s^2$ · 2 13 32 18 8 2 · РЕНИЙ | **Os** 76 · 190,23 · $5d^66s^2$ · 2 14 32 18 8 2 · ОСМИЙ | **Ir** 77 · 192,217 · $5d^76s^2$ · 2 15 32 18 8 2 · ИРИДИЙ | **Pt** 78 · 195,078 · $5d^96s^1$ · 1 17 32 18 8 2 · ПЛАТИНА | |
| | 9 | **Au** 79 · 196,96655 · $5d^{10}6s^1$ · 1 18 32 18 8 2 · ЗОЛОТО | **Hg** 80 · 200,58 · $5d^{10}6s^2$ · 2 18 32 18 8 2 · РТУТЬ | **Tl** 81 · 204,3833 · $6s^26p^1$ · 3 18 32 18 8 2 · ТАЛЛИЙ | **Pb** 82 · 207,2 · $6s^26p^2$ · 4 18 32 18 8 2 · СВИНЕЦ | **Bi** 83 · 208,98038 · $6s^26p^3$ · 5 18 32 18 8 2 · ВИСМУТ | **Po** 84 · [209] · $6s^26p^4$ · 6 18 32 18 8 2 · ПОЛОНИЙ | **At** 85 · [210] · $6s^26p^5$ · 7 18 32 18 8 2 · АСТАТ | | | | **Rn** 86 · [222] · $6s^26p^6$ · 8 18 32 18 8 2 · РАДОН |
| 7 | 10 | **Fr** 87 · [223] · $7s^1$ · 1 8 18 32 18 8 2 · ФРАНЦИЙ | **Ra** 88 · [226] · $7s^2$ · 2 8 18 32 18 8 2 · РАДИЙ | 89 ****Ac** · [227] · $6d^17s^2$ · 2 9 18 32 18 8 2 · АКТИНИЙ | 104 **Rf** · [261] · $6d^27s^2$ · 2 10 32 32 18 8 2 · РЕЗЕРФОРДИЙ | 105 **Db** · [262] · $6d^37s^2$ · 2 11 32 32 18 8 2 · ДУБНИЙ | 106 **Sg** · [266] · $6d^47s^2$ · 2 12 32 32 18 8 2 · СИБОРГИЙ | 107 **Bh** · [264] · $6d^57s^2$ · 2 13 32 32 18 8 2 · БОРИЙ | 108 **Hs** · [269] · $6d^67s^2$ · 2 14 32 32 18 8 2 · ГАССИЙ | 109 **Mt** · [268] · $6d^77s^2$ · 2 15 32 32 18 8 2 · МЕЙТНЕРИЙ | 110 **Ds** · [271] · $6d^97s^1$ · 1 17 32 32 18 8 2 · ДАРМШТАДТИЙ | |
| | 11 | 111 **Rg** · [272] · $6d^{10}7s^1$ · 1 18 32 32 18 8 2 · РЕНТГЕНИЙ | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | | | | 118 |
| ФОРМУЛА ВЫСШЕГО ОКСИДА | | $R_2O$ | $RO$ | $R_2O_3$ | $RO_2$ | $R_2O_5$ | $RO_3$ | $R_2O_7$ | $RO_4$ | | | |
| ФОРМУЛА ЛЕТУЧЕГО ВОДОРОДНОГО СОЕДИНЕНИЯ | | | | | $RH_4$ | $RH_3$ | $H_2R$ | $HR$ | | | | |




*** ЛАНТАНОИДЫ**

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 58 **Ce** · 140,116 · $4f^15d^16s^2$ · 2 9 19 8 2 · ЦЕРИЙ | 59 **Pr** · 140,9076 · $4f^36s^2$ · 2 8 21 8 2 · ПРАЗЕОДИМ | 60 **Nd** · 144,24 · $4f^46s^2$ · 2 8 22 8 2 · НЕОДИМ | 61 **Pm** · [145] · $4f^56s^2$ · 2 8 23 8 2 · ПРОМЕТИЙ | 62 **Sm** · 150,36 · $4f^66s^2$ · 2 8 24 8 2 · САМАРИЙ | 63 **Eu** · 151,964 · $4f^76s^2$ · 2 8 25 8 2 · ЕВРОПИЙ | 64 **Gd** · 157,25 · $4f^75d^16s^2$ · 2 8 25 9 2 · ГАДОЛИНИЙ | 65 **Tb** · 158,9253 · $4f^96s^2$ · 2 8 27 8 2 · ТЕРБИЙ | 66 **Dy** · 162,50 · $4f^{10}6s^2$ · 2 8 28 8 2 · ДИСПРОЗИЙ | 67 **Ho** · 164,9303 · $4f^{11}6s^2$ · 2 8 29 8 2 · ГОЛЬМИЙ | 68 **Er** · 167,26 · $4f^{12}6s^2$ · 2 8 30 8 2 · ЭРБИЙ | 69 **Tm** · 168,9342 · $4f^{13}6s^2$ · 2 8 31 8 2 · ТУЛИЙ | 70 **Yb** · 173,04 · $4f^{14}6s^2$ · 2 8 32 8 2 · ИТТЕРБИЙ | 71 **Lu** · 174,967 · $4f^{14}5d^16s^2$ · 2 9 32 8 2 · ЛЮТЕЦИЙ |

**** АКТИНОИДЫ**

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 **Th** · 232,0381 · $6d^27s^2$ · 2 10 18 32 18 8 2 · ТОРИЙ | 91 **Pa** · 231,0358 · $5f^26d^17s^2$ · 2 10 18 32 18 9 2 · ПРОТАКТИНИЙ | 92 **U** · 238,028 · $5f^36d^17s^2$ · 2 9 21 32 18 9 2 · УРАН | 93 **Np** · [237] · $5f^46d^17s^2$ · 2 9 22 32 18 9 2 · НЕПТУНИЙ | 94 **Pu** · [244] · $5f^67s^2$ · 2 8 24 32 18 8 2 · ПЛУТОНИЙ | 95 **Am** · [243] · $5f^77s^2$ · 2 8 25 32 18 8 2 · АМЕРИЦИЙ | 96 **Cm** · [247] · $5f^76d^17s^2$ · 2 8 25 32 18 9 2 · КЮРИЙ | 97 **Bk** · [247] · $5f^96d^17s^2$ · 2 9 26 32 18 8 2 · БЕРКЛИЙ | 98 **Cf** · [251] · $5f^{10}7s^2$ · 2 8 28 32 18 8 2 · КАЛИФОРНИЙ | 99 **Es** · [252] · $5f^{11}7s^2$ · 2 8 29 32 18 8 2 · ЭЙНШТЕЙНИЙ | 100 **Fm** · [257] · $5f^{12}7s^2$ · 2 8 30 32 18 8 2 · ФЕРМИЙ | 101 **Md** · [258] · $5f^{13}7s^2$ · 2 8 31 32 18 8 2 · МЕНДЕЛЕВИЙ | 102 **No** · [259] · $5f^{14}7s^2$ · 2 8 32 32 18 8 2 · НОБЕЛИЙ | 103 **Lr** · [262] · $5f^{14}6d^17s^2$ · 2 9 32 32 18 8 2 · ЛОУРЕНСИЙ |

*НАЧАЛЬНОЕ И СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ*

**В.Ф.ДМИТРИЕВА**

# ФИЗИКА

ДЛЯ ПРОФЕССИЙ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Учебник

*Рекомендовано*
*Федеральным государственным учреждением*
*«Федеральный институт развития образования»*
*в качестве учебника для использования в учебном процессе*
*образовательных учреждений, реализующих образовательную*
*программу среднего (полного) общего образования в пределах*
*основных профессиональных образовательных программ*
*НПО и СПО с учетом профиля профессионального образования*

*Регистрационный номер рецензии 469*
*от 02 июля 2009 г. ФГУ «ФИРО»*

**6-е издание, стереотипное**

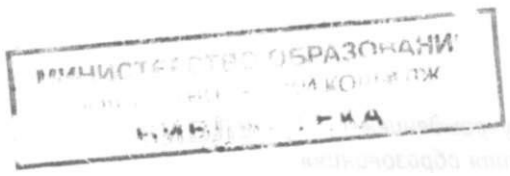
ACADEM'A

Москва
Издательский центр «Академия»
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 53(075.32)
ББК 22.3я723
Д53

Рецензент —
преподаватель Чеховского механико-технологического техникума *И.В.Данилова*



**Дмитриева В.Ф.**

Д53 Физика для профессий и специальностей технического профиля учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования \ В.Ф.Дмитриева. — 6-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2013. - 448 с.

ISBN 978-5-7695-9932-3

**Учебник содержит теоретический материал в объеме курса физики, изучаемого обучающимися в начальных и средних профессиональных учебных заведениях, а также задачи с решениями для самостоятельной работы. В конце каждой главы даны краткие выводы, вопросы для самоконтроля и повторения.**

**Для обучающихся в образовательных учреждениях начального и среднего профессионального образования.**

УДК 53(075.32)
ББК 22.3я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Дмитриева В.Ф., 2010
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-9932-3

# ВВЕДЕНИЕ

**Физика — наука о природе.** Величайший мыслитель древности Аристотель (384 - 322 гг. до н. э.) в смысл слова «физика» (от греч. *physis* — природа) вкладывал всю совокупность сведений о природе, все, что было известно о земных и небесных явлениях. В русский язык термин «физика» был введен великим ученым-энциклопедистом, основоположником материалистической философии в России М.В.Ломоносовым **(1711-1765).**

Долгое время физику называли натуральной философией (философией природы), и она фактически сливалась с естествознанием. По мере накопления экспериментального материала, его научного обобщения и развития методов исследования из натуральной философии как общего учения о природе выделились астрономия, химия, физика, биология и другие науки. Отсюда следует, что резкую границу между физикой и другими естественными науками установить довольно сложно.

Процесс длительного изучения явлений природы привел ученых к идее о материальности окружающего мира. Материя включает в себя все, окружающее нас, и нас самих. Учение о строении материи является одним из центральных в физике. Оно охватывает два известных физике вида материи: ***вещество*** и ***поле.*** Всякое изменение, происходящее в окружающем нас мире, представляет собой движение материи. ***Движение есть способ существования материи.***

Физика изучает наиболее общие формы движения материи и их взаимные превращения, такие, как механическая, молекулярно-тепловая, электромагнитная, атомная и ядерная. Подобное деление на формы движения условно, однако физика в процессе изучения обычно представлена именно такими разделами.

**| Материя существует в пространстве и во времени.**



Аристотель

***Пространство*** определяет взаимное расположение (одновременно существующих) объектов относительно друг друга и их относительную величину (расстояние и ориентацию). Размеры материальных объектов во Вселенной разнообразны. Эти материальные объекты образуют микро-, макро- и мегамир. ***Микромир*** — мир невидимых объектов, например элементарные частицы, атомы, молекулы. ***Макромир*** — мир объектов, обладающих «обычными» размерами. ***Мегамир*** — мир астрономических объектов, например звезды и образуемые ими системы. Все явления природы происходят в определенной последовательности и имеют конечную продолжительность. ***Время*** определяет последовательность явлений природы и их

относительную продолжительность. Следовательно, пространство и время не существуют сами по себе, в отрыве от материи, и материя не существует вне пространства и времени.

Общей мерой различных форм движения материи является ***энергия.*** Качественно различные физические формы движения материи способны превращаться друг в друга, но сама материя неуничтожима и несотворима. К такому выводу пришли еще античные философы-материалисты.

> Физика — наука, изучающая простейшие **и** вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства **и** строение материи **и** законы ее движения.

Физика — основа естествознания. Физические понятия являются простейшими и в то же время основополагающими и всеобщими в естествознании (пространство, время, движение, масса, работа, энергия и др.). Теория и методы физики широко используются в астрономии, биологии, химии, геологии и других естественных науках. Физические законы (например, законы сохранения), выводы, следствия из физических теорий имеют глубокий философский смысл. Физика относится к точным наукам и изучает количественные закономерности явлений.

Физика — наука экспериментальная. Основная задача физики — выявить и объяснить законы природы, которыми определяются физические явления. Задачи, стоящие перед физикой, определяют особенности уровней познания природы. В физике выделяют следующие уровни познания: эмпирический, т. е. основанный на опыте, теоретический и моделирования, каждый из которых использует определенные методы. Под ***методом*** понимают совокупность приемов и операций практического и теоретического познания действительности.

*Эмпирический уровень* предусматривает использование главным образом методов, опирающихся на чувственное познание объективно существующего мира. К этим методам относят: систематические наблюдения, эксперименты и измерения.

***Наблюдения*** являются первоначальным источником информации. На начальных стадиях развития науки наблюдения играли важнейшую роль и благодаря им образовался эмпирический (опытный) базис науки. Как известно, первые закономерности в природе были установлены в поведении небесных тел и были основаны на наблюдениях за их движением, осуществляемых невооруженным глазом. В некоторых науках (например, астрономии, геологии и др.) наблюдения являются единственным методом исследования.

***Эксперимент*** — важнейший метод эмпирического исследования, с помощью которого явления исследуются в контролируемых управляемых условиях. Проводя опыт, экспериментатор целенаправленно вмешивается в естественный ход протекания процесса. Отличительная особенность эксперимента — воспроизводимость, т.е. его может осуществить каждый исследователь в любое время.

Эксперименты могут быть качественными и количественными. Качественный эксперимент отвечает, например, на такой вопрос: остается постоянной или изменяется данная физическая величина при изменении внешних условий? Количественный эксперимент связан с измерением.

Не над всеми телами можно проводить эксперименты, например планеты, звезды можно только наблюдать. Если все же эксперимент необходим, то проводят эксперимент с моделью, т. е. телом, размеры и масса которых пропорционально уменьшены по сравнению с реальным телом. В этом случае результаты модельных экспериментов можно считать пропорциональными результатам реального эксперимента.

***Измерение*** — совокупность действий, выполняемых с помощью средств измерений в целях нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах измерения.

Именно в интерпретации результатов измерений выявляется глубина теоретических выводов.

***Теоретический уровень*** познания предусматривает обобщения, классификацию и анализ экспериментальных данных, установление физических законов, выдвижение научных гипотез и создание научных теорий.

***Физические законы*** — устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе.

***Гипотеза*** — научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого-либо явления и требующее проверки на опыте. Если гипотеза выдерживает эмпирическую проверку, то она приобретает статус закона, в противном случае считается опровергнутой.

***Теория*** — совокупность нескольких законов, относящихся к одной области познания.

**I Верховным судьей любой теории является опыт.**

Если теория в целом не получает эмпирического подтверждения, то она дополняется новыми гипотезами. Подтвержденная опытами теория считается истинной до тех пор, пока не будет предложена новая теория, объясняющая новые эмпирические факты и включающая старую как частный случай.

Каждый шаг в изучении природы — это приближение к истине. Физика все глубже проникает в новые области и изучает такие объекты, которые не имеют аналогов в повседневности. В таких случаях в физике используют моделирование.

*Моделирование* позволяет воспроизвести определенные геометрические, физические, динамические характеристики объекта — оригинала.

***Модель*** — упрощенная версия физической системы или процесса, сохраняющая их главные черты. Простейшими моделями являются, например, материальная точка, идеальный газ, кристаллическая решетка — так называемое предметное моделирование. При моделировании указываются пределы и границы допустимых упрощений.

Любая модель прежде всего подвергается проверке соответствия ее свойств свойствам моделируемой реальной физической системы. По мере усовершенствования модель становится более точной и совершенной. Модель, выдержавшая много испытаний, предсказавшая новые явления и указавшая на новые эксперименты, которые согласуются с ней, составляет основу физических теорий. Существует также знаковое, мысленное и компьютерное моделирование. При *знаковом моделировании* в качестве модели используют схемы, чертежи, формулы. Частным случаем знакового моделирования является *мате-*

*матическое моделирование. При мысленном моделировании* (мысленном эксперименте) ученый представляет себе объект, который не существует в реальности, и проводит над ним эксперимент в уме. Широко известны, например, мысленные эксперименты А.Эйнштейна (1879-1955), создателя теории относительности, Г.Галилея и Дж.Максвелла (1831-1879). Так, Галилей открыл закон инерции, мысленно уменьшая, а затем исключая силы трения при движении; Максвелл сформулировал парадокс с «демоном», т.е. мысленно расположил на пути летящих молекул гипотетического «демона», сортирующего молекулы по скоростям. При *компьютерном моделировании* в качестве модели выступает алгоритм — программа функционирования объекта.

Модели, которые имеются у физиков сегодня, в состоянии описать многие явления Природы. Однако завтра они будут усовершенствованы и после опытной проверки все больше способствовать познанию Природы.

Итак, физика — наука экспериментальная, так как основным методом изучения природы является эксперимент, который подтверждает или отрицает выводы физики.

**Физическая величина.** ***Физическая величина*** — это измеряемая характеристика физических объектов или явлений материального мира, общая в качественном отношении множества объектов или явлений, но индивидуальная для каждого из них в количественном отношении. Например, масса — физическая величина, являющаяся общей характеристикой физических объектов, для каждого объекта (автомобиль, телевизор, самолет и т. п.) имеет индивидуальное значение; удельное сопротивление — физическая величина — общая характеристика многих физических тел, но для разных металлов она различна.

Физическая величина представляет собой либо обобщенное понятие (длина, объем, масса, удельная теплоемкость, вязкость, сила электрического тока и т.д.), либо конкретную величину — индивидуальную характеристику отдельного объекта или явления: вместимость данного сосуда, напряженность электрического поля в данной точке пространства, удельная теплоемкость воды при температуре О °С и т. д. Указанному выше определению не удовлетворяют термины: электрическое поле, волна и т. д., а также наименования физических объектов: гиря, поезд, пуля и т.д.

*Значение* конкретной физической величины выражают произведением отвлеченного числа на принятую для данной физической величины единицу.

Что надо знать о физической величине:

• физический смысл величины (какие свойства или качества вещества или поля она характеризует);

• определение физической величины;

• формулу, выражающую связь данной физической величины с другими;

• единицу величины (наименование, обозначение, определение);

• способы ее измерения.

***Единицу физической величины*** можно установить произвольно, но если принять их независимыми друг от друга, то в формулах, связывающих различные физические величины, появится много переводных коэффициентов, что усложнит как сами формулы, так и вычисления. К. Гаусс показал, что для построения системы единиц физических величин достаточно выбрать несколько независимых друг от друга единиц. Эти единицы называют ***основными.*** Единицы

физических величин, которые определяются по уравнениям с помощью основных единиц, называют ***производными.***

Совокупность основных и производных единиц называют ***системой единиц.*** Международная система единиц СИ состоит из семи основных (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела), двух дополнительных (радиан и стерадиан) и большого числа производных единиц.

Для образования производных единиц из основных применяют определяющие уравнения связи между величинами. Некоторые производные единицы, получившие специальные наименования, могут быть использованы для образования других производных единиц СИ. Сокращенные обозначения единиц, названные в честь ученых, пишутся с прописной буквы.

Специальные наименования, присвоенные единицам, обязательны к применению. Например, для работы и энергии следует применять единицу джоуль (Дж), а не ньютон-метр (Н • м), несмотря на то, что 1 Н • м = 1 Дж.

**Физические законы.** ***Физические законы*** выражают в математической форме количественные связи между физическими величинами. Они устанавливаются на основе обобщения опытных (экспериментальных) данных и отражают объективные закономерности, существующие в Природе.

Установление физических законов связано с измерением физических величин. Очевидно, что результат измерений не может быть абсолютно точным.

**Физические законы справедливы для той области, для которой их применимость проверена опытным путем.**

Например, законы механики Ньютона (классической механики) установлены для движения макроскопических тел, движущихся со скоростями много меньше скорости света. Дальнейшее развитие науки показало, что законы классической механики не справедливы, с одной стороны, для движения объектов микромира (отдельных атомов или элементарных частиц), с другой — для движения объектов, скорости которых сравнимы со скоростью света ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Физические законы, имеющие наиболее обширные области применимости, называют ***фундаментальными*** (например, закон сохранения энергии).

Изучая физический закон, нужно знать:

- связь между какими явлениями (процессами) или физическими величинами он выражает;
- формулировку закона и его математическое выражение;
- опыты, подтверждающие справедливость закона;
- учет и использование на практике;
- границы применимости.

**Понятие о физической картине мира.** По мере накопления экспериментальных данных постепенно вырисовывалась и складывалась величественная и сложная картина окружающего нас мира и Вселенной в целом.

Научные поиски и исследования, проведенные на протяжении многих веков, позволили И. Ньютону (1643-1727) открыть и сформулировать фундаментальные законы механики, которые в то время казались настолько всеобъемлющими, что легли в основу построения ***механической картины мира,*** согласно которой все тела должны состоять из абсолютно твердых частиц, находящихся в

непрерывном движении. Взаимодействие между телами осуществляется с помощью сил тяготения (гравитационных сил). Все многообразие окружающего мира, по Ньютону, заключалось в различии движения частиц.

Механическая картина мира господствовала до тех пор, пока Дж.Максвеллом (1873) не были сформулированы уравнения, описывающие основные закономерности электромагнитных явлений. Эти закономерности не могли быть объяснены с точки зрения механики Ньютона. В отличие от классической механики, где предполагается, что взаимодействие между телами осуществляется мгновенно (теория дальнодействия), теория Максвелла утверждала, что взаимодействие происходит с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме, посредством электромагнитного поля (теория близкодействия). Создание специальной теории относительности — нового учения о пространстве и времени — позволило полностью обосновать электромагнитную теорию.

В состав всех без исключения атомов входят электрически заряженные частицы. С помощью электромагнитной теории можно объяснить природу сил, действующих внутри атомов, молекул и макроскопических тел. Это положение легло и в основу создания ***электромагнитной картины мира,*** согласно которой все происходящие в окружающем нас мире явления пытались объяснить с помощью законов электродинамики. Однако объяснить строение и движение материи только электромагнитными взаимодействиями не удалось.

Дальнейшее развитие физики показало, что кроме ***гравитационного*** и ***электромагнитного взаимодействий*** существуют и другие типы взаимодействия. Первая половина XX в. ознаменовалась интенсивным изучением строения электронных оболочек атомов и тех закономерностей, которые управляют движением электронов в атоме. Это привело к возникновению новой отрасли физики — квантовой механики. В квантовой механике используется понятие ***дуализма:*** движущаяся материя является одновременно и веществом, и полем, т.е. обладает одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. В классической же физике материя всегда либо совокупность частиц, либо поток волн.

Развитие ядерной физики, открытие элементарных частиц, исследование их свойств и взаимопревращений привели к установлению еще двух типов взаимодействий, названных ***сильными*** и ***слабыми.***

Таким образом, современная физическая картина мира предполагает четыре типа взаимодействия: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное. Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре. Слабое взаимодействие проявляется в основном при распаде элементарных частиц. Итак, учение о строении материи в настоящее время является атомистическим, квантовым, релятивистским, в нем применяются статистические представления.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Что изучает наука «физика»? 2. Какие виды материи вам известны? 3. Что определяет пространство? 4. Что определяет время? 5. Какие методы используются на эмпирическом уровне познания? 6. Почему физика — наука экспериментальная? 7. Что необходимо знать о физической величине? 8. Какие единицы физических величин являются основными в СИ? **9.** Что выражают физические законы? **10.** Что необходимо знать о физическом законе? **11**. Сколько типов взаимодействия предполагает современная физическая картина мира?

РАЗДЕЛ I

# МЕХАНИКА

***Механика*** (от греч. *mechanike* — искусство построения машин) — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

***Кинематика*** (от греч. *kinematos* — движение) — раздел механики, в котором изучаются способы описания движений и связь между величинами, характеризующими эти движения. Кинематика изучает движения тел без учета причин, их вызывающих.

***Динамика*** (от греч. *dynamis* — сила) — раздел механики, посвященный изучению движения материальных тел под действием приложенных к ним сил.

В динамике рассматриваются два типа задач.

Задачи первого типа состоят в том, чтобы, зная законы движения тела, определить действующие на него силы. Классическим примером решения такой задачи явилось открытие И. Ньютоном закона всемирного тяготения. Зная установленные И. Кеплером законы движения планет, И. Ньютон показал, что это движение происходит под действием силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния между планетой и Солнцем.

Задачи второго типа (основные в динамике) состоят в том, чтобы, зная начальное положение тела и его начальную скорость, по действующим на тело силам определить закон его движения.



Архимед

**Историческая справка.** Существенный вклад в развитие механики внесли ученые: Архимед (ок. 287 - 212 гг. до н.э.), который разработал теорию рычага, сложение параллельных сил, учение о центре тяжести и т.д.; Леонардо да Винчи (1452-1519), исследовавший свободное падение и движение тела, брошенного горизонтально, сопротивление балок растяжению и сжатию; установивший, что действие равно противодействию и направлено против него; изучивший механизм трения и определивший коэффициент трения; создавший проект первого летательного аппарата, парашюта, ряда гидротехнических сооружений и многое другое; Н.Коперник (1473-1543) и И.Кеплер (1571-1630), открывшие законы движения планет, которые впоследствии стали основой для сформулированного И.Ньютоном закона всемирного тяготения; Г.Галилей (1564-1642)- основоположник динамики и один из основателей точного естествознания, установил закон инерции, законы свобод-

ного падения, движения тела по наклонной плоскости и тела, брошенного под углом к горизонту; открыл закон сложения движений и закон постоянства периода колебаний маятника. Ему человечество обязано двумя принципами механики, сыгравшими большую роль в развитии не только механики, но и физики в целом, — принцип относительности и принцип постоянства ускорения свободного падения.

# Глава 1

# КИНЕМАТИКА

## 1.1. Механическое движение

**Описание механического движения.** Под ***механическим движением*** понимают изменение с течением времени взаимного положения тел или их частей в пространстве. Например, в природе — это вращение Земли вокруг собственной оси, движение Земли и других планет вокруг Солнца, вращение Солнечной системы вокруг ядра Галактики, «разбегание» галактик, т. е. расширение Вселенной; в технике — движение автомобилей, самолетов, морских и космических кораблей, частей двигателей машин и механизмов.

При изучении движения материальных тел, для упрощения решения некоторых задач в механике используют модели — материальную точку и абсолютно твердое тело.

***Материальная точка*** — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

Положение материальной точки в пространстве определяется как положение геометрической точки. Материальной точкой, например, считают Землю при рассмотрении ее движения вокруг Солнца. В дальнейшем при употреблении термина «тело» будем иметь в виду материальную точку.

***Абсолютно твердое тело*** — система материальных точек, расстояние между которыми с течением времени не изменяется.

Размеры и форма абсолютно твердого тела при различных внешних воздействиях не изменяются.

Механическое движение происходит в пространстве и во времени. В классической механике пространство однородно и изотропно, время — однородно.

***Однородность пространства*** означает равноправие всех его точек.

***Изотропность пространства*** означает равноправие всех направлений в пространстве.

***Однородность времени*** — равноправие всех моментов времени.

Для описания механического движения необходимо указать тело, относительно которого рассматривается движение. Относительно Солнца рассматривается движение планет, относительно каких-либо пунктов на поверхности Земли — движение самолетов, поездов, автомобилей. При этом Солнце (или Земля) считается неподвижным и является телом отсчета.

***Тело отсчета*** — произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение движущейся материальной точки.

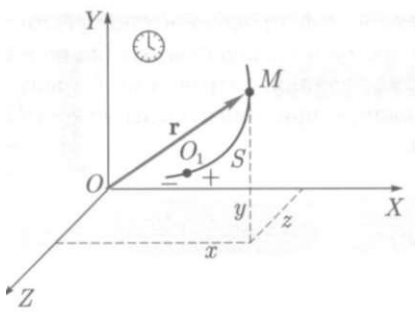



Рис. 1.1

Положение движущейся материальной точки в данный момент времени можно определить, если выбрана система отсчета.

***Система отсчета*** — совокупность тела отсчета, связанных с ним системы координат и часов.

Механическое движение происходит во времени, поэтому система отсчета должна иметь часы, отсчитывающие промежутки времени от произвольно выбираемого начального момента времени (рис. 1.1).

На рис. 1.1 тело отсчета О находится в начале координат. При описании движения наиболее употребительна прямоугольная, или декартова, система координат. Положение материальной точки Мв декартовой системе координат определяется тремя координатами: $x$, $y$, $z$ или радиусом-вектором **г.**

Радиус-вектор $\mathbf{r}$ — вектор, проведенный из начала системы координат в данную точку. Длина радиуса-вектора $\mathbf{r}$, т. е. его модуль $|\mathbf{r}| = r$, определяет расстояние, на котором точка $M$ находится от начала координат, а стрелка указывает направление на эту точку.

При движении материальной точки $M$ конец радиуса-вектора **г** описывает в пространстве некоторую линию — траекторию.

***Траектория*** (от лат. *trajectorius* — относящийся к перемещению) — непрерывная линия, которую описывает точка при своем движении.

**Виды движения.** По форме траектории механическое движение классифицируют на прямолинейное и криволинейное.

***Прямолинейное движение*** — это движение, траекторией которого в выбранной системе отсчета является прямая линия.

***Криволинейное движение*** — это движение, траектория которого в выбранной системе отсчета — некоторая кривая линия.

Вид траектории зависит от того, по отношению к какой системе отсчета рассматривается движение. На рис. 1**.2, *а*** изображена траектория движения Луны — спутни-

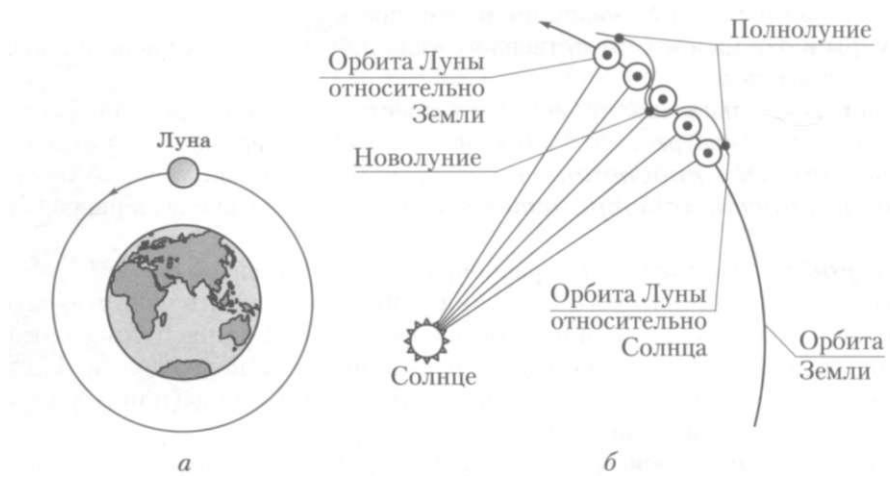



Рис. 12

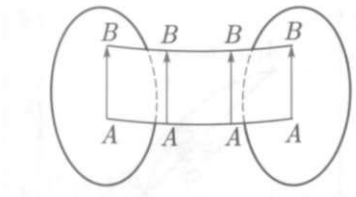



Рис. 13

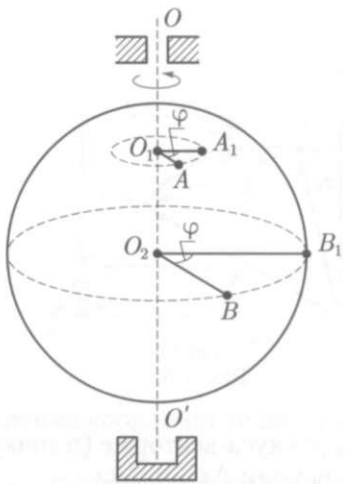



Рис. 14

**ка Земли — в геоцентрической системе (относительно Земли), а на рис. 1.2, *б* в гелиоцентрической системе (относительно Солнца).**

**Простейшими являются поступательное и вращательное движения твердого тела.**

***Поступательное движение* — это такое движение твердого тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается, оставаясь параллельной своему начальному положению (рис. 1.3).**

**При поступательном движении твердого тела все точки тела описывают одинаковые траектории. Движение тела задается и изучается так же, как и движение одной точки. Поступательно движется ящик письменного стола, вагоны электропоезда, кабины «колеса обозрения».**

***Вращательное движение вокруг неподвижной оси* — это такое движение твердого тела, при котором все его точки описывают окружности, центры которых лежат на одной неподвижной прямой — оси вращения, перпендикулярной плоскостям этих окружностей.**

**Примерами вращательного движения могут быть: вращение колес велосипеда, пропеллеров самолета, валов двигателей и генераторов.**

**При вращательном движении твердого тела вокруг неподвижной оси *00′* его положение определяется углом поворота $\varphi$ (рис. 1.4).**

## 1.2. Перемещение. Путь

**Вектор перемещения. Положение материальной точки (тела) в выбранной системе отсчета в данный момент времени задается радиусом-вектором г. Пусть точка перемещается на плоскости и в начальный момент времени $t_0$ находится в положении *A*, в момент времени *t* — в положении *B*. Эти положения точки в системе координат *XOY* определяются соответственно радиусами-векторами $\mathbf{r}_0$ и г (рис. 1.5). Вектор $\Delta^1\mathbf{r}$, проведенный из конца радиуса-вектора $\mathbf{r}_0$ (из точки *A*)**

[1] Греческая буква «дельта» (Д) обозначает в формулах изменение, приращение, промежуток, отрезок.

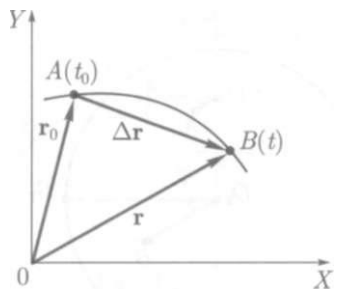



Рис. 1.5

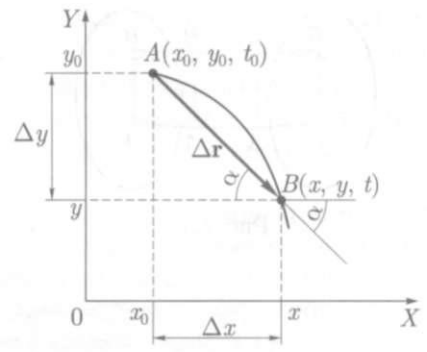



Рис. 1.6

в конец радиуса-вектора **r** (в точку *B),* является перемещением точки за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_0. \qquad (1.1)$$

***Перемещение*** $\Delta \mathbf{r}$ — вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и конце некоторого промежутка времени.

Вектор перемещения направлен вдоль хорды траектории точки.

Для описания движения необходимо знать радиус-вектор точки в любой момент времени. Из рис. 1.**5** видно, что если известен радиус-вектор в начальный момент времени $\mathbf{r}_0$ и известно перемещение $\Delta \mathbf{r}$, то можно найти радиус-вектор **r** в любой последующий момент времени $t$:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r}. \qquad (1.2)$$

IВекторному уравнению **(1**.2) для движения точки на плоскости соответствуют два уравнения **в** координатной форме.

Опустив перпендикуляры из начала и конца вектора перемещения $\Delta \mathbf{r}$ на оси координат *Xu Y,* можно найти его проекции на эти оси.

***Проекции*** *ВЕКТОРА* ***перемещения*** — это изменения координат $\Delta x$ и $\Delta y$ движущейся точки (рис. 1.6). Изменение координат при движении материальной точки может быть как положительным, так и отрицательным. Из рис. 1.6 видно, что при движении материальной точки из *A* в *B* координата по оси *X* возрастает $(x > x_0)$, поэтому изменение координаты положительно $(\Delta x = x - x_0 > 0)$. По оси *Y* координата уменьшается $(y < y_0)$, изменение координаты отрицательно $(\Delta y = y - y_0 < 0)$

Зная, что проекции вектора перемещения равны изменениям координат, имеем

$$x = x_0 + \Delta x; \quad y = y_0 + \Delta y. \qquad (1.3)$$

**I** Векторному уравнению **(1**.2) для движения материальной точки **в** про| странстве соответствуют три уравнения **в** координатной форме

$$x = x_0 + \Delta x; \quad y = y_0 + \Delta y; \quad z = z_0 + \Delta z. \qquad (1.4)$$

Таким образом, чтобы найти положение точки в пространстве в любой момент времени (координаты *x, y, z),* необходимо знать ее начальное положение

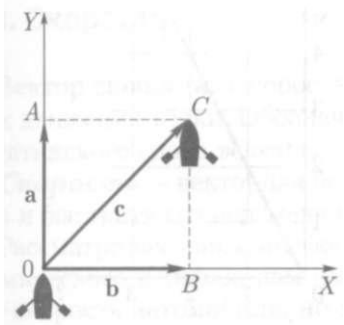



Рис. 1.7

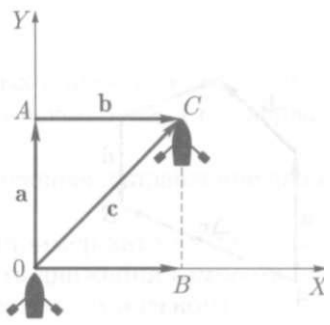



Рис. 1.8

(координаты $x_0, y_0, z_0$) и уметь вычислять изменения координат точки $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ при ее движении.

Модуль и направление перемещения полностью определяются его проекциями на оси ординат. Используя рис. **1.6,** по теореме Пифагора определяем модуль вектора перемещения

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}. \qquad (1.5)$$

Направление вектора $\Delta \mathbf{r}$ можно задать углом а между вектором и положительным направлением оси *X.* Из рис. **1.6** видно, что

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} \text{ (на рис. 1.6 } \Delta x > 0; \Delta y < 0). \qquad (1.6)$$

Векторный **и** координатный методы описания движения взаимосвязаны **и** эквивалентны.

Сложение перемещений. Перемещение — векторная величина, поэтому действия с векторами перемещений проводятся по правилам векторной алгебры[1].

Поясним это на примере. Пусть лодка движется поперек течения реки (рис. **1.7).** Если бы вода в реке была неподвижной, то лодка, двигаясь вдоль оси У, через некоторый промежуток времени оказалась в точке *A.* Перемещение вдоль оси *Y* — вектор **а.** В действительности вода в реке течет вдоль оси *X* и «сносит» лодку по течению за то же время в точку *B.* Перемещение вдоль оси *X* — вектор **Ь.**

Каково же будет действительное перемещение лодки? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно сложить два вектора **а** и **Ь.** Сложение векторов производят по правилу параллелограмма или треугольника (многоугольника).

Согласно ***правилу параллелограмма,*** суммарный вектор с представляет собой диагональ параллелограмма, построенного на составляющих векторах **(а** и **Ь)** как на сторонах, при этом начала всех трех векторов **(а, Ь, с)** совпадают.

Из рис. **1.7** видно, что **с = а + b** или с **— b + а,** т. е. результат сложения перемещений не зависит от последовательности слагаемых перемещений.

[1] **Векторная алгебра — учение о действиях над векторами (сложении, вычитании, умножении).**

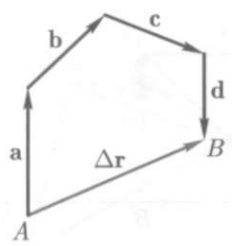



Рис. 1.9

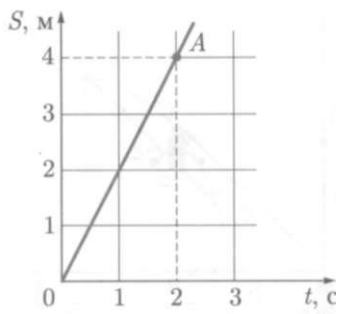



Рис. 1.10

По ***правилу треугольника*** (рис. 1.8) необходимо с концом вектора **a** совместить начало вектора b**.** Соединив начало первого вектора с концом второго, получают суммарный вектор **c.**

Если необходимо сложить несколько векторов, то правило треугольника обобщается на ***правило многоугольника.*** Для нахождения результирующего перемещения $\mathbf{a}+\mathbf{b}+\mathbf{c}+\mathbf{d}=\Delta\mathbf{r}$ надо соединить начало первого вектора (точку *A)* с концом последнего (точкой *B)* (рис. 1.9).

**Путь.** Путь в отличие от перемещения является скалярной функцией времени.

***Путь*** *S* — скаляр, равный длине участка траектории, пройденного движущейся точкой за данный промежуток времени.

Единица пути — метр (м) является в СИ основной.

***Метр*** — единица длины, равная расстоянию, которое проходит свет в вакууме за время 1/299792458 с.

Пути, пройденные точкой за последовательные промежутки времени, складываются алгебраически.

График зависимости пути от времени *S = f(t)* называется *графиком пути* (рис. 1.10). Например, по известному графику пути можно определить путь, пройденный материальной точкой за определенный промежуток времени. Для этого надо из точки на оси времени, соответствующей концу промежутка, например 2 с, восстановить перпендикуляр до пересечения с графиком (точка *A).* Из этой точки *A* опустить перпендикуляр на ось *S.* Точка пересечения перпендикуляра с осью *S* даст значение пути. Согласно графику, за 2 с точка прошла путь 4 м (см. рис. 1.10).

**При движении материальной точки путь не может уменьшаться и не бывает отрицательным** $S \geqslant 0$.

При прямолинейном движении модуль вектора перемещения $|\Delta\mathbf{r}|$ равен пути $\Delta S$, т.е. $|\Delta\mathbf{r}| = \Delta S$.

Если движение происходит по оси *X*, то, согласно (1.4)

$$\Delta S = |\Delta x| = |x - x_0|. \qquad (1.7)$$

Если направление прямолинейного движения изменяется, то путь больше модуля вектора перемещения. Например, тело бросили с поверхности Земли вертикально вверх. Поднявшись на высоту *h,* тело падает вниз. Вектор перемещения тела равен нулю $\Delta\mathbf{r} = 0$, а путь *S=2h.*

При криволинейном движении путь $\Delta S$ больше модуля перемещения $|\Delta\mathbf{r}|$.

## 1.3. Скорость

**Вектор скорости.** Скорость — одна из основных кинематических характеристик движения точки. Обозначается скорость латинской буквой $v$ — первая буква латинского слова *velocitas* — скорость[1].

***Скорость*** — векторная величина, характеризующая направление движения тела и быстроту его перемещения.

Рассматривая движение какого-либо тела, например автомобиля, самолета, космического корабля, нам известно, что скорость движения самолета больше, чем скорость автомобиля, но меньше, чем скорость космического корабля. На транспортных средствах обычно устанавливают прибор, который показывает модуль или числовое значение скорости его движения — спидометр.

**Скорость изображают направленным отрезком прямой, длина которого в выбранном масштабе характеризует модуль скорости (рис. 1.11).**

**Средняя скалярная скорость.** Определить, какое из тел движется быстрее, можно, например, такими способами:

• вычислить путь, который проходят движущиеся тела за один и тот же промежуток времени. Чем больше этот путь, тем быстрее движется тело и тем больше его скорость;

• вычислить время, за которое тела проходят одинаковые пути. Чем меньше это время, тем быстрее движется тело и тем больше его скорость.

Таким образом, скорость пропорциональна пути и обратно пропорциональна времени движения

$$v_S = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \qquad (1.8)$$

По формуле (1.8) определяют среднюю скалярную скорость.

***Средняя скалярная скорость*** — физическая величина, равная отношению пути $\Delta S$, пройденного телом за промежуток времени $\Delta t$, к длительности этого промежутка.

Средняя скалярная скорость удобна для описания движения по замкнутой траектории или по траектории, различные участки которой пересекаются.

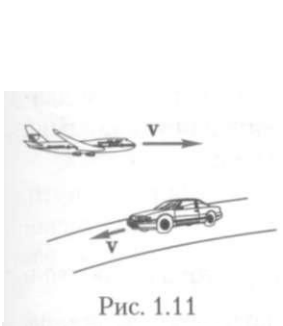



Рис. 1.11

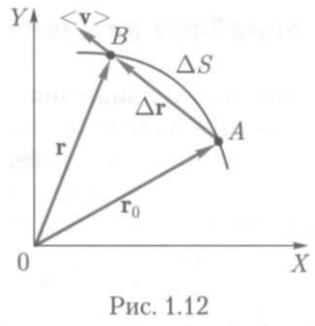



Рис. 1.12

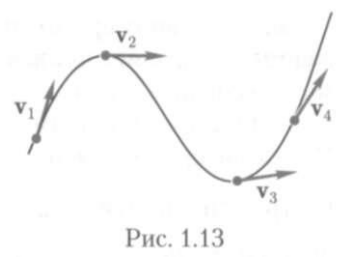



Рис. 1.13

[1] Латинские буквы напоминают о физическом смысле обозначаемой величины (например, время — *tempus*, обозначается латинской буквой $t$).

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
47

Таблица 1.1

| Объект | Скорость, м/с | Объект | Скорость, м/с |
|---|---|---|---|
| Рост человеческого волоса | $5 \cdot 10^{-9}$ | Молекула в атмосфере | $5 \cdot 10^{2}$ |
| Дрейфующий ледник | $3 \cdot 10^{-6}$ | Луна вокруг Земли | $1 \cdot 10^{3}$ |
| Муравей | $1 \cdot 10^{-2}$ | Земля по орбите | $3 \cdot 10^{4}$ |
| Пловец | $2 \cdot 10^{0}$ | Солнечная система в Галактике | $2 \cdot 10^{5}$ |
| Спринтер | 10 | | |
| Звук в воздухе | $3{,}3 \cdot 10^{2}$ | Электрон в атоме водорода | $2 \cdot 10^{6}$ |

*Примечание.* **Объекты Вселенной движутся с различными скоростями. Но (!) существует фундаментальный принцип, согласно которому максимальная скорость движения материальных объектов равна скорости света в вакууме** $c = 3 \cdot 10^{8}$ м/с.

Мгновенная **скорость.** Средняя скорость является приблизительной характеристикой движения. Когда автомобиль разгоняется или тормозит, показания спидометра изменяются и не будут совпадать с вычисленными по формуле (1.8), поскольку спидометр показывает скорость движения автомобиля в данный момент, т. е. за бесконечно малый промежуток времени. Скорость в данный момент времени $(\Delta t \to 0)$ называют ***мгновенной*** *(v).*

Пусть материальная точка движется по траектории (рис. 1.12) из положения *A* в положение *B* по дуге *AB*. ***B*** течение промежутка времени $\Delta t = t - t_0$ точка пройдет путь $\Delta S$, равный длине дуги *AB*, и совершит перемещение

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r} - \Delta \mathbf{r}_0.$$

При уменьшении промежутка времени $\Delta t$ точка *B* будет располагаться все ближе и ближе к точке *A*, т. е. $\Delta \mathbf{r}$ будет уменьшаться. Если $\Delta t$ будет стремиться к нулю, то модуль вектора перемещения равен пути $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta S$ и в предельном случае $\Delta \mathbf{r}$ будет направлен по касательной к траектории движения материальной точки.

**Вектор** мгновенной **скорости** направлен **по** касательной **к** траектории в **направлении** движения **(рис. 1.13).**

В табл. 1.1 приведены скорости движения различных объектов.

## 1.4. Равномерное прямолинейное движение

**Закон** равномерного прямолинейного движения. При прямолинейном движении траектория движения — прямая линия. При описании такого движения можно считать, что тело движется вдоль одной из осей координат.

Если движение прямолинейное, то модуль вектора перемещения равен пути. Пусть материальная точка движется вдоль оси *X*, тогда $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta S = \Delta x$ и скорость вычисляется по формуле: $v_x = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$; если направление вектора скорости и положительное направление оси *X* совпадают, то $\Delta x$ — положительная величина, $\Delta t$ — всегда положительная величина, следовательно, скорость — величина положительная $(v_x > 0)$

Если направление вектора скорости противоположно положительному направлению оси *X,* то $v_x = -\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$, т.е. $v_x < 0$.

При прямолинейном движении тела вектор скорости не изменяется по направлению, модуль вектора скорости с течением времени может как изменяться, так и оставаться постоянным. Если модуль скорости тела с течением времени изменяется, движение называется ***неравномерным (переменным).***

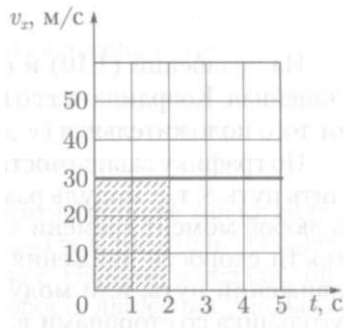


Рис. 1.14

***Равномерное прямолинейное движение*** — это движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю скоростью $v$ — const[1].

***Равномерное движение*** — движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью

$$\mathbf{v} = \text{const}. \qquad (1.9)$$

Единица скорости — метр в секунду (м/с).

1м/с равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на 1 м.

Зависимость (1.9) можно изобразить графически. Графиком скорости равномерного движения является прямая линия, параллельная оси времени (рис. 1.14). В момент времени 1 с, **2** с и т.д. скорость движения равна **30** м/с, т.е. является постоянной.

Если тело движется равномерно вдоль положительного направления оси *X* и в начальный момент времени $t_0 = 0$ находилось в точке с координатой $x_0$, а в произвольный момент времени $t$ в точке с координатой $x$, то скорость движения равна $v_x = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{x - x_0}{t - t_0}$ или, учитывая, что $t_0 = 0$, $v_x = \dfrac{x - x_0}{t}$. Отсюда следует, что

$$x = x_0 + v_x t. \qquad (1.10)$$

Выражение (1.10) называют ***законом равномерного прямолинейного движения.*** Из этого уравнения следует, что

$$x - x_0 = v_x t.$$

Учитывая, что модуль разности координат равен пути [см. формулу (1.7)], тело движется вдоль положительного направления оси *X,* т. е. $|x - x_0| = x - x_0$, получим

$$\Delta S = v_x t. \qquad (1.11)$$

При равномерном прямолинейном движении зависимость пути от времени является линейной.

Для определения координаты движущего тела в любой момент времени надо знать начальную координату $x_0$ и скорость $v_0$.

Если начало отсчета поместить в начало координат $(x_0 = 0)$, то закон равномерного прямолинейного движения будет иметь вид

[1] Const (от лат. *constans* — постоянный).

$$x = v_x t. \tag{1.12}$$

Из уравнений (1.10) и (1.12) видно, что зависимость координаты от времени линейная. Координата *хсо* временем либо возрастает, либо убывает в зависимости от того положительная (v > 0) или отрицательная (v < 0) скорость движения.

По графику зависимости скорости $v_x$ от времени (см. рис. 1.14) можно определить путь *S,* т. е. модуль разности координат движущегося тела $S = |\Delta x| = |x - x_0|$ в любой момент времени *t* Путь численно равен площади под графиком зависимости скорости движения тела от времени. При прямолинейном равномерном движении путь, или модуль разности координат $|\Delta x|$, равен площади прямоугольника со сторонами $v_x$ и *t:*

$$S = v_x t.$$

Например, при *t* = 2 с, *S* — 30 м/с • 2 с = 60 м.

Из уравнения (1.12) можно определить скорость движения $v_x$, если известна координата тела *x* в момент времени *t,* а начальная координата $x_0$ равна нулю:

$$v_x = \frac{x}{t}. \tag{1.13}$$

**График пути равномерного** прямолинейного **движения.** Линейную зависимость пути, проходимого движущимся телом от времени, можно изобразить графически. Если по оси абсцисс откладывать время движения *t,* а по оси ординат — путь *S,* то в соответствии с формулой (1.11) графиком линейной зависимости пути от времени является прямая линия, проходящая через начало координат (при *t*= 0, *S*— 0) (рис. 1.15). Выясним, от чего зависит угол наклона прямой к оси времени — угол а. За некоторый промежуток времени *t* (пусть за время *t = 2* с — на оси абсцисс этот промежуток времени изображен отрезком ( *OB),* тело прошло путь *S (t* = 2 с соответствует *S* — 20 м — отрезок *AB).* Из рис. 1.15 имеем

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{AB}{OB} = \frac{S}{t} = v_x; \quad v_x = \frac{20\text{ м}}{2\text{ с}} = 10\text{ м/с}. \tag{1.14}$$

Таким образом, угол наклона прямой зависит от скорости движения тела. Чем больше скорость движения $v_x$, тем больше $\operatorname{tg}\alpha$ и, следовательно, больше $\alpha$ ($\alpha_2 > \alpha_1$

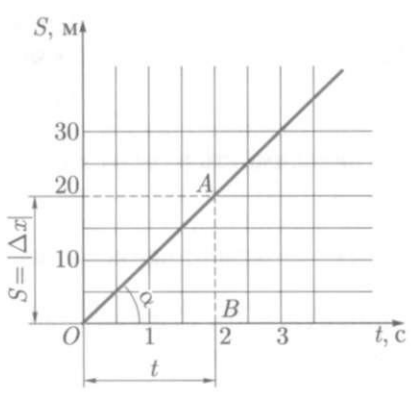



Рис. 1.15

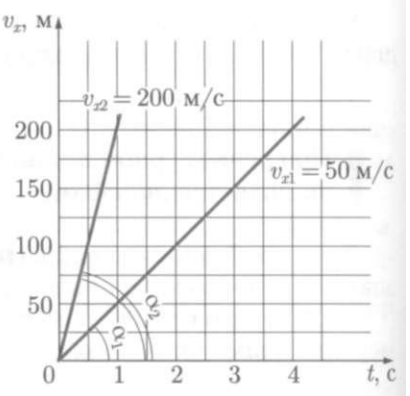



Рис. 1.16

так как $v_{x2} > 0\ v_{x1}$)[1] (рис. 1.16). Углы отсчитываются от положительного направления координатной оси (на рис. 1.16 — это ось *t)* против часовой стрелки.

## 1.5. Ускорение

Изменение скорости. Реальные тела, например автомобиль, не могут долго двигаться равномерно и прямолинейно. Нажатием педали газа водитель ускоряет движение автомобиля, т. е. скорость движения возрастает. Нажатием педали тормоза водитель замедляет движение автомобиля, т. е. скорость движения уменьшается. При движении может измениться не только модуль скорости, но и направление движения (направление скорости). Для характеристики изменения скорости с течением времени вводят еще одну характеристику движения — ускорение **(а).**

***Ускорение*** (от лат. *acceleratio* — ускорение) — векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости материальной точки по модулю и направлению.

При прямолинейном равномерном движении v = const, т. е. скорость тела не изменяется ни по модулю, ни по направлению, поэтому **а** = 0.

При прямолинейном неравномерном движении скорость тела направлена вдоль прямой, соответствующей траектории движения, т. е. направление скорости не изменяется, а изменяется только модуль скорости. На рис. 1.17, а, тело движется вдоль оси *X.*

Модуль скорости в точке *А* больше модуля скорости в точке *В:*

$$|\mathbf{v}_{xA}| > |\mathbf{v}_{xB}|, \Delta\mathbf{v} = \mathbf{v}_{xB} - \mathbf{v}_{xA}.$$

При криволинейном движении всегда происходит изменение скорости по направлению, так как вектор скорости направлен по касательной к траектории движения тела. С течением времени модуль вектора скорости может как не изменяться (рис. 1.17, *б),* так и изменяться (рис. 1.17, в). Совместив начало векторов $v_0$ и v, найдем их разность $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$, т. е. изменение скорости за промежуток времени $t - t_0$.

Ускорение. Введем еще одно определение ускорения.

***Ускорение*** — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости материальной точки $(\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0)$ к длительности промежутка времени $(\Delta t = t - t_0)$, в течение которого это изменение произошло:

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}. \qquad (1.15)$$

Вектор ускорения **а** направлен так же, как вектор изменения скорости $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$.

На рис. 1.18, а изображен участок траектории движущейся материальной точки. В момент времени $t_0$ скорость точки $\mathbf{v}_0$, а в момент времени *t* — v. Вектор ускорения **а** направлен так же, как и вектор изменения скорости $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$.

В общем случае направление вектора **а** не совпадает с направлением ни вектора $v_0$, ни вектора v (рис. 1.18, *б).* Вектор **а** направлен в сторону вогнутости траектории движения материальной точки (см. рис. 1.18, *а).*

[1] **Углы наклона сравнивают, если выбрана одна и та же система координат, т. е. одинаковый масштаб.**

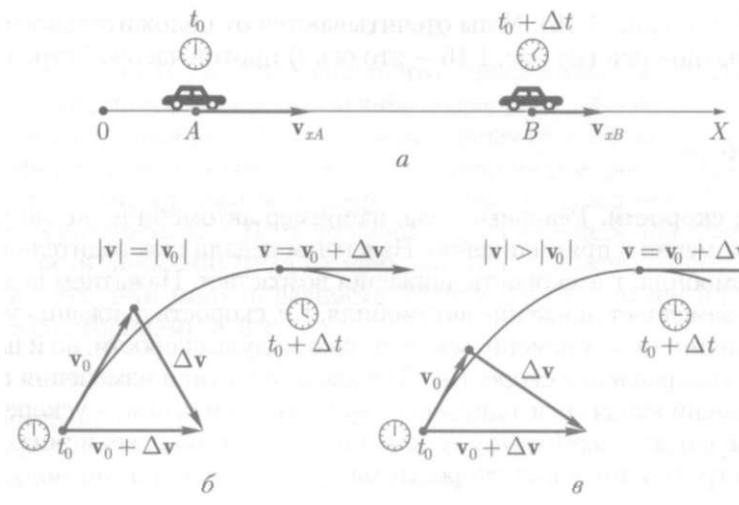



Рис. 1.17

Тангенциальное и нормальное ускорения. В общем случае при криволинейном движении вектор ускорения а направлен «внутрь» траектории под некоторым углом по отношению к ней (рис. 1.19). Разложим по правилу параллелограмма вектор а на две составляющие. Одна составляющая $\mathbf{a}_\tau$ будет направлена вдоль касательной к траектории движения материальной точки, а другая $\mathbf{a}_n$ — вдоль нормали к траектории, т. е. перпендикулярно касательной в данной точке траектории.

Составляющая $\mathbf{a}_n$ вектора ускорения **a,** направленная вдоль нормали к траектории в данной точке, называется ***нормальным ускорением.*** Нормальное ускорение характеризует изменение вектора скорости по направлению при криволинейном движении.

Составляющая $\mathbf{a}_\tau$ вектора ускорения **a,** направленная вдоль касательной к траектории в данной точке, называется ***тангенциальным,*** или ***касательным, ускорением.*** Тангенциальное ускорение характеризует изменение вектора скорости по модулю.

Из рис. 1.19 видно, что $\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n$, а модули векторов $|\mathbf{a}| = a$, $|\mathbf{a}_\tau| = a_\tau$, $|\mathbf{a}_n| = a_n$ связаны между собой соотношением

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \qquad (1.16)$$

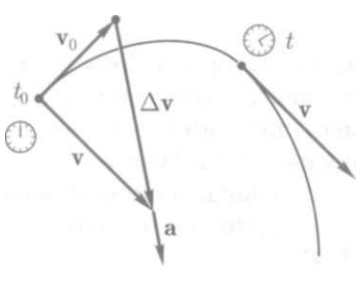



Рис. 1.18

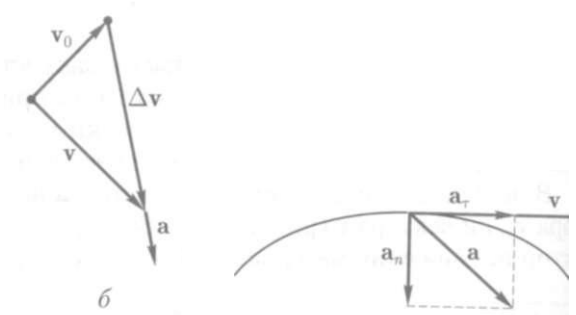



Рис. 1.19

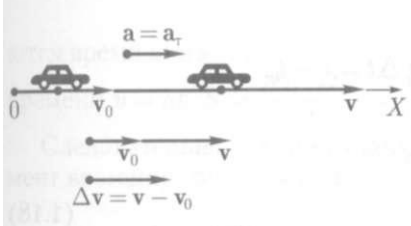


Рис. 1.20

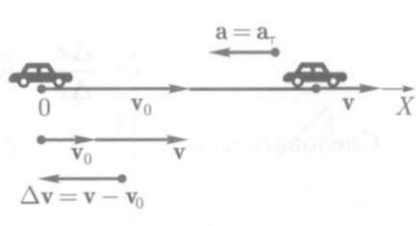


Рис. 1.21

Ши прямолинейном движении скорость тела изменяется только по модулю, т. е. $a_n = 0$, поэтому $\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau$. Определим направление ускорения стартующего гоночного автомобиля на прямолинейном участке траектории, т. е. автомобиль движется ускоренно. Поэтому вектор изменения скорости $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$ направлен вдоль направления движения, следовательно, и вектор ускорения $a = a_\tau$ направлен вдоль направления движения (направления скорости)[1].

Определим направление ускорения при торможении автомобиля на прямолинейном участке пути (рис. 1.21). Скорость v меньше $v_0$, т. е. автомобиль движется замедленно, поэтому вектор изменения скорости $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$ направлен противоположно направлению движения, следовательно, и вектор ускорения $a = a_\tau$ направлен противоположно направлению движения (направлению скорости).

Таким образом, векторы скорости и ускорения — коллинеарны[2]. При прямолинейном ускоренном движении вектор скорости v и вектор ускорения a имеют одно и то же направление (равнонаправленные): $\mathbf{v} \uparrow\uparrow \mathbf{a}$. При прямолинейном замедленном движении вектор скорости v и вектор ускорения a имеют противоположные направления: $\mathbf{v} \uparrow\downarrow \mathbf{a}$.

## 1.6. Равноускоренное прямолинейное движение

Ускорение. Частным случаем неравномерного прямолинейного движения является равнопеременное движение.

***Равнопеременное движение*** — это движение, при котором ускорение остается постоянным по модулю и направлению:

$$\mathbf{a} = \text{const}. \tag{1.17}$$

Направлено ускорение a вдоль траектории движения материальной точки. Нормальное ускорение равно нулю $\mathbf{a}_n = 0$. Равнопеременное движение может быть либо равноускоренным, либо равнозамедленным.

***Равноускоренное прямолинейное движение*** — это движение, при котором ускорение постоянно по модулю и направлению, и векторы скорости и ускорения являются равнонаправленными:

$$\mathbf{a} = \text{const}; \mathbf{v} \uparrow\uparrow \mathbf{a}, a > 0.$$

Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с$^2$, или м$\cdot$с$^{-2}$).

1 м/с$^2$ равен ускорению прямолинейно и ускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с. Учитывая (1.15), можно записать

1. Направление движения определяет направление вектора скорости.
2. Коллинеарными называют векторы, лежащие на параллельных или одной и той же прямой.

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}, \text{ где } \Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0 \text{ и } \Delta t = t - t_0.$$

Следовательно,

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_0}{t - t_0}. \qquad (1.18)$$

Если в момент начала отчета времени $(t_0 = 0)$ известна начальная скорость $\mathbf{v}_0$, то можно определить скорость v в произвольный момент времени $t$.

Из формулы (1.18) следует, что $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_0}{t - t_0}$ или $a = \frac{v - v_0}{t}$ .отсюда имеем

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t \text{ или } v = v_0 + at. \qquad (1.19)$$

Если направление движения совместить с осью $X$, то уравнению (1.19) будет соответствовать формула для проекции вектора скорости на эту координатную ось:

$$v_x = v_{0x} + at.$$

**При равноускоренном прямолинейном движении зависимость скорости движения материальной точки от времени является линейной.**

Если начальная скорость движения равна нулю ($v_0 = 0$), то уравнение (1.19) имеет вид

$$v_x = at \qquad (1.20)$$

и соответственно

$$v = at. \qquad (1.21)$$

Скорость тела при равноускоренном прямолинейном движении с течением времени возрастает.

График зависимости скорости от времени (рис. 1.22) — прямая, проходящая через начало координат $(t_0 = 0; v_0 = 0)$. Угол наклона прямой зависит от ускорения движения тела: чем больше ускорение, тем больше угол наклона (на рис. 1.22, $a_2 > a_1$ и $\alpha_2 > \alpha_1$).

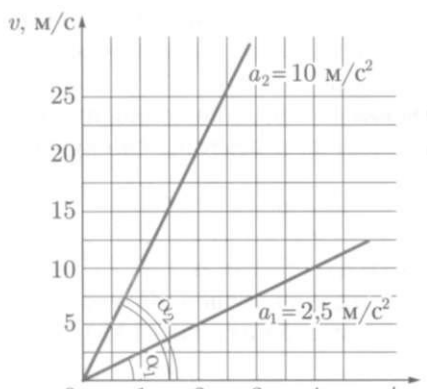


Рис. 1.22

**Закон равноускоренного прямолинейного движения.** Учитывая, что модуль разности координат движущего тела $|x - x_0| = x - x_0$ численно равен площади под графиком зависимости скорости движения тела от времени (см. рис. 1.14), определим эту разность координат, или путь. Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$, начальная скорость $v_0 = 0$. Разность координат $\Delta x$ движущегося тела в момент времени $t$ (рис. 1.23) численно равна площади прямоугольного треугольника $OAB$, катетами которого явля-

ются время движения $t$ и скорость в этот момент времени $v = at$: $S = \dfrac{AB \cdot OB}{2} = \dfrac{at^2}{2}$.

Следовательно, разность координат $\Delta x$ в момент времени $t$ будет равна

$$x - x_0 = \frac{at^2}{2}, \text{ или } \Delta x = \frac{at^2}{2}. \quad (1.22)$$

Учитывая, что при прямолинейном движении изменение координаты движущего тела $\Delta x = x - x_0$ равно пути $x - x_0 = S$, имеем

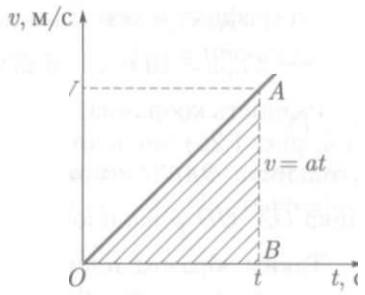


Рис. 1.23

$$S = \frac{at^2}{2}. \quad (1.23)$$

Если начальная координата движущегося тела $x_0 = 0$, то координата тела в момент времени $t$, согласно (1.22), равна

$$x = \frac{at^2}{2}. \quad (1.24)$$

Графиком функции $x = \dfrac{at^2}{2}$ является правая часть параболы с вершиной в точке $O$, осью параболы является ось ординат (рис. 1.24). Ветви параболы направлены вверх, так как $a > 0$. Левая ветвь параболы не имеет физического смысла, так как движение тела началось в момент времени $t_0 = 0$, при этом $x_0 = 0$ и $v_0 = 0$.

Если начальная скорость движения отлична от нуля, т.е. $v_0 \neq 0$, то зависимость скорости от времени определяется уравнением (1.19) и графиком этой зависимости является прямая линия, начинающаяся на оси ординат $(t_0 = 0)$ из точки $v_0$ (рис. 1.25).

На рис. 1.25 начальная скорость равноускоренного движения $v_0$ — 4 м/с. Используя формулу $a = \dfrac{v - v_0}{t}$, найдем ускорение движущегося тела.

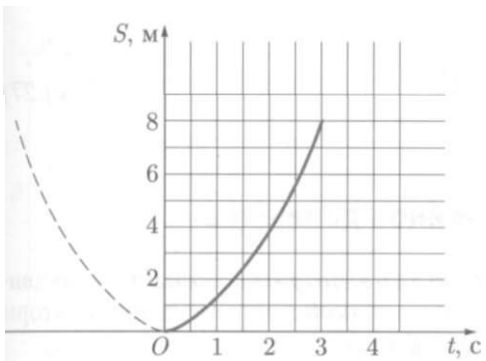


Рис. 1.24

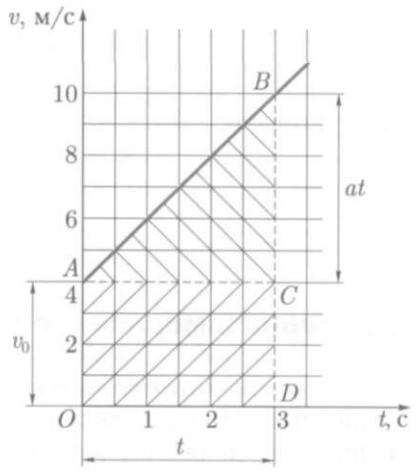


Рис. 1.25

По графику можно определить скорость в любой момент времени, например для $t = 3$ с, $v = 10$ м/с, тогда $a = \dfrac{10-4}{3} = 2$ м/с$^2$.

Разность координат $\Delta x$ движущегося тела в момент времени $t$ (например, 3 с) (см. рис. 1.25) численно равна площади трапеции $OABD$, состоящей из прямоугольника $OACD$ и прямоугольного треугольника $ABC$. Площадь прямоугольника $OA \cdot OD = v_0 t$; площадь треугольника $ABC$: $\dfrac{BC \cdot AC}{2} = \dfrac{at \cdot t}{2} = \dfrac{at^2}{2}$.

Таким образом, площадь трапеции, или $\Delta x$, составит

$$\Delta x = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Учитывая, что $\Delta x = x - x_0$, получим

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \qquad (1.25)$$

Формула (125) выражает ***закон равноускоренного прямолинейного движения.***

Путь $S$ при равноускоренном прямолинейном движении равен разности координат $S = \Delta x = x - x_0$ и поэтому, как следует из (1.25), определяется по формуле

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \qquad (1.26)$$

Иногда при решении задач требуется выразить путь через начальную и конечную скорости, исключив из рассмотрения время. Для этого выразим $t$ из уравнения $x = v_0 + at$:

$$t = \frac{v - v_0}{a}$$

и подставим это выражение в уравнение (1.26):

$$S = v_0 \left(\frac{v - v_0}{a}\right) + \frac{a}{2}\left(\frac{v - v_0}{a}\right)^2 = \frac{v^2 - v_0^2}{2a},$$

следовательно,

$$S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}. \qquad (1.27)$$

## 1.7. Равнозамедленное прямолинейное движение

**Ускорение.** ***Равнозамедленное прямолинейное движение*** — это движение, при котором ускорение постоянно по модулю и направлению и векторы скорости и ускорения противоположно направлены:

$$\mathbf{a} = \text{const}; \quad \mathbf{v} \uparrow\downarrow \mathbf{a} \Rightarrow |\mathbf{a}| < 0.$$

**1** При рассмотрении движения вдоль оси $X$ положительное направление оси $X$ да направление скорости совпадают. Векторное уравнение (1.19) в проекции на ось $X$ имеет вид

$$v = v_0 - at. \qquad (1.28)$$

Скорость тела при равнозамедленном прямолинейном движении с течением времени линейно уменьшается до полной остановки тела ($v = 0$). Из уравнения (1.28) можно определить время движения $0 = v_0 - at$, откуда $t = \frac{v_0}{a}$.

Итак, при равнозамедленном прямолинейном движении скорость тела в начальный момент времени ($t$ — 0) равна начальной скорости $v = v_0$, а в момент времени $t = \frac{v_0}{a}$: $v = 0$.

**Закон равнозамедленного прямолинейного движения.** Графиком зависимости скорости от времени (1.28) является прямая, проходящая через точки с координатами $(0, v_0)$ и $\left(\frac{v_0}{a}, 0\right)$. На рис. 1.26 изображен график равнозамедленного прямолинейного движения: начальная скорость $v_0$ = 10 м/с; время движения $t = \frac{v_0}{a} = 5$ с; модуль ускорения $a = \frac{v_0}{t} = \frac{10}{5} = 2$ м/с$^2$

По данному графику можно определить разность координат, или путь, который пройдет тело до остановки. Для этого определим площадь прямоугольного треугольника ***OAB:***

$$S = \frac{OA \cdot OB}{2};\ OA = v_0;\ OB = \frac{v_0}{a},\ \text{тогда}\ S = \frac{v_0^2}{2a}. \qquad (1.29)$$

Следовательно,

$$S = \frac{(10\ \text{м/с})^2}{2 \cdot 2\ \text{м/с}^2} = 25\ \text{м}.$$

На рис. 1.27 изображены графики прямолинейного равнозамедленного движения тел с различными ускорениями, откуда видно, что тела, имеющие одну и ту же начальную скорость, будут двигаться до остановки разное время. Чем боль-

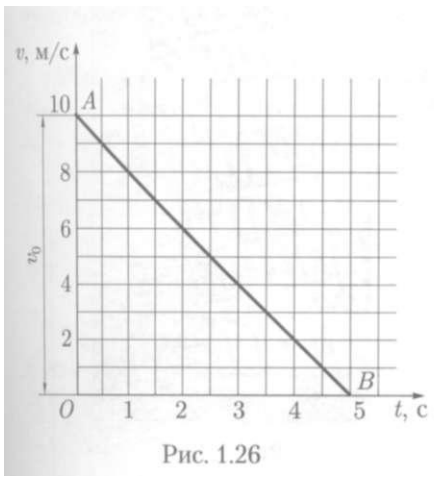


Рис. 1.26

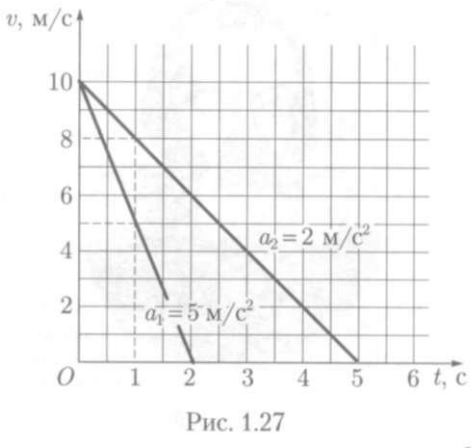


Рис. 1.27

ше модуль ускорения при равнозамедленном движении, тем быстрее изменится скорость и тем раньше тело остановится. Через 1 с после начала движения у первого тела будет скорость 5 м/с, а у второго — 8 м/с. Первое тело остановится через 2 с, а второе — через 5 с.

Закон прямолинейного равнозамедленного движения можно получить из выражения (1.25), учитывая, что при этом движении ускорение отрицательное:

$$x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}. \qquad (1.30)$$

Путь, проходимый телом при равнозамедленном движении, будет равен

$$S = v_0 t - \frac{at^2}{2}. \qquad (1.31)$$

## 1.8. Свободное падение

**Опыты Галилея.** Изучение свободного падения тел выдающимся итальянским физиком и астрономом, одним из основателей точного естествознания Г. Галилеем явилось началом физики как экспериментальной науки, он первый обратился к физическому опыту и дал ему правильные математические описания.

При падении любого тела на Землю из состояния покоя его скорость увеличивается, т.е. тело движется ускоренно. Наблюдая за падением различных тел (например, пера и камня), можно сделать вывод, что чем легче тело, тем меньше его ускорение. Действительно перо падает в воздухе гораздо медленнее, чем ка-



Г. Галилей

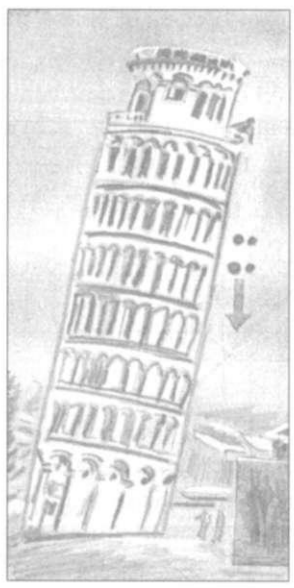


Рис. 1.28

мень. Но Галилей выдвинул гипотезу о том, что свободно падающие тела (или скатывающиеся по наклонной плоскости) будут получать равные приращения скорости в равные промежутки времени, т. е. двигаться с постоянным для всех тел ускорением. Другими словами, если бы не было сопротивления воздуха, то все тела на Землю падали бы одинаково. ***Свободное падение*** — это движение тел в безвоздушном пространстве.

Для проверки своего предложения Галилей провел серию опытов, самыми известными из которых были опыты по наблюдению падения шаров со знаменитой Пизанской башни (рис. 1.28). Сброшенные с наклонной башни чугунный и деревянный шары одинакового диаметра упали на Землю почти одновременно. Ученый объяснил различие во времени падения шаров сопротивлением воздуха. Затем он продолжил опыты в лабораторных условиях, по наклонному желобу. Поскольку при проведении опытов для измерения малых интервалов времени требовались часы, он изобрел водяные часы, точность измерений которых равнялась 0,1с. Изучая движение шаров из дерева и слоновой кости по наклонному желобу, угол наклона которого можно было изменять, ученый установил, что расстояние, проходимое шаром по желобу, пропорционально квадрату времени движения $\sim t^2$. Более того, он показал, что это справедливо для всех углов наклона желоба, для которых он смог выполнить измерения, следовательно, и для угла 90°. На основании опытов он сделал вывод: свободно падающее тело подчиняется закону $x \sim t^2$. При изучении и описании этих опытов Галилей вводит в физику новое понятие — *ускорение*.

Впоследствии, после создания вакуумных насосов, опыты Галилея были многократно повторены. Чтобы исключить действие силы сопротивления воздуха из стеклянной трубки, в которую помещали различные предметы, откачивали воздух. Тогда предметы, находящиеся в ней, например пушинка и дробинка, падали в одном темпе, т. е. синхронно. Современная техника позволяет проверить гипотезу Галилея с большой точностью, используя, например, стробоскопическое[1] освещение.

Из рис. 1.29 (шкала дана в см) видно, что два шарика различной массы падают синхронно. Эта стробоскопическая фотография получена при открытом затворе камеры и периодически повторяющихся вспышках света с временным интервалом 1/40 с.

Из измерений, сделанных с помощью такой аппаратуры, следует, что тела падают с ускорением 980 см/с$^2$.

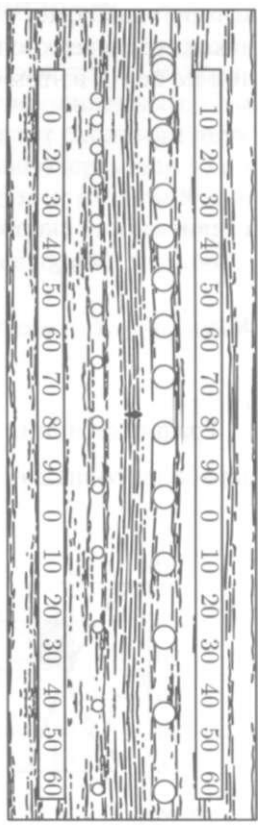


Рис. 1.29

***Ускорение свободного падения*** (g) — это ускорение, с которым падают все тела на Землю независимо от их массы в отсутствие сил сопротивления воздуха.

При свободном падении тела с небольшой высоты $h$ от поверхности Земли ($h \ll R_\oplus$, где $R_\oplus$ — радиус Земли) оно движется с постоянным ускорением $|g| = 9{,}8$ м/с$^2$, направленным вертикально вниз.

[1] *Стробоскопический эффект* — **зрительная иллюзия, возникающая в случае, если наблюдение какого-либо предмета осуществляется не непрерывно, а в течение отдельных малых, периодически следующих друг за другом интервалов времени (отдельные кадры). На этом эффекте основано восприятие движения в кинематографе и на телевидении.**

Ускорение свободного падения зависит от широты местности $\varphi$ и высоты над уровнем моря. На широте Москвы $(\varphi = 56°)$ $g = 9{,}82$ м/с$^2$. При решении задач, для простоты вычислений, иногда считают, что $g = 10$ м/с$^2$.

**Свободное падение.** Свободное падение тела с высоты *h* аналогично равноускоренному движению, происходящему вдоль оси У, положительное направление которой совпадает с направлением вектора g. Учитывая, что $\mathbf{g} = \text{const}$, уравнение движения будет иметь вид [см.выражение (1.25)]

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}. \qquad (1.32)$$

Скорость свободно падающего тела будет изменяться по закону [см. формулу (1.19)]

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{g}t. \qquad (1.33)$$

Если в момент времени $t_0 = 0$ направления векторов $\mathbf{v}_0$ и g совпадали, то в проекции на ось *Y*

$$v_y = v_{0y} + gt. \qquad (1.34)$$

Свободное падение без начальной скорости $(v_{0y} = 0)$ аналогично равноускоренному движению, происходящему вдоль оси У, положительное направление которой совпадает с направлением вектора g, а начало отсчета *O* $(t_0 = 0;\ y_0 = 0)$ находится в верхней точке траектории свободно падающего тела. Закон движения по оси У в этом случае имеет вид

$$y = \frac{gt^2}{2}, \qquad (1.35)$$

а зависимость скорости движения тела по оси У от времени

$$\mathbf{v} = \mathbf{g}t, \qquad (1.36)$$

или

$$v_y = gt. \qquad (1.37)$$

I ...ется частью пар... сь пар... инат (для прост... —

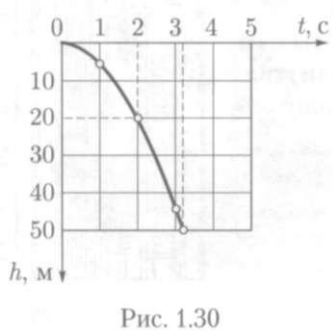


Рис. 1.30

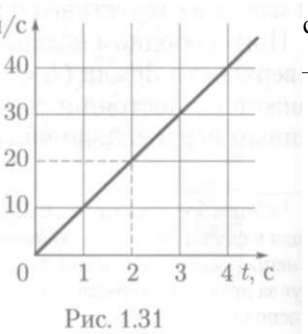


Рис. 1.31

= 10 м/с$^2$). По графику можно определить время падения тела с определенной высоты (рис. 1.30). Например, если тело падает с высоты 20 м, то время падения тела на Землю $t \approx 2$ с.

Время падения тела на Землю с высоты $h$ можно определить, если в формулу (1.35) подставить $y = h$:

$$h = \frac{gt^2}{2}, \tag{1.38}$$

откуда

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \tag{1.39}$$

Графиком функции $v_y = gt$ является прямая, проходящая через начало координат (рис. 1.31). Для свободного падения с определенной высоты $h$ физический смысл имеет лишь отрезок прямой в интервале времени от $t_0 = 0$ до $t = t_п$, где $t_п$ — время падения тела на Землю. В рассмотренном случае ($h$ — 20 м) тело через 2 с упадет на Землю со скоростью 20 м/с (см. рис. 1.30 и 1.31).

## 1.9. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

**Траектория движения.** Если телу сообщить начальную скорость $v_0$, направленную под углом $\alpha$ к горизонту, то его движение будет криволинейным. Это движение можно рассматривать в плоскости $XOY$ как результат сложения двух прямолинейных движений — равномерного вдоль оси $X$ и равнопеременного по оси $Y$ с ускорением $g$ (рис. 1.32). Подобные траектории имеют артиллерийские снаряды, футбольные мячи, летящие копья.

Если пренебречь силами сопротивления воздуха, то траекторией движения тела является парабола.

В выбранной системе отсчета для начального момента времени $t_0 = 0$, закон равномерного движения вдоль оси $X$ имеет вид:

$$x = x_0 + v_{x0}t. \tag{1.40}$$

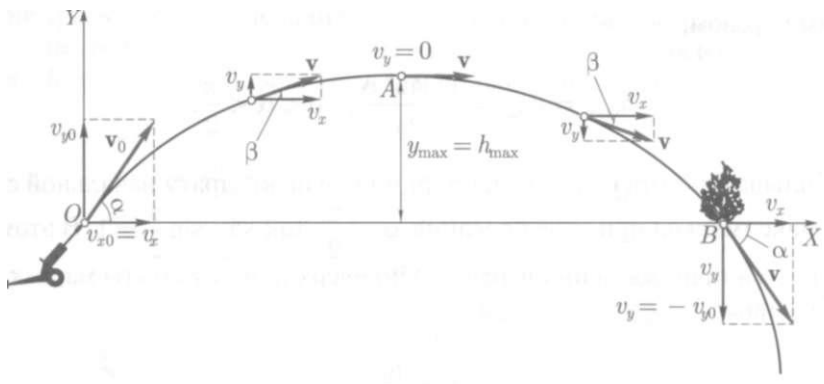



Рис. 1.32

С учетом начальных условий: $x_0 = 0$; $v_{x0} = v_0 \cos\alpha$ (см. рис. 1.32)

$$x_0 = (v_0 \cos\alpha)t. \tag{1.41}$$

Закон равнопеременного движения вдоль оси $Y$ имеет вид

$$y = y_0 + v_{y0}t - \frac{gt^2}{2}, \tag{1.42}$$

или с учетом начальных условий ($y_0 = 0$; $v_{y0} = v_0 \sin\alpha$) (см. рис. 1.32)

$$y = (v_0 \sin\alpha)t - \frac{gt^2}{2}. \tag{1.43}$$

**Наибольшая высота подъема.** Наибольшую высоту подъема $h_{\max} = y_{\max}$ можно определить из уравнения (1.43), если будет известно время движения тела от точки $O$ до точки $A$, т.е. время подъема.

При движении тела от точки $O$ до точки $A$ скорость тела изменяется. Движение вдоль оси $Y$ будет равнозамедленным $v_y = v_0 \sin\alpha - gt$. В наивысшей точке подъема вектор скорости $\mathbf{v}$ параллелен оси $X$ (см. рис. 1.32), поэтому проекция $\mathbf{v}$ на ось $Y$ равна нулю: $v_0 \sin\alpha - gt_{\text{под}} = 0$.

Следовательно, время подъема равно

$$t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}. \tag{1.44}$$

Подставив найденное время подъема в уравнение (1.43), получим

$$y_{\max} = v_0 \sin\alpha \frac{v_0 \sin\alpha}{g} - \frac{g}{2}\left(\frac{v_0 \sin\alpha}{g}\right)^2,$$

или

$$y_{max} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}.$$

Таким образом,

$$h_{\max} = y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}, \quad 0 < \alpha < \frac{\pi}{2}. \tag{1.45}$$

Наибольшая высота подъема пропорциональна квадрату начальной скорости и будет максимальна при угле бросания $\alpha = \frac{\pi}{2}$, так как $\sin\frac{\pi}{2} = 1$. В этом случае тело движется прямолинейно вертикально вверх и высота подъема, как следует из (1.45), равна

$$h = \frac{v_0^2}{2g}. \tag{1.46}$$

**Дальность полета.** Дальность полета определяется координатой точки падения тела на поверхность Земли, т. е. координатой точки *B* (см. рис. 1.32).

Координату точки *B* найдем из уравнения (1.41), подставив в него время полета тела от точки *O* до точки *B*.

Так как парабола симметрична относительно вершины (точки ***A),*** то время подъема равно времени падения, т. е. время полета $t$ равно удвоенному времени подъема $t_{под}$:

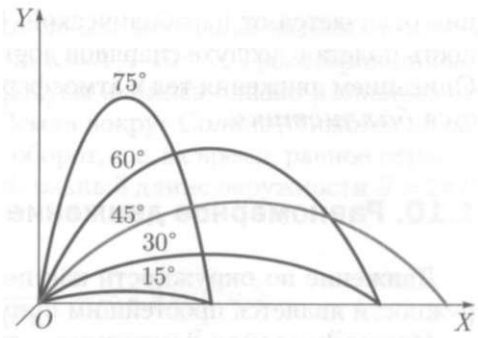


Рис. 1.33

$$t = 2t_{под} = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}. \qquad (1.47)$$

Подставив формулу (1.47) в уравнение (1.41), имеем:

$$x_{max} = v_0 \cos\alpha \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}.$$

Учитывая, что $2\sin\alpha\cos\alpha = \sin 2\alpha$, получим

$$x_{max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}. \qquad (1.48)$$

Как следует из формулы (1.48), дальность полета при данной начальной скорости $v_0$ будет наибольшей, когда $\sin 2\alpha = 1$, т. е. $2\alpha = \frac{\pi}{2}$, или $\alpha = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$ (рис. 1.33).

Если сопротивлением воздуха пренебречь, то максимальная дальность полета тела будет при угле бросания 45° к горизонту.

Реальное движение тел в воздухе происходит по траектории, отличающейся от параболической, тело движется по баллистической (от греч. *hallo* — бросаю) кривой. Эта кривая в своей восходящей ветви круче параболы. На рис. 1.34 представлены траектории движения: идеальная (в вакууме) и реальная (в воздухе). Изменение траектории происходит потому, что на движущееся тело действует сопротивление воздуха, которое зависит как от формы тела, так и от скорости его движения. Чем больше скорость тела, тем сильнее реальная траектория движе-

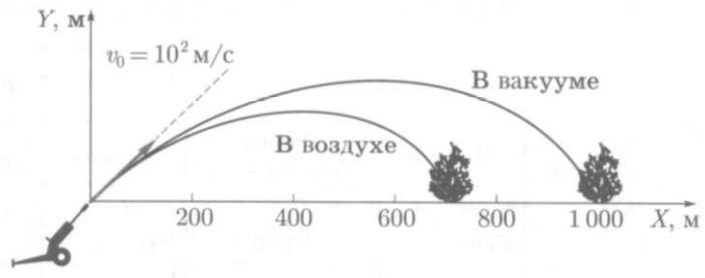


Рис. 1.34





ния отличается от параболической. Как следует из опытов, наибольшая дальность полета в воздухе снарядов достигается при углах несколько меньших 45°. Описанием движения тел в атмосфере с учетом сопротивления воздуха занимается ***баллистика.***

## 1.10. Равномерное движение по окружности

**Движение по окружности как периодическое движение.** Движение по окружности является простейшим примером периодического движения.

***Периодическое движение*** — это движение, повторяющееся через определенный промежуток времени.

Например, вращение Земли вокруг собственной оси, вращение Земли вокруг Солнца. Характеристикой периодического движения является период (Г).

***Период*** — минимальный промежуток времени, через который движение повторяется, т. е. время одного оборота.

Единица периода — секунда (с).

Зная период вращения, можно определить частоту вращения (у).

***Частота вращения*** — величина, показывающая число оборотов в единицу времени:

$$\nu = \frac{1}{T}. \tag{1.49}$$

Единица частоты — секунда в минус первой степени ($с^{-1}$).

$1\ с^{-1}$ равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один полный оборот.

Период вращения Земли вокруг собственной оси равен 1 сут, т.е. 24 ч. Г = = 1 сут = **8**,64-10$^4$ с. Вследствие того что Земля вращается вокруг собственной оси, происходит смена времени суток. Вокруг собственной оси вращаются также Луна, Солнце и планеты.

Период вращения Земли вокруг Солнца составляет 1 год, т. е. $T = 3{,}16 \cdot 10^7$ с. Вследствие того что Земля вращается вокруг Солнца, происходит смена времени года.

В табл. 1.2 даны периоды обращения планет Солнечной системы вокруг Солнца.

**Линейная скорость.** Скорость движения тела по окружности называют ***линейной скоростью.*** Определим линейную скорость Земли.

Землю, движущуюся вокруг Солнца, можно рассматривать как материальную точку, так как радиус Земли $R_\oplus = 6{,}4 \cdot 10^6$ м много меньше среднего расстояния

Таблица 1.2

| Планета | Период обращения, год | Планета | Период обращения, год | Планета | Период обращения, год |
|---|---|---|---|---|---|
| Меркурий | 0,24 | Марс | 1,88 | Уран | 84,02 |
| Венера | 0,615 | Юпитер | 11,86 | Нептун | 164,79 |
| Земля | 1 | Сатурн | 29,46 | Плутон | 247,70 |

от Земли до Солнца. Среднее расстояние от Земли до Солнца называют *одной астрономической единицей* (1 а. е.), 1 а. е. = 1,5-$10^{11}$ м. Траектория движения Земли вокруг Солнца — эллипс, но фокусы эллипса близко расположены друг к другу, поэтому можно считать, что Земля вокруг Солнца движется по окружности радиуса $R$ = 1,5• $10^{11}$ м. За один оборот, т.е. за время, равное периоду $T$= 1 год = 3,16 • $10^7$ с, Земля проходит путь, равный длине окружности $S = 2\pi R$, двигаясь с линейной скоростью $v$:

$$v = \frac{S}{T} = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{11}\text{м}}{3{,}16 \cdot 10^7\text{с}} \approx 2{,}9 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

Угол поворота. При движении точки по окружности радиус r является величиной постоянной r =const. Проведем координатную ось $X$ через центр окружности $O$, вдоль которой движется точка (рис. 1.35). Центр окружности $O$ — начало координат. Положение точки $A$ на окружности в любой момент времени однозначно определяется углом $\Delta\varphi$ между положительным направлением оси $X$ и радиусом-вектором **r,** проведенным из начала координат к движущейся точке. Угол $\Delta\varphi$ отсчитывается от положительного направления оси $X$ до радиуса-вектора **r** против часовой стрелки. Углы выражают в радианах. Угол 360° соответствует $2\pi$ радиан.

При повороте радиуса-вектора **r** на угол $\varphi = 2\pi$ точка проходит путь $S$, равный длине окружности $S = 2\pi r$; при повороте радиуса-вектора **r** на угол $\Delta\varphi$ точка проходит путь, равный длине дуги $\Delta S$. Из пропорции $2\pi : 2\pi r = \Delta\varphi : \Delta S$; определим $\Delta S$:

$$\Delta S = \frac{2\pi r \Delta\varphi}{2\pi} = r\Delta\varphi,$$

т.е.

$$S = r\Delta\varphi,\ 0 \leqslant \Delta\varphi \leqslant 2\pi. \tag{1.50}$$

***Линейный путь*** $\Delta S$ равен произведению модуля радиуса-вектора |**r**| точки на его угол поворота $\Delta\varphi$.

Равномерное движение точки по окружности. ***Равномерное движение по окружности*** — движение, при котором точка движется с постоянной по модулю линейной скоростью:

$$|\mathbf{v}| = \text{const}.$$

При равномерном движении по окружности за равные промежутки времени:

• точка проходит равные по длине дуги окружности;

• радиус-вектор точки поворачивается на равные углы.

Быстроту поворота радиуса-вектора движущейся по окружности точки характеризует угловая скорость. Угловую скорость обозначают греческой буквой $\omega$ (омега).

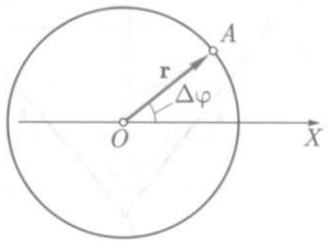


Рис. 1.35

***Угловая скорость*** — физическая величина, равная отношению угла поворота радиуса-вектора $\Delta\varphi$ к промежутку времени $\Delta t$, за который этот поворот произошел:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \tag{1.51}$$

откуда

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t. \tag{1.52}$$

Единица угловой скорости — радиан в секунду (рад/с).

1 рад/с равен угловой скорости равномерно вращающейся точки, радиус-вектор которой за время 1 с поворачивается на угол 1 радиан.

Угловую скорость можно выразить через период обращения $T$. За время, равное периоду ($\Delta t = T$), радиус-вектор точки поворачивается на угол $2\pi$ ($\Delta\varphi = 2\pi$):

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \tag{1.53}$$

Используя соотношения (1.49) и (1.52), выразим угловую скорость через частоту вращения:

$$\omega = 2\pi\nu. \tag{1.54}$$

Между модулем линейной скорости точки, обращающейся по окружности, и ее угловой скоростью имеется связь. За промежуток времени $\Delta t$ точка проходит путь $\Delta S = v\Delta t$, а радиус-вектор поворачивается на угол $\Delta\varphi = \omega\Delta t$. Учитывая, что $S = r\Delta\varphi$, имеем

$$v\Delta t = r\omega\Delta t,$$

или

$$v = \omega r. \tag{1.55}$$

Модуль линейной скорости точки, движущейся по окружности, равен произведению угловой скорости на радиус окружности. Из формулы (1.55) следует, *чем больше радиус окружности, тем больше линейная скорость.* При вращении Земли вокруг собственной оси максимальная линейная скорость у тел, расположенных на экваторе, минимальная и равна нулю на полюсах; угловая скорость при этом одинакова.

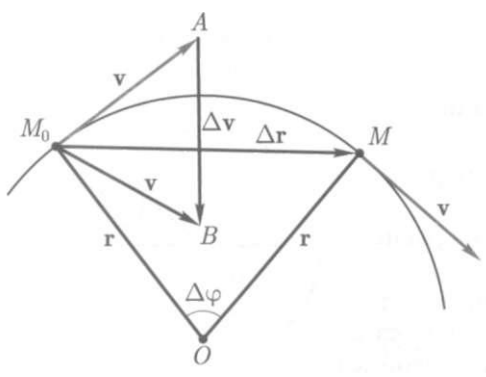



Рис. 1.36

**Центростремительное ускорение,** При равномерном вращении материальной точки по окружности модуль ее линейной скорости постоянный, следовательно, тангенциальное, или касательное, ускорение равно нулю: $\mathbf{a}_\tau = 0$. Изменение вектора скорости v по направлению характеризует нормальное, или центростремительное, ускорение $\mathbf{a}_n$.

Вектор скорости v в любой точке окружности направлен по касательной к ней. Рассмотрим положение движущейся материальной точки в двух точках на

окружности $M_0$ и Мв близкие моменты времени $t$ и $t+\Delta t$ (рис. 1.36). За промежуток времени $\Delta t$ радиус-вектор повернется на угол $\Delta\varphi$, материальная точка переместится на $\Delta r$, скорость изменится на $\Delta\mathbf{v}$. Модуль изменения скорости $|\Delta\mathbf{v}|$ равен стороне $AB$ треугольника $M_0AB$, построенного на векторах скоростей, как на сторонах. Равнобедренные треугольники $M_0OM$ и $M_0AB$ подобны, так как $\angle M_0OM = \angle AM_0B = \Delta\varphi$ как углы со взаимно-перпендикулярными сторонами. Из подобия треугольников следует, что

$$\frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{v}{r},$$

откуда

$$\Delta v = \frac{v}{r}\Delta r.$$

По определению, мгновенное ускорение рав

Учитывая выражение, полученное для $\Delta v$, и

$$a_n = \frac{v}{r}\frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

Учитывая, что $\frac{\Delta r}{\Delta t} = v$, получим

$$a_n = \frac{v^2}{r}. \qquad (1.56)$$

Вектор $\mathbf{a}_n$ направлен, как и вектор $\Delta\mathbf{v}$, по радиусу к центру окружности $O$, так как при $\Delta t \to 0$, $\Delta\varphi \to 0$ и $\angle M_0AB = \angle M_0BA = \frac{\pi - \Delta\varphi}{2} \to \frac{\pi}{2}$. Таким образом,

**при равномерном движении материальной точки по окружности ее ускорение направлено перпендикулярно скорости, по радиусу к центру окружности, поэтому его называют нормальным, или центростремительным.**

Учитывая связь между линейной и угловой скоростью (1.55) и формулу (1.56), получим

$$a_n = \omega^2 r. \qquad (1.57)$$

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

- *Кинематика* — раздел механики, изучающий движение тел без учета причин его вызывающих.
- *Механическое движение* — изменение взаимного положения тел или их частей в пространстве с течением времени.
- *Система отсчета* — совокупность тела отсчета, связанная с ним система координат и синхронизированные между собой часы.
- *Материальная точка* — тело, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

● *Абсолютно твердое тело* — система материальных точек, расстояние между ко торыми не изменяется при движении.

● *Положение движущейся точки* (тела) обычно рассматривается в декартовой (прямоугольной) системе координат. В данный момент времени оно определяется тремя пространственными координатами ($x$, $y$, $z$) или радиусом-вектором $\mathbf{r}$, проведенным из на чала системы координат до точки $A$.

● *Траектория* — линия, описываемая в пространстве движущейся материальной точ кой (телом).

● *Длина пути* $S$ — скалярная величина, равная сумме длин всех участков траекто рий, пройденных материальной точкой за рассматриваемый промежуток времени.

● *Перемещение* $\Delta\mathbf{r}$ — вектор, проведенный из начального положения движущейся материальной точки в конечное положение.

● *Поступательное движение* — движение, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, остается при движении параллельной самой себе.

● *Прямолинейное движение* — движение, траектория которого в данной системе отсчета является прямой линией ($|\Delta\mathbf{r}| = S$).

● *Средняя скорость* $v_S$ — скалярная величина, равная отношению длины участка траектории $\Delta S$ ко времени $\Delta t$, за которое пройден этот участок ( $v_S = \dfrac{\Delta S}{\Delta t}$ ).

● *Мгновенная скорость* $\mathbf{v}$ — скорость тела в данный момент времени ($\Delta t \to 0$). Вектор мгновенной скорости всегда направлен по касательной к траектории движения.

● *Равномерное движение* — движение, при котором скорость $v$ остается постоянной по модулю и направлению ($\mathbf{v} = \text{const}$; $x = x_0 + vt$; $S = vt$).

● *Ускорение* $\mathbf{a}$ — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости материальной точки ($\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$) к длительности промежутка времени ($\Delta t = t - t_0$), в течение которого это изменение произошло ( $\mathbf{a} = \dfrac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}$ ).

● *Равнопеременное движение* — движение с постоянным ускорением ($\mathbf{a} = \text{const}$; $x = x_0 + v_0 t \pm \dfrac{at^2}{2}$; $S = v_0 t \pm \dfrac{at^2}{2}$; $v = v_0 \pm at$):

○ $a > 0$ — движение равноускоренное;

○ $a < 0$ — движение равнозамедленное.

Свободное падение тела с высоты $h$ с ускорением $\mathbf{g}$ (ускорение свободного падения) — частный случай равноускоренного прямолинейного движения: $v = v_0 \pm gt$; $h = v_0 t \pm \dfrac{gt^2}{2}$.

● *Ускорение свободного падения* $\mathbf{g}$ — ускорение, с которым падают все тела на Землю независимо от их массы в отсутствие сил сопротивления воздуха.

● *Движение тела, брошенного под углом к горизонту*:

○ наибольшая высота подъема $h_{\max} = y_{\max} = \dfrac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$;

○ дальность полета $x_{\max} = \dfrac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

● *Период обращения* $T$ — время одного полного поворота тела вокруг оси вращения.

● *Частота* $\nu$ — число оборотов, совершаемых телом за единицу времени ( $\nu = \dfrac{1}{T}$ ).

● *Угловое перемещение* $\Delta\varphi$ — угол поворота радиуса-вектора $\mathbf{r}$ за время $\Delta t$.

Точки, находящиеся на разном расстоянии $r$ от оси вращения, за равные промежутки времени проходят разные пути ($\Delta S = r\Delta\varphi$).

● *Угловая скорость* $\omega$ — физическая величина, равная отношению угла поворота радиуса-вектора $\Delta\varphi$ к промежутку времени $\Delta t$, за который этот поворот произошел ( $\omega = \dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ ).

● *Вращательное движение* — равномерное, если $\omega = \text{const}$ ( $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ ).

• *Тангенциальное ускорение* $\mathbf{a}_\tau$ определяет быстроту изменения модуля скорости (направлено по касательной к траектории движения).

• *Нормальное ускорение* $\mathbf{a}_n$ характеризует изменение скорости по направлению (направлено по нормали к траектории к центру ее кривизны). Модуль нормального ускорения зависит от скорости точки $v$ и радиуса кривизны траектории $r$ ( $a_n = \frac{v^2}{r}$ ).

• *Связь линейных и угловых характеристик* вращательного движения:

$$\Delta S = r\Delta\varphi;\ v = r\omega.$$

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Какое движение называется механическим? **2.** Какое тело можно считать материальной точкой? **3.** Чем различаются понятия «система отсчета» и «система координат»? *L* Что такое траектория движения? **5.** Что такое вектор перемещения? **6.** Что характеризует скорость движения тела? **7.** Как направлен вектор мгновенной скорости? **8.** Какое движение называют равномерным прямолинейным? **9.** Что характеризует ускорение? **10.** Что характеризуют тангенциальное и нормальное ускорения? Как они направлены? **11.** Какое прямолинейное движение называют равноускоренным; равнозамедленным? **12.** Дайте определение ускорения свободного падения. **13.** Чем отличается падение тел в воздухе от падения в вакууме? **14.** По какой траектории движется тело, брошенное под углом к горизонту? **15.** Как влияет сила сопротивления воздуха на дальность полета снарядов? **16.** Что такое период движения? **17.** Дайте определение угловой скорости. **18.** Почему равномерное движение по окружности является ускоренным? **19.** Чему равно центростремительное ускорение и куда оно направлено? **20.** Какая связь существует между линейной и угловой скоростями?

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** Из пунктов *O* и *A,* расстояние между которыми 240 м, одновременно начали двигаться навстречу друг другу два тела. Первое тело двигалось с постоянной скоростью 20 м/с, второе — с постоянной скоростью 40 м/с. Через какой промежуток времени и на каком расстоянии от пункта *O* эти тела встретятся? Задачу решить графическим способом.

**Дано:** $v_1$ = 20 м/с; % = 0 м; $v_2$ = 40 м/с; $s_{02}$ = 240 м.

**Найти:** *t, x.*

**Решение.** 1. Совместим начало координат с пунктом *O,* тогда $x_{01} = 0; x_{02}$ = 240 м.

2. Координаты тел изменяются по законам: $x_1 = v_1 t,\ x_2 = x_{02} - v_2 t.$

3. Построим графики зависимостей координат тел от времени (рис. 1.37).

4. Точка пересечения графиков *B* имеет координаты: *x* — 80 м; *t* = 4 с.

**Ответ:** *t* = 4 с; *x* = 80 м.

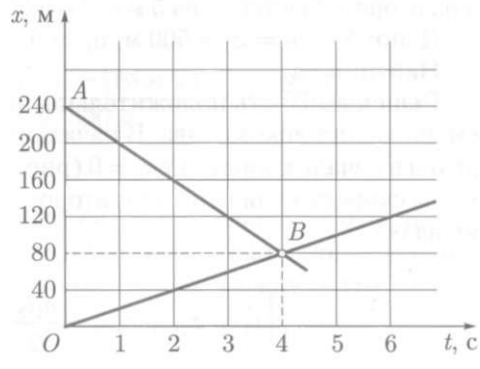


Рис. 1.37

• **Задача 2.** Кабина лифта, поднимаясь равноускоренно вверх, в течение 2 с достигает скорости 5 м/с, с которой продолжает подъем в течение 3 с. За последующие 4 с равнозамедленного движения кабина лифта останавливается. Оп-

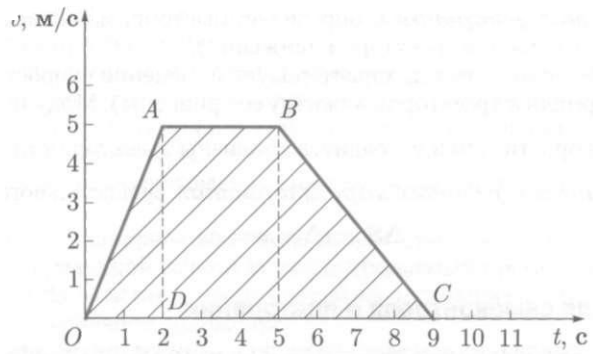


Рис. 1.38

ределите высоту подъема кабины лифта. Задачу решите графическим способом.

**Дано:** $v_0 = 0$; $t_1 = 2$ с; $v_1 = 5$ м/с; $t_2 = 3$ с; $v_2 = 5$ м/с; $t_3 = 4$ с; $v_3 = 0$.

**Найти: Н**.

**Решение.** Построим график скорости движения кабины лифта (рис. 1.38). Высота подъема кабины лифта численно равна площади трапеции *OABC:*

$$OC = t_1 + t_2 + t_3,\ AB = t_2,\ AD = v_1 = v_2.$$

Тогда

$$H = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_2}{2} v_1 = \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{2} v_1.$$

**Вычисления:**

$$H = \frac{2\text{ с} + 2 \cdot 3\text{ с} + 4\text{ с}}{2} 5\text{ м/с} = 30\text{ м}.$$

**Ответ: Н** = 30 м.

• **Задача 3.** Трогаясь с места, локомотив двигается прямолинейно и проходит первый участок пути 500 м с ускорением $a_1$, а следующий участок пути 500 м с ускорением $a^{\wedge}$. При этом на первом участке пути его скорость возрастает на 10 м/с, а на втором участке — на 5 м/с. Что больше — $a_1$ или $a_2$?

**Дано:** $S = S_1 = S_2 = 500$ м; $v_{01} = 0 v_1 = 10$ м / с $v_2 = 15$ м/с.

**Найти:** $a_1$; $a_2$.

**Решение.** Пусть положительное направление оси *X* совпадает с направлением движения локомотива. В начальный момент времени $t_0 = 0$, локомотив находится в начале координат $x_0 = 0$ (рис. 1.39). Запишем уравнения движения и формулы скорости для первого и второго участков движения локомотива в проекциях на ось *X:*

$$\text{I}\begin{cases} x_1 = x_{01} + v_{01}t_1 + \dfrac{a_1 t_1^2}{2}; \\ v_1 = v_{01} + a_1 t_1. \end{cases} \qquad \text{II}\begin{cases} x_2 = x_{02} + v_{02}t_2 + \dfrac{a_2 t_2^2}{2}; \\ v_2 = v_{02} + a_2 t_2^2. \end{cases}$$

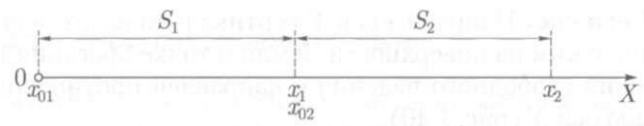



Рис. 1.39

Учитывая, что $x_{01} = 0$; $x_1 - x_{01} = S$; $v_{01} = 0$, первая система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} S = \dfrac{a_1 t_1^2}{2}; & (1) \\ v_1 = a_1 t_1. & (2) \end{cases}$$

Учитывая, ч $x_{02} = x_1$; $x_2 - x_1 = S$; $v_{02} = v_1$, я система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} S = v_1 t_2 + \dfrac{a_2 t_2^2}{2}; & (3) \\ v_2 = v_1 + a_2 t_2. & (4) \end{cases}$$

Чтобы определить $a_1$, выразим $t_1$ из уравнения (2) и подставим в уравнение (1):

$$t_1 = \frac{v_1}{a_1}; \quad S = \frac{a_1 v_1^2}{2a_1^2} = \frac{v_1^2}{2a_1},$$

откуда $a_1 = \dfrac{v_1^2}{2S}$.

Чтобы определить $a_2$, выразим $t_2$ из уравнения **(4)** и подставим в уравнение (3):

$$t_2 = \frac{v_2 - v_1}{a_2}; \quad S = \frac{v_1(v_2 - v_1)}{a_2} + \frac{a_2(v_2 - v_1)^2}{2a_2^2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_2},$$

откуда $a_2 = \dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2S}$.

**Вычисления:**

$$a_1 = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 500 \text{ м}} = 0{,}1 \text{ м/с}^2; \quad a_2 = \frac{(15 \text{ м/с})^2 - (10 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 500 \text{ м}} = 0{,}13 \text{ м/с}^2.$$

**Ответ:** $a_2 > a_1$.

• **Задача** 4. Два тела брошены вертикально вверх с одинаковой начальной скоростью $v_0$ = 20 м/с с интервалом времени 1 с. Определить скорость движения второго тела относительно первого. Чему равно расстояние между телами через 2 с после бросания первого тела.

**Дано:** $v_{y0} = 20$ м/с; $\Delta t = 1$ с; $t = 2$ с.

**Найти:** $v_y = v_{y2} - v_{y1}$; $S$.

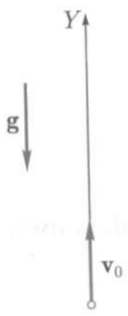


Рис. 1.40

**Решение.** Направим ось $Y$ вертикально вверх, начало координат расположим на поверхности Земли в точке бросания тел. Вектор ускорения свободного падения g направлен противоположно направлению оси У (рис. **1**.40).

**1.** Скорость движения тел изменяется по закону $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_0 + \mathbf{g}t$; $\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_0 + \mathbf{g}(t - \Delta t)$.

В проекциях на ось $Y$

$$\begin{cases} v_{y1} = v_{y0} - gt, \\ v_{y2} = v_{y0} - g(t - \Delta t); \end{cases}$$

$$v_y = v_{y2} - v_{y1} = v_{y0} - gt - v_{y0} + gt + g\Delta t = g\Delta t.$$

2. Уравнения движения тел в проекциях на ось $Y$ имеют вид:

$$\begin{cases} y_1 = v_{y0}t - \dfrac{gt^2}{2}; \\ y_2 = v_{y0}(t - \Delta t) - \dfrac{g(t - \Delta t)^2}{2}. \end{cases}$$

Расстояние между телами Нравно разности координат $S = y_1 - y_2 = \Delta y$.

$$S = v_{y0}t - \frac{gt^2}{2} - v_{y0}(t - \Delta t) + \frac{g(t - \Delta t)^2}{2} = v_{y0}\Delta t + \frac{g(\Delta t)^2}{2} - gt\Delta t$$

**Вычисления:**

$$v_y = 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с} = 9{,}8 \text{ м/с}^2;$$

$$S = 20 \text{ м/с} \cdot 1 \text{ с} + \frac{9{,}8 \text{ м/с}^2 (1 \text{ с})^2}{2} - 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с} \cdot 2 \text{ с} = 5{,}3 \text{ м}.$$

**Ответ:** $v_y = 9{,}8$ м/с; $S = 5{,}3$ м.

• **Задача** 5. Чему равна линейная и угловая скорости вращения точки поверхности Земли, находящейся на экваторе, полагая, что ось вращения Земли проходит через полюса. Земля делает один оборот вокруг своей оси за 24 ч.

**Дано:** $T = 24$ ч $= 8{,}64 \cdot 10^4$ с; $R_\oplus = 6{,}4 \cdot 10^6$ м.

**Найти:** $\omega$; $v$.

**Решение.** Полагая вращение Земли вокруг своей оси равномерным, определяем угловую скорость по формуле **(1**.53), а линейную — по формуле **(1**.55):

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad v = \omega R_\oplus.$$

**Вычисления:** $\omega = \dfrac{2 \cdot 3{,}14 \text{ рад}}{8{,}64 \cdot 10^4 \text{ с}} = 7{,}3 \cdot 10^{-5}$ рад/с; $v = 7{,}3 \cdot 10^{-5}$ рад/с $\cdot 6{,}4 \cdot 10^6$ м $= 467{,}2$ м/с.

**Ответ:** $\omega = 7{,}3 \cdot 10^{-5}$ рад/с; $v = 467{,}2$ м/с.

## Задачи для самостоятельного решения

**1.** На рис. 1.41 изображена траектория движения материальной точки. Определить, на каких участках траектории: а) движение прямолинейное, криволинейное; б) изменилось направление движение точки; в) модуль вектора перемещения равен пути; г) модуль вектора перемещения меньше пути; д) модуль вектора перемещения равен нулю.

**2.** Скорость распространения радиоволн (скорость света в вакууме) равна $3 \cdot 10^8$ м/с. Кто раньше услышит голос солиста, выступающего на концерте: слушатели, сидящие на расстоянии 60 м от него, или радиослушатели, находящиеся на расстоянии 6 000 м? Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.

**3.** Средняя путевая скорость движения Земли вокруг Солнца равна 30 км/с. Какое расстояние при этом проходит Земля за сутки; за год?

**4.** Пешеход за минуту делает 90 шагов. Определить среднюю скорость движения пешехода (в км/ч), считая длину шага равной 60 см.

**5.** Автомобиль прошел расстояние от А до В со средней скоростью 36 км/ч, а обратно со средней скоростью 54 км/ч. Какова средняя скорость автомобиля?

**6.** Кабина скоростного лифта поднимается равномерно со скоростью 3 м/с. Определить время, в течение которого кабина лифта без остановки будет подниматься до высоты 50 м (15 этаж). Задачу решить графически.

7. Два автомобиля движутся навстречу друг другу — один ускоренно на восток, другой замедленно на запад. Как направлены ускорения автомобилей?

**8.** Тело движется вдоль оси равноускоренно с начальной скоростью $v_0$. В конце четвертой секунды движения скорость тела $v = 3v_0$. За это время тело прошло путь 32 м. Определить ускорение тела.

9. Вдоль оси Х из одной точки одновременно начинают двигаться два тела. Первое тело движется равномерно со скоростью 20 м/с, второе — равноускоренно с ускорением 0,5 м/с$^2$, начальная скорость второго тела равна 0. Через какое время второе тело нагонит первое?

**10.** У верхнего конца трубки, расположенной вертикально, находятся дробинка и пробка. Какое из тел при одновременном старте первым достигнет нижнего конца трубки, если из нее откачен воздух?

И. Тело из состояния покоя свободно падает на Землю в течение 4 с. С какой высоты оно падает и какую скорость будет иметь в момент приземления?

**12.** Камень свободно падает в шахту с водой. Через 6 с слышен всплеск воды. Определить глубину шахты, если скорость звука 330 м/с.

**13.** Два тела свободно падают: одно — с высоты 20 м, а другое — с высоты 80 м. С какой скоростью приземлятся тела? Определить время падения.

**14.** С вертолета, находящегося на высоте 200 м, сброшен груз. Через какое время груз упадет на Землю, если вертолет:

а) неподвижен;

б) снижается со скоростью 4 м/с;

в) поднимается со скоростью 4 м/с?

**15.** Мальчик бросает мячи один за другим вверх, каждый следующий в тот момент, когда предыдущий находится в наивысшей точке. Сколько мячей в секунду бросает мальчик, если мячи поднимаются на высоту 1,23 м?

**16.** В какой точке траектории (см. рис. 1.32) летящее тело обладало наименьшей скоростью?

**17.** Под каким углом к горизонту брошено тело, если дальность полета в четыре раза больше максимальной высоты подъема? Сопротивлением воздуха пренебречь.

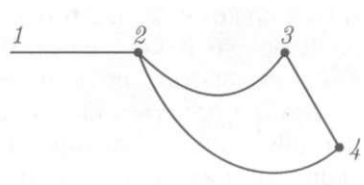


Рис. 1.41

**18.** Чему равна угловая скорость вращения точек ...оверхности на широте Санкт-Петербурга ($\varphi = 60°$)?

19. Определить линейную скорость точек, лежащих на земной поверхности на широте Москвы ($\varphi = 56°$).

20. Сколько оборотов в секунду делают колеса грузового автомобиля диаметром 1,5 м при скорости движения 72 км/ч.

21. К веревке длиной 0,5 м привязан камень. При вращении камня в вертикальной плоскости веревка обрывается в тот момент, когда скорость камня была направлена вертикально вверх. На какую высоту поднимется камень, если его вращали со скоростью $3\ с^{-1}$?

22. Период вращения искусственного спутника Земли равен 1,5 ч. Предполагая, что средняя высота его над поверхностью Земли 320 км, а орбита является круговой, определить линейную скорость и центростремительное ускорение спутника. Радиус Земли — 6 400 км.

**Ключевые слова:** *механическое движение, перемещение, путь, скорость, ускорение, свободное падение, центростремительное ускорение.*

Глава 2

# ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА

## 2.1. Первый закон Ньютона

**Движение и покой.** На первый взгляд, самым естественным состоянием тела является состояние покоя. В покое находятся камни-валуны, расположенные на обочине дороги, мебель в комнате, строения на поверхности Земли. Но все эти тела движутся вместе с Землей вокруг Солнца! Состояние движения свойственно планетам, звездам и звездным системам — галактикам, воде в реках, облакам, самолетам, автомобилям, молекулам и атомам.

Основной характеристикой движения является скорость. Может ли движущееся тело само по себе изменить скорость своего движения? Что является причиной изменения скорости движения тела? Ответ на эти вопросы очевиден, он следует из непосредственных наблюдений. Чтобы изменить скорость движения тела, необходимо воздействие на него других тел.

Во Вселенной практически невозможно найти тела, не испытывающие внешние воздействия. Но если внешние воздействия имеются, но они скомпенсированы (уравновешены), при решении некоторых задач тело может считаться свободным.

***Свободным телом*** называют тело, на которое не действуют другие тела (или поля).

Если тело является свободным, то скорость его движения не изменяется.

Например, стоящий в комнате шкаф никогда сам собой не начнет передвигаться по комнате. Если тело находится в покое, то его скорость постоянна и равна нулю, т. е. $v = 0 = \text{const}$. Чтобы изменить скорость покоящегося тела, необходимо воздействие на него других тел.

Самым простым видом движения тела является равномерное прямолинейное движение, при котором скорость — величина постоянная. В состоянии покоя скорость тоже величина постоянная и равна нулю. Следовательно, покой — *частный случай прямолинейного равномерного движения.*

**Первый закон Ньютона — закон инерции.** Наблюдения за движением тел и размышления о характере этих движений позволили И. Ньютону сформулировать знаменитые законы движения, которые он изложил в работе «Математические начала натуральной философии» (издана в 1687 г.). В основе данного труда лежат несколько не нуждающихся в доказательстве аксиом — законов (основных положений), представляющих собой обобщение многовекового опыта, итог сделанному за предшествующее тысячелетие в учении о простейших формах движения материи.

***Первый закон Ньютона:*** **любая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешние воздействия со стороны других тел не изменят этого состояния.**

Первый закон Ньютона выполняется в системах отсчета, которые называются *инерциалъными,* и устанавливает факт существования инерциальных систем отсчета.

*В инерциальных системах отсчета свободное тело движется прямолинейно и равномерно.*

Для описания механических движений на Земле инерциальную систему отсчета связывают с Землей — *геоцентрической системой отсчета.* Начало отсчета координат этой системы совмещают с центром Солнца, а координатные оси проводят в направлении неподвижных звезд.

Вопрос о том, является ли выбранная система отсчета инерциальной, решается на основании эксперимента. Если в пределах точности измерения в данной системе отсчета первый закон Ньютона выполняется, то она может считаться инерциальной. Более строго первый закон Ньютона выполняется в гелиоцентической системе отсчета.

*Равномерное прямолинейное движение свободного тела в инерциальной системе отсчета называют движением по инерции.* При движении по инерции скорость свободного тела не изменяется ни по модулю, ни по направлению,т.е. $\mathbf{v} = \text{const}$.

**Экспериментальные подтверждения закона инерции.** При резком торможении автобуса находящиеся в нем пассажиры наклоняются вперед, продолжая движение по инерции. Когда автобус резко трогается с места, пассажиры откидываются назад. По инерции слетает грязь с вращающихся колес автомобиля или велосипеда.



Из жизненного опыта каждый человек знает, как трудно бегущему человеку быстро остановиться, если не ухватиться руками за какое-нибудь неподвижное тело — столб, дерево, по инерции продолжает двигаться спринтер или лыжник, пробежав необходимую дистанцию. Иногда зайцу удается спастись от преследующего его волка или собаки, если он сможет сделать скачок в сторону. По инерции движется Луна вокруг Земли и планеты вокруг Солнца.

И. Ньютон

## 2.2. Сила

**Силы в механике.** На любое движущееся тело действуют внешние силы.

***Сила*** F — это векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей.

Это воздействие проявляется в изменении скорости движущегося тела или изменении формы и размеров тела.

Сила, как и любая векторная величина, считается заданной, если известны ее модуль, направление в пространстве и точка приложения. Прямая, вдоль которой направлена сила, называется ***линией действия силы.***

Понятие силы всегда относится к двум телам (или телу и полю). При воздействии одного тела на другое происходит их взаимодействие либо при соприкосновении, либо на расстоянии посредством поля.

Физическая природа взаимодействий может быть различна. В настоящее время известно четыре типа ***фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое.***

В механике рассматриваются гравитационные силы, или силы тяготения, и разновидности электромагнитных сил — сила упругости и сила трения. Такие силы зависят либо от расстояния между телами или частями одного и того же тела, либо от относительных скоростей движения тел.

**Принцип независимости действия сил.** Принцип независимости действия, или принцип суперпозиции (наложения), сил справедлив для сил различной физической природы.

> ***Принцип независимости действия сил:*** **если на материальную точку (тело) одновременно действуют несколько сил, то каждая из сил действует независимо от других сил.**

Система нескольких сил, одновременно действующих на материальную точку, можно заменить ***равнодействующей силой,*** равной их геометрической сумме:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2. \tag{2.1}$$

В общем случае для определения равнодействующей силы используют правило многоугольника.

Чаще находят равнодействующую двух сил. В этом случае удобнее использовать правило параллелограмма: равнодействующая сила F равна диагонали параллелограмма, сторонами которого являются две слагаемые силы $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_2$ (рис. 2.1).

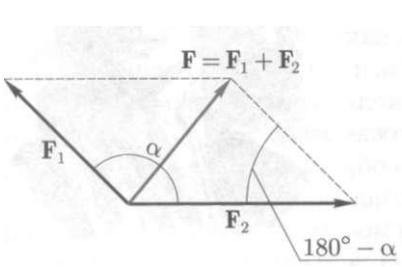



Рис. 2.1

Силы $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_2$, сумма которых равна вектору F, называются ***составляющими*** вектора силы F.

Если известны модули сил $|\mathbf{F}_1|$ и $|\mathbf{F}_2|$ и угол между ними а, то можно определить модуль равнодействующей силы. По теореме косинусов имеем

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 - 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2| \cos(180^\circ - \alpha).$$

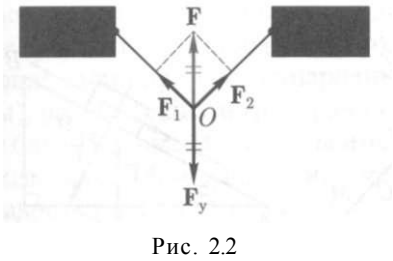



Рис. 2.2

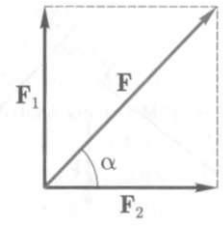



Рис. 2.3

Учитывая, что $\cos(180° - \alpha) = -\cos\alpha$, получим

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|\cos\alpha. \qquad (2.2)$$

Модуль равнодействующей силы зависит не только от модулей составляющих сил, но и от косинуса угла $(\alpha)$ между ними:

• если $\alpha = 0$, то $\cos\alpha = 1$. Силы являются сонаправленными $\mathbf{F}_1 \uparrow\uparrow \mathbf{F}_2$;
$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|$, или $|\mathbf{F}|^2 = (|\mathbf{F}_1| + |\mathbf{F}_2|)^2$.
Таким образом, $|\mathbf{F}| = |\mathbf{F}_1| + |\mathbf{F}_2|$.

Модуль результирующей силы равен сумме модулей составляющих сил. Сила F сонаправлена с силами $\mathbf{F}_1$ и $F_2$;

• если $\alpha = \pi$, $\cos\alpha = -1$. л ы являются противоположно направленными $\mathbf{F}_1 \uparrow\downarrow \mathbf{F}_2$;
$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 - 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|$, или $|\mathbf{F}|^2 = (|\mathbf{F}_1| - |\mathbf{F}_2|)^2$, $|\mathbf{F}| = |\mathbf{F}_1| - |\mathbf{F}_2|$.

Модуль результирующей силы равен разности модулей составляющих сил. Направление вектора F совпадает с направлением силы, модуль которой больше: $|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2|$, т. е. силы равны по модулю и являются противоположно направленными, результирующая сила F будет равна нулю. сил называют ***уравновешенной;***

— систему сил, действующих на материальную точку, можно уравновесить, если к точке *O* приложить силу, противоположно направленную результирующей и равной ей по модулю (рис. 2.2). Эту силу называют уравновешивающей $\mathbf{F}_y$;

• если $\alpha = \frac{\pi}{2}$, то $\cos\alpha = 0$. Силы $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_2$ взаимно-перпендикулярны: $\mathbf{F}_1 \perp \mathbf{F}_2$;
$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2$, или $|\mathbf{F}|^2 = \sqrt{|\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2}$. Модуль результирующей силы $|\mathbf{F}|$

определяется по теореме Пифагора. Направление силы F можно задать углом $\alpha$ (рис. 2.3): $\operatorname{tg}\alpha = \frac{|\mathbf{F}_1|}{|\mathbf{F}_2|}$.

**Разложение силы на составляющие.** При решении некоторых физических задач необходимо производить разложение вектора силы F на составляющие. Чаще

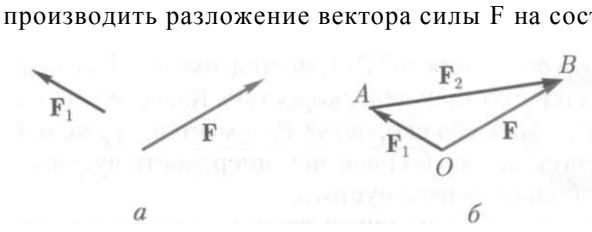
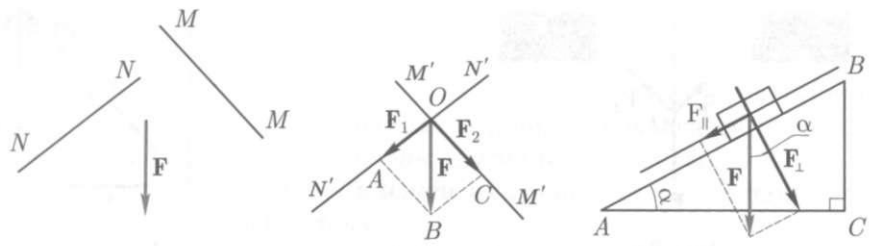



Рис. 2.4




*а* *б* *в*

Рис. 2.5

встречаются задачи о разложении вектора силы F на две составляющие, лежащие в одной плоскости. Эта задача имеет однозначное решение в двух случаях:

• известна одна из составляющих вектора F. На рис. 2.4, *а* изображен вектор силы F и его составляющая $\mathbf{F}_1$ в определенном масштабе. Для нахождения второй составляющей используем правило треугольника. Отметим на плоскости произвольную точку *O* (рис. 2.4, *б)* и отложим от этой точки векторы $\overrightarrow{OA} = \mathbf{F}_1$ и $\overrightarrow{OB}$ = F. Вектор $\overrightarrow{AB}$ = $F_2$, направленный от конца составляющей $\mathbf{F}_1$ к концу вектора F, будет второй составляющий вектора F: $\mathbf{F}_1 + F_2 = F$;

• известны направления обеих составляющих вектора F. На рис. 2.5, *а* это отрезки *NNn MM.* Отметим на плоскости произвольную точку *O* (рис. 2.5, *б)* и отложим от этой точки вектор $\overrightarrow{OB}$ = F. Проведем через точку *O* прямые $N'N' || NN$ и $M'M' || MM.$ В принятом масштабе, используя правило параллелограмма, определяют составляющие $\overrightarrow{OA} = \mathbf{F}_1$ и $\overrightarrow{OC}$ = $F_2$ как стороны параллелограмма, диагональю которого является $\overrightarrow{OB}$ = F. Например, на тело, находящееся на наклонной плоскости *ABC*, угол наклона *а* (рис. 2.5, *в),* действует сила F, направленная перпендикулярно $AC$ $(\mathbf{F} \perp AC)$. Составляющие этой силы, направленные параллельно $AB$ $(\mathbf{F}_{\parallel})$ и перпендикулярно $AB$ $(\mathbf{F}_{\perp})$, определяют по правилу параллелограмма (см. рис. 2.5, *в);* модули этих сил равны соответственно $F_{\parallel} = F\sin\alpha; F_{\perp} = F\cos\alpha.$

## 2.3. Масса

**Масса — мера инертности.** Вследствие инертности тела сохраняют свою скорость в отсутствие взаимодействия с другими телами.

***Инертность*** — свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, когда действующие на него силы отсутствуют или взаимно уравновешены.

Предположим, что на рельсах стоят два одинаковых вагона, один из которых порожний, а другой груженый. Какой из вагонов «легче» вывести из состояния покоя, т. е. изменить его скорость? Разумеется, пустой. Пусть порожний и груженый вагоны движутся с одинаковой скоростью. Какой из этих вагонов «труднее» остановить, т. е. изменить его скорость? Разумеется, груженый. Таким образом, инертность груженого вагона больше, чем инертность пустого, потому что масса груженого вагона больше массы пустого.

***Масса*** (от лат. *massa* — ком, кусок, груда) — это физическая величина, являющаяся мерой инертности тела при поступательном движении.

Масса — величина скалярная. Единица массы — килограмм (кг).

1 кг — это масса эталона, отлитого из сплава платины и иридия (90 % Pt, 10 % Ir) в виде цилиндра (международный прототип килограмма), высота которого (39 мм), равна его диаметру, хранящегося в международном бюро мер и весов в Севре близ Парижа. Все страны имеют точные копии этого эталона.

В классической механике, или механике Ньютона, т. е. когда скорость движения макротел $v$ много меньше скорости света с в вакууме $(v \ll c)$, считается, что масса тела не зависит от скорости его движения.

Масса — величина аддитивная, т. е. масса тела равна сумме масс всех частиц (или материальных точек), из которых оно состоит. Если, например, три тела массами $m_1$, $m_2$, $m_3$ соединить вместе, то масса объединенного тела ***m*** будет равна сумме масс тел его составляющих: $m = m_1 + m_2 + m_3$. Если тело разделить на части, например разорвался снаряд, то сумма масс частей (осколков) будет равна массе тела до разделения (массе снаряда). Важнейшее свойство массы — ее сохранение.

**Масса замкнутой системы тел остается неизменной при любых процессах, происходящих в системе.**

**Центр масс.** При поступательном движении тела удобно ввести понятие центра масс, или центра инерции.

***Центр масс*** — это точка, в которой может считаться сосредоточенной масса тела при его поступательном движении.

При поступательном движении тела все его точки движутся с одинаковой скоростью и описывают параллельные друг другу траектории. Поэтому можно рассматривать поступательное движение не всего тела, а одной точки — его центра масс, т. е. материальной точки, в которой как бы сосредоточена вся масса тела.

Очевидно, что центр масс однородных симметричных тел совпадает с центром симметрии *О*. Центр масс однородного шара совпадает с его центром (рис. 2.6, *а*). Центр масс однородного стержня находится в его середине (рис. 2.6, *б*). Центр масс тела может находиться и вне тела, например центр масс однородного обода или кольца (рис. 2.6, *в*).

Как определить положение центра масс произвольного тела? Рассмотрим простейшую систему, состоящую из двух материальных точек массами $m_1$ и $m_2$:

• если $m_1 = m_2$, то центр масс лежит на середине отрезка прямой, соединяющей эти точки, т.е. в точке *С* (рис. 2.7, *а*), $l_1 = l_2$;

• если $m_1 \neq m_2\,(m_1 > m_2)$, то центр масс лежит на отрезке прямой, соединяющей эти точки, и находится в точке, расположенной ближе к $m_1$, т. е. ближе к телу, имеющему большую массу (рис. 2.7, *б*). Расстояния $l_1$ и $l_2$ от соответствующих материальных точек до центра масс обратно пропорциональны массам этих точек:

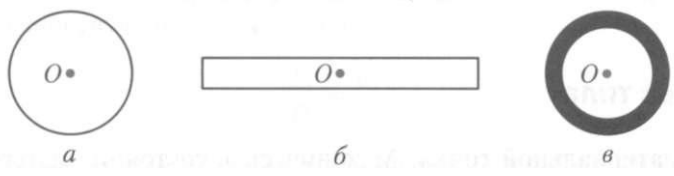



Рис. 2.6

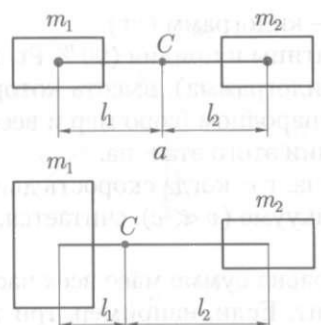



Рис. 2.7

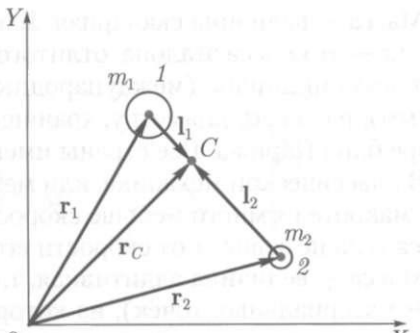



Рис. 2.8

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_1}{l_2}, \text{ или } m_1 l_1 = m_2 l_2. \tag{2.3}$$

Формула (2.3) аналогична правилу рычага, которое было известно еще Аристотелю. Это правило использовал и Архимед в различных подъемных механизмах. По формуле (2.3) можно определить центр масс двух тел, неразрывно связанных друг с другом, например двойных звезд или системы Земля - Луна, если известны масса тел и расстояния между ними.

Определим положение центра масс материальных точек массами $m_1 и m_2$ относительно начала отсчета (рис. 2.8).

Положение точек *1* и **2** и центра масс *C* определяют векторы $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ и $\mathbf{r}_C$. На рис. 2.8 $\mathbf{l}_1$ и $\mathbf{l}_2$ — векторы, проведенные из материальных точек к центру масс.

Из рис. 2.8 видно, что

$$\mathbf{r}_C = \mathbf{r}_1 + \mathbf{l}_1, \quad \mathbf{r}_C = \mathbf{r}_2 + \mathbf{l}_2.$$

Умножим первое уравнение на $m_1$, а второе — на $m_2$, получим

$$m_1\mathbf{r}_C = m_1\mathbf{r}_1 + m_1\mathbf{l}_1, \quad m_2\mathbf{r}_C = m_2\mathbf{r}_2 + m_2\mathbf{l}_2.$$

Сложив последние уравнения, имеем

$$\mathbf{r}_C(m_1 + m_2) = m_1\mathbf{r}_1 + m_1\mathbf{l}_1 + m_2\mathbf{r}_2 + m_2\mathbf{l}_2.$$

Из формулы (2.3) следует, что $m_1\mathbf{l}_1 = -m_2\mathbf{l}_2$, следовательно,

$$\mathbf{r}_C(m_1 + m_2) = m_1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{r}_2.$$

Таким образом, положение центра масс системы, состоящей из двух материальных точек, определяется радиусом-вектором $\mathbf{r}_C$

$$\mathbf{r}_C = \frac{m_1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{r}_2}{m_1 + m_2}. \tag{2.4}$$

## 2.4. Импульс тела

**Импульс материальной точки.** Механическое состояние материальной точки в данной системе отсчета определяется координатами $x$, $y$, $z$ (или радиусом-

вектором r) и ее скоростью v. Если одна из величин изменяется, то материальная точка переходит в другое механическое состояние.

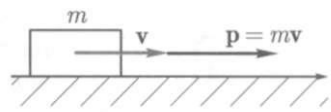


Рис. 2.9

Функцией механического состояния материальной точки является физическая величина, называемая импульсом (от лат. *impulses* — толчок, удар).

***Импульс материальной точки*** **p** — векторная величина, равная произведению массы $m$ точки на скорость v ее движения:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}. \qquad (2.5)$$

Единица импульса — килограмм-метр в секунду (кг м/с).

1 кг • м/с равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

Л Так как масса всегда положительна (то > 0), то векторы скорости и импульса ^ являются сонаправленными $\mathbf{v} \uparrow\uparrow \mathbf{p}$ (рис. 2.9).

~Э Каждому механическому состоянию данной материальной точки в выбранной системе отсчета соответствует определенный импульс.

^ Импульс не зависит ни от процесса, в результате которого материальная точ-СР ка оказалась в данном механическом состоянии, ни от предыдущих или последующих ее механических состояний. При дальнейшем изучении физики убедимся, что импульс — одна из важнейших характеристик движения материальных тел.

**Импульс тела.** Любое тело можно представить как систему материальных точек.

Импульс p тела, состоящий из $n$ материальных точек, равен векторной сумме импульсов всех точек системы:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots + \mathbf{p}_n.$$

При поступательном движении все материальные точки системы движутся с одной и той же скоростью v. Суммарная масса точек системы равна массе тела $m$. Векторы импульсов всех материальных точек сонаправлены.

***Импульс тела*** **p** — векторная величина, равная произведению массы $m$ тела на скорость v поступательного движения:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}. \qquad (2.6)$$

Если материальная точка (тело) движется поступательно по инерции (v = = const), то импульс не изменяется, т.е. остается постоянным **(p** — const).

## 2.5. Второй закон Ньютона

Второй закон Ньютона. Разные силы, действующие на одно и то же тело, сообщают ему различные ускорения. Как показывают опыты, ускорение тела пропорционально действующей на него силе:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

При действии одинаковых сил на различные тела ускорения тел обратно пропорциональны их массам:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}.$$

**I** ***Второй закон Ньютона:*** **ускорение тела в инерциальной системе от-**
**I счета пропорционально действующей на тело силе и обратно пропорцио-**
**I нально массе тела:**

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}. \qquad (2.7)$$

Векторы ускорения a и силы F сонаправлены: a ]] F.

В такой форме второй закон Ньютона справедлив для поступательного движения неизменного по массе тела конечных размеров, при этом все точки тела движутся с одним и тем же ускорением.

При решении задач динамики второй закон Ньютона часто записывают в виде

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \qquad (2.8)$$

*Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на его ускорение.*

Единица силы — ньютон (Н).

1 Н равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с$^2$ в направлении действия силы: 1 Н = 1 кг-м/с$^2$.

Если на тело действует несколько сил, то в формуле закона Ньютона (2.7) под силой F следует понимать равнодействующую этих сил. Такой вывод вытекает из принципа независимости действия сил.

В частном случае, когда все силы, действующие на тело, направлены по одной и той же прямой, их равнодействующая, а следовательно, и ускорение направлены по той же прямой, и поэтому уравнение основного закона механики (2.8) можно записать в скалярной форме:

$$F = ma, \qquad (2.9)$$

где равнодействующая сила $F$ представляет собой алгебраическую сумму всех сил, действующих на данное тело. При этом если направление силы совпадает с направлением скорости движения, т. е. $\mathbf{F} \uparrow\uparrow \mathbf{v}$, то $F > 0$ и $a > 0$. Это означает, что под действием такой силы тело будет двигаться ускоренно.

Если векторы силы и скорости направлены противоположно $\mathbf{F} \uparrow\downarrow \mathbf{v}$, то $F < 0$ и $a < 0$. Под действием такой силы тело движется замедленно (например, под действием силы трения).

Если равнодействующая всех сил равна нулю (F = 0), то ускорение тела также равно нулю (a = 0), т.е. скорость движения тела постоянная v = const — движение прямолинейное и равномерное.

**Центростремительная сила.** Роль центростремительной силы выполняют реально существующие в природе силы или их равнодействующие. Сила или равнодействующая нескольких сил, обеспечивающая движение материальной точки (тела) по окружности, называется ***центростремительной силой*** $\mathbf{F}_{цс}$[1].

[1] **Обратите внимание! Центростремительных сил в природе не существует.**

Центростремительная сила всегда направлена к центру кривизны траектории. Если на тело массой $m$ действует центростремительная сила (рис. 2.10), то оно движется с центростремительным, или нормальным, ускорением ($a_{цс} = a_n$), модуль которого равен $a_{цс} = \frac{v^2}{R}$.

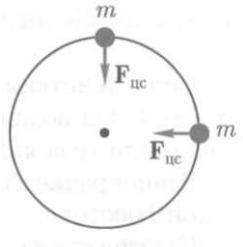


Рис. 2.10

Ускорение $a_{цс}$, приобретенное телом массой $m$ от воздействия на него центростремительной силы $F_{цс}$, определяется согласно второму закону Ньютона: $\mathbf{a}_{цс} = \frac{\mathbf{F}_{цс}}{m}$, откуда $\mathbf{F}_{цс} = m\mathbf{a}_{цс}$. Учитывая, что ускорение $\mathbf{a}_{цс}$ по направлению совпадает с силой $\mathbf{F}_{цс}$, модуль центростремительной силы равен

$$F_{цс} = \frac{mv^2}{R}. \qquad (2.10)$$

Основной закон классической динамики. В труде Ньютона «Математические начала натуральной философии» второй закон имеет несколько иную формулировку, чем ту, которая была приведена ранее:

I изменение импульса тела пропорционально приложенной к нему силе и I происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Математически этот за $\Delta(m\mathbf{v}) = \mathbf{F}\Delta t$ или $\Delta\mathbf{p} = \mathbf{F}\Delta t$, (2.11)

где р = $m$\ — импульс тела.

*Произведение силы* F *на время ее действия* $\Delta t$, т.е. $\mathbf{F}\Delta t$, *называют импульсом силы.*

Единица импульса силы — ньютон • секунда (Н*с).

1 Н с равен импульсу силы 1 Н, действующей в течение 1 с.

Второй закон Ньютона можно сформулировать еще и следующим образом:

**I импульс силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела.**

Формула (2.11) выражает более общую формулу второго закона Ньютона, чем формула (2.7), потому что она справедлива для движущихся тел как постоянной, так и переменной масс (например, масса ракеты в полете убывает с течением времени, т.е. является величиной переменной).

Из формулы (2.11) выразим силу

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta\mathbf{p}}{\Delta t}, \qquad (2.12)$$

откуда видно, что сила, действующая на тело, равна изменению импульса тела за единицу времени. Значит, *изменение импульса тела, а следовательно, и скорости не может происходить мгновенно.*

Если $\Delta t$ = 0, то $F \to \infty$ (при условии то = const). Аналогичный вывод получим, если будем анализировать формулу $m\Delta\mathbf{v} = \mathbf{F}\Delta t$. Здесь $m = \text{const} \neq 0$, $\mathbf{F} = \text{const} \neq 0$. Если $\Delta\mathbf{v} \neq 0$, то и $\Delta t \neq 0$.

## 2.6. Третий закон Ньютона

**Силы действия и противодействия.** Понятие «сила» всегда относится к двум телам. Сила возникает при взаимодействии двух тел, при этом материальные точки или тела являются равноправными.

Равноправие взаимодействующих материальных точек (тел) отражает третий закон Ньютона.

Ньютон сформулировал этот закон так: любому действию всегда препятствует равное и противоположное противодействие.

> ***Третий закон Ньютона:*** **силы взаимодействия двух тел в инерциальной системе отсчета равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти тела:**

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}. \tag{2.13}$$

Одну из сил, например $F_{12}$, называют ***силой действия,*** другую ($F_{21}$) — ***силой противодействия*** (рис. 2.11). Эти силы всегда действуют парами и являются силами одной природы, так как возникают при взаимодействии тел. Эти силы приложены к разным телам, поэтому не могут уравновешивать друг друга.

**Применение третьего закона Ньютона.** Рассмотрим взаимодействие двух тел *A и B,* например человек, стоя в лодке, подтягивает другую лодку с помощью веревки (рис. 2.12). Согласно третьему закону Ньютона:

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}. \tag{2.14}$$

Если на тело действует сила, то согласно второму закону Ньютона тело под действием этой силы приобретает ускорение и соотношение (2.14) можно переписать в виде $m_A\mathbf{a}_A = -m_B\mathbf{a}_B$. Знак «минус» в этой формуле показывает, что ускорения тел $A$ и $B$ противоположно направлены $\mathbf{a}_A \uparrow\downarrow \mathbf{a}_B$. По третьему закону Ньютона модули этих сил равны. Определим отношение модулей ускорений взаимодействующих тел

$$\frac{a_A}{a_B} = \frac{m_B}{m_A}. \tag{2.15}$$

*Ускорения, приобретаемые телами при взаимодействии, обратно пропорциональны масса*

Определим отношение ускорений Земли $a_\oplus$ и космического корабля $a$ при его запуске. Современные космические корабли многоразового использования имеют массу порядка $m = 2 \cdot 10^6$ кг. Масса Земли $M_\oplus = 6 \cdot 10^{24}$ кг:

$$\frac{a_\oplus}{a} = \frac{m}{M_\oplus} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ кг}}{6 \cdot 10^{24} \text{ кг}} \approx 6{,}6 \cdot 10^{-19}.$$

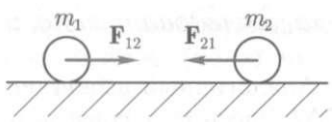



Рис. 2.11

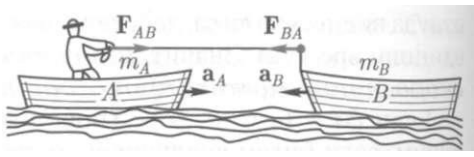



Рис. 2.12

Три закона Ньютона описывают движение почти всех материальных объектов, окружающих нас: от молекул газов до планет Солнечной системы.

## 2.7. Закон всемирного тяготения

**Историческая справка.** Геоцентрическое мировоззрение, или учение, Аристотеля — Птолемея (II в. н. э.), просуществовавшее почти 2 тыс. лет, опиралось на длительный общечеловеческий опыт. Люди ежедневно наблюдали восход и заход Солнца, суточное движение звезд и не подозревали, что Земля не покоится, а с огромной скоростью *движется в мировом пространстве*.

В 1543 г. была издана книга польского астронома Н. Коперника «О вращении небесных сфер», в которой он обосновал *гелиоцентрическую систему мира, согласно которой Земля, как и другие планеты, обращаются вокруг Солнца*. Этот основополагающий научный труд внес решающий, фундаментальный вклад в научную революцию, коренным образом изменившую взгляд на Природу. Учение Коперника опровергло геоцентрическое учение Аристотеля- Птолемея и поставило перед наукой ряд важных проблем, в частности проверить соответствие новой теории фактам.

Гелиоцентрическая система мира нуждалась и в физическом обосновании. Необходимо было выяснить, что «связывает» планеты с Солнцем, Землю с Луной? Каковы физические причины движения вообще и движения планет в частности? Таким образом, благодаря великому открытию Н. Коперника появилась научная программа, выполнение которой привело к возникновению экспериментального и математического естествознания и классической механики, или механики Ньютона.

И.Кеплер (1571 -1630) — активный сторонник гелиоцентрического учения, привел систему Н. Коперника в соответствие с последними данными астрономии. Используя наблюдения Т. Браге и свои собственные, Кеплер открыл законы движения планет (три закона Кеплера).

Решающий шаг в борьбе за гелиоцентрическую систему и новое мировоззрение был сделан Г. Галилеем. Он обосновал систему Н. Коперника физически в главном своем сочинении «Диалог о двух системах мира — Птолемеевой и Коперниковой».

**Закон всемирного тяготения.** Открытие закона всемирного тяготения связано с решением задач динамики первого типа. И. Ньютону были известны законы движения планет вокруг Солнца — законы Кеплера. По известным кинематическим законам движения планет Ньютон определил силу всемирного тяготения и установил закон, который является фундаментальным законом природы.

***Закон всемирного тяготения:*** **любые две материальные точки притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:**

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}. \qquad (2.17)$$



Н. Коперник

Коэффициент пропорциональности $G$ называется ***гравитационной постоянной,*** которая была оп-

ределена в 1798 г. английским физиком Г. Кавендишем опытным путем. Последующие измерения лишь уточняли ее значение.

*Гравитационная постоянная численно равна модулю силы тяготения двух тел, массой* 1 кг *каждое, находящихся на расстоянии* 1 м *друг от друга:*

$$G = 6{,}67 \cdot Ю^{-11}\ м^3/(кг \cdot с^2), \text{ или } G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ Н \cdot м^2/кг^2.$$

*Гравитационные силы — силы притяжения* — направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие точки, поэтому являются *центральными силами.*

Если тело массой то находится над поверхностью Земли на высоте *h,* то на него действует сила земного притяжения — тяготения, определяемая по формуле:

$$F = G\frac{mM_\oplus}{(R_\oplus + h)^2}, \qquad (2.18)$$

где $M_\oplus$, $R_\oplus$ — масса и радиус Земли.

Проверка закона всемирного тяготения в условиях Земли и с помощью многочисленных астрономических наблюдений подтвердила его всеобщий характер.

Закон всемирного тяготения позволяет вычислять массу планет и их спутников, объяснять явления приливов и отливов в океанах и множество других явлений, в том числе описать движение в звездных скоплениях — галактиках.

То, что И. Ньютон распространил этот закон на всю Вселенную, явилось гениальной интуицией ученого, поскольку соотношение (2.17) было получено на основании закономерностей, справедливых в рамках одной Солнечной системы. Только в наше время наблюдения за далекими звездами и звездными системами подтвердили универсальность закона всемирного тяготения.

Благодаря закону всемирного тяготения открыты восьмая и девятая планеты Солнечной системы — Нептун (1846) и Плутон[1] (1930).

## 2.8. Гравитационное поле

**Гравитационное взаимодействие.** Гравитационное взаимодействие присуще всем телам Вселенной.

*Гравитационное взаимодействие* — взаимное притяжение материальных тел, наблюдаемое в любой среде и вакууме.

Гравитационное взаимодействие проявляется в виде сил всемирного тяготения. Эти силы зависят только от взаимного расположения тел. Гравитационное взаимодействие является *дальнодействующим,* т. е. радиус его действия считается бесконечно большим. Из четырех типов фундаментальных взаимодействий интенсивность гравитационного взаимодействия самая маленькая, но она играет важную роль во Вселенной, потому что силы тяготения обеспечивают существование планет, планетных систем — Солнечной системы, звезд, звездных систем и других объектов Вселенной.

[1] **На XXVI Ассамблее Международного астрономического союза (2006) принято решение называть Плутон карликовой планетой.**

**Движение тел в гравитационном поле Земли.** Гравитационное поле Земли — это область Вселенной, в которой силы притяжения, действующие на материальные объекты со стороны Земли, больше, чем со стороны других космических тел.

***Гравитационное поле*** — это форма материи, посредством которой осуществляется гравитационное взаимодействие.

Траектория движения тел в гравитационном поле Земли зависит от начальных условий.

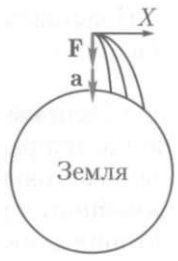


Рис. 2.13

• Если начальная скорость $\mathbf{v}_0$ тела, поднятого на высоту $h$ над поверхностью Земли, направлена перпендикулярно оси ***X,*** т. е. по линии действия гравитационной силы (рис. 2.13), то, согласно второму закону Ньютона, эта сила (см. формулу (2.18)) сообщает телу ускорение **a,** направленное, как и сила **F,** к центру Земли

$$ma = G\frac{mM_\oplus}{(R_\oplus + h)^2}, \text{ откуда } a = G\frac{mM_\oplus}{(R_\oplus + h)^2}.$$

Вблизи поверхности Земли ($h \ll R_\oplus$) ускорение **a** равно ускорению свободного падения **g**:

$$a = G\frac{M_\oplus}{R_\oplus}; \ \mathbf{a} = \mathbf{g} = \text{const}.$$

Тела, находящиеся в гравитационном поле Земли вблизи ее поверхности, равноускоренно движутся по прямой к ее центру (свободно падают) с ускорением свободного падения

$$g = G\frac{M_\oplus}{R_\oplus^2}. \quad (2.19)$$

При $h \ll R_\oplus$ ускорение свободного падения является функцией $r = R_\oplus + h$:

$$g = G\frac{mM_\oplus}{(R_\oplus + h)^2}, \text{ или } g = G\frac{M_\oplus}{r^2}. \quad (2.20)$$

Из формул (2.19) и (2.20) следует, что *ускорение свободного падения не зависит от массы «падающего тела»* то, *а определяется массой Земли* $M_\oplus$ *— массой тела, создающего гравитационное поле (источника поля), и взаимным расположением взаимодействующих тел.*

Ускорение свободного падения тел на Луне $g$ = 1,6 м/с$^2$. Вблизи поверхности планет их гравитационное ускорение зависит, как следует из формулы (2.16), от их массы и радиуса.

В табл. 2.1 приведены значения гравитационных ускорений планет Солнечной системы вблизи поверхности.

Таблица 2.1

| Планета | $g$, м/с$^2$ | Планета | $g$, м/с$^2$ | Планета | $g$, м/с$^2$ | Планета | $g$, м/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Меркурий | 3,7 | Марс | 3,7 | Сатурн | 12 | Нептун | 12 |
| Венера | 8,9 | Юпитер | 26 | Уран | 11 | Плутон | 2 |

Подставляя формулу (2.20) в (2.17), определим силу тяготения

$$\mathbf{F} = mg. \qquad (2.21)$$

• Если начальная скорость $v_0$ тела, поднятого на высоту $\boldsymbol{h}$ над поверхностью Земли, направлена горизонтально, т. е. вдоль оси $\boldsymbol{X}$, то движение тела будет сложным, состоящим из двух независимых движений: свободного падения и прямолинейного и равномерного движения со скоростью $v_0 = \text{const}$ вдоль оси $\boldsymbol{X}$. Траектория движения — кривая линия (см. рис. 2.14). Чем больше $v_0$, тем дальше от места «бросания» приземлится тело. При некоторой скорости $v_0 = v_\text{I}$ тело не возвращается на Землю. Скорость $v_\text{I}$ называют первой космической скоростью.

***Первая космическая скорость*** $v_\text{I}$ — это минимальная скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно превратилось в спутник Земли и двигалось по окружности, плоскость которой проходит через центр Земли.

При движении спутника Земли по окружности радиусом $R_\oplus + h$ на него действует гравитационная сила (см. формулу (2.18)), которая сообщает спутнику нормальное, центростремительное, ускорение

$$a_n = \frac{v_\text{I}^2}{R_\oplus + h}.$$

По второму закону Ньютона:

$$m\frac{v_\text{I}^2}{R_\oplus + h} = G\frac{mM_\oplus}{(R_\oplus + h)^2}.$$

Сократив обе части последнего равенства на $\frac{m}{R_\oplus + h}$, получим

$$v_\text{I} = \sqrt{G\frac{M_\oplus}{R_\oplus + h}}.$$

Если спутник запускается с поверхности Земли ($h = 0$), то $v_\text{I} = \sqrt{G\frac{M_\oplus}{R_\oplus}}$.

С учетом формулы (2.19) получим

$$v_\text{I} = \sqrt{gR_\oplus}. \qquad (2.22)$$

Вычислим приближенное значение первой космической скорости

$$v_\text{I} = \sqrt{9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 6{,}4 \cdot 10^6\ \text{м}} \approx$$
$$\approx 7{,}9 \cdot 10^3\ \text{м/с} \approx 7{,}9\ \text{км/с}.$$

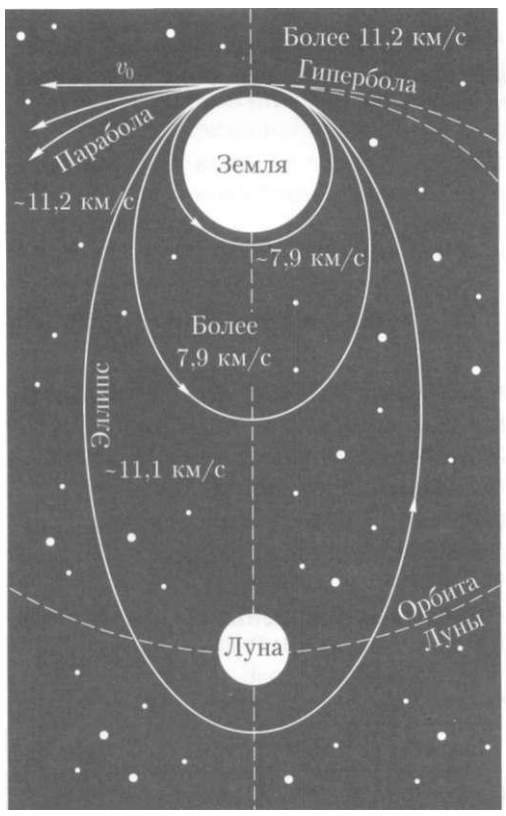



Рис. 2.14

Если скорость запуска спутника $v$ больше первой космической скорости

$v_{\text{I}}$ ($v > v_{\text{I}}$), но меньше второй космической скорости ($v_{\text{II}} \approx$ 11,2 км/с, см. подразд. 3.9), то траектория движения спутника представляет эллипс, один из фокусов которого совпадает с центром Земли (рис. 2.14).

Планеты — спутники Солнца — движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов эллипса находится Солнце. Орбиты планет лежат примерно в одной плоскости.

## 2.9. Сила тяжести. Вес

**Сила тяжести.** Рассмотрим тело, находящееся в произвольной точке *B* поверхности Земли на широте $\varphi$, на неподвижной относительно Земли подставке (рис. 2.15). На это тело действуют две силы: сила тяготения $F_{\text{т}}$ и сила реакции земной поверхности (или сила реакции опоры) *N,* направление которой определяется не только силой тяготения, но и вращением Земли. Равнодействующая *F* этих двух сил обеспечивает движение тела по окружности с центром $O'$ при суточном вращательном движении Земли вокруг оси.

***Сила тяжести*** $F_{\text{тяж}}$ — сила, действующая на тело вследствие его притяжения к Земле, равная по модулю силе реакции *N,* но направленная противоположно ей.

Сила тяжести равна произведению массы тела на ускорение свободного падения и приложена к телу

$$F_{\text{тяж}} = mg. \tag{2.23}$$

Из рис. 2.15 видно, что силы $F_G$ и $F_{\text{тяж}}$ совпадают по направлению, если точка *B* находится на полюсе или экваторе. Если точка *B* находится на одном из полюсов, то она не участвует в суточном вращательном движении Земли. Точки земной поверхности, лежащие на экваторе, движутся по окружности, радиус которой максимален и равен радиусу Земли.

**Вес тела.** Вес тела приложен не к телу, а к опоре или подвесу.

***Вес тела*** **P** — сила, с которой тело вследствие притяжения к вращающейся Земле действует на опору или подвес, удерживающие его от свободного падения.

Вес тела численно равен действующей на тело силе тяжести $P = mg$ только в том случае, когда опора или подвес находятся в покое относительно Земли или в состоянии равномерного прямолинейного движения, т.е. **a** = 0 (рис. 2.16, поз. *1).* Если же подвес или опора движутся с ускорением, то вес тела может быть как больше, так и меньше силы тяжести.

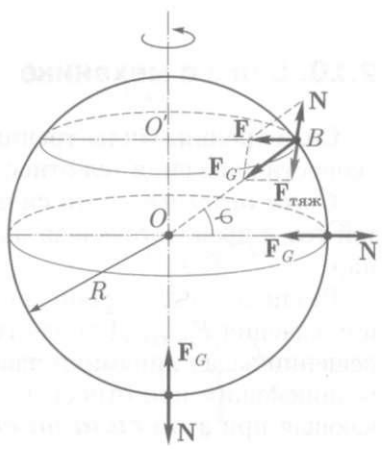


Рис. 2.15

Например, в кабине лифта находится мальчик массой *m* (рис. 2.16). На него действуют направленная вертикально вниз сила тяжести *mg* и вертикально вверх сила реакции опоры **N** (на рисунке не показаны). Если лифт поднимается с ускорением **a** (поз. ***2),*** то уравнение движения в проекции на ось $Y$: $N_2 - mg = ma$, откуда $N_2$ = = *m(∂+ a).*

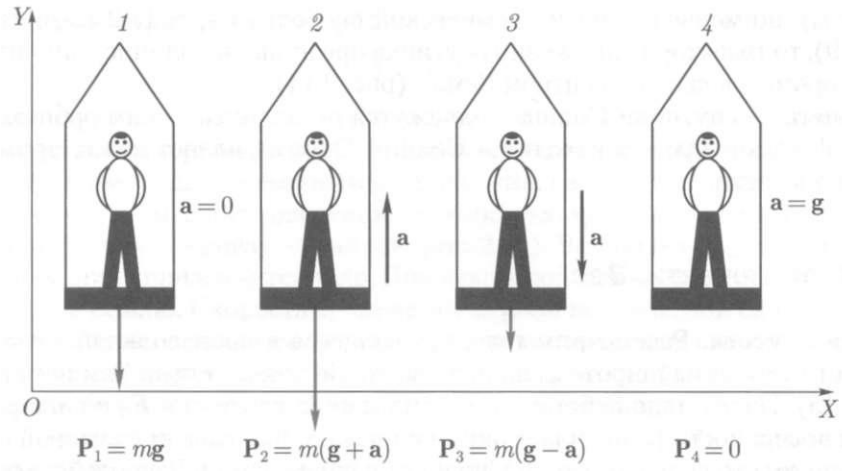



Рис. 2.16

По третьему закону Ньютона с такой же по значению силой $|\mathbf{P}_2| = |\mathbf{N}_2|$ тело давит на пол лифта, т. е. вес мальчика в системе отсчета «лифт» равен $P_2 = m(g + a)$, т.е. больше силы тяжести. В этом случае он находится в состоянии перегрузки.

**Невесомость.** Если лифт опускается с ускорением **а** (поз. *3),* то уравнение движения $N_3 - mg = -ma$, откуда $N_3 = m(g - a)$. Мальчик давит на пол лифта с силой $|\mathbf{P}_3| = |\mathbf{N}_3|$, т. е. его вес в системе «лифт» меньше силы тяжести. При свободном падении лифта **(a = g)** вес ребенка равен нулю **(**$P_4$ — 0). В этом случае он находится в состоянии невесомости (поз. ***4)***

***Невесомость*** — это состояние, при котором тело движется под действием только силы тяжести.

Во всех рассмотренных случаях сила тяжести $\mathbf{F}_{тяж} = m\mathbf{g}$.

В состоянии невесомости находятся все предметы в космическом корабле - спутнике, когда прекращается работа двигателя и на корабль действует только сила притяжения к Земле. Нельзя говорить о весе Луны, Земли и других планет Солнечной системы. Космические объекты характеризуются массой.

## 2.10. Силы в механике

**Сила трения.** Силы трения имеют электромагнитную природу и зависят от скорости движения тел относительно друг друга.

***Сила трения*** — это сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел и препятствующая их относительному перемещению в плоскости касания.

Различают силы трения покоя $F_{тр\ п}$, силы трения скольжения $F_{тр\ ск}$, силы трения качения $F_{тр\ кач}$. Для одних и тех же поверхностей $F_{тр\ п} > F_{тр\ ск} > F_{тр\ кач}$. При решении задач динамики чаще приходится иметь дело с трением скольжения, возникающим при относительном перемещении соприкасающихся тел. Возникающая при этом ***сила трения скольжения*** $F_{тр\ ск}$[1] *всегда направлена в*

[1] **Далее** $F_{тр\ ск}$ **будем обозначать** $F_{тр}$.

*сторону, противоположную относительной скорости движения соприкасающихся тел, и зависит от силы нормального давления N:*

$$F_{\text{тр}} = \mu N. \qquad (2.24)$$

Сила нормального давления N перпендикулярна поверхности, по которой движется тело. При движении по горизонтальной поверхности $N = mg$, поэтому $F_{\text{тр}} = \mu mg$.

Трение скольжения характеризуется коэффициентом трения скольжения (коэффициентом трения)

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N},$$

где $\mu$ — безразмерная величина.

На рис. 2.17 изображено тело, лежащее на наклонной плоскости, и силы, на него действующие.

Выберем оси координат таким образом, чтобы ось $X$ была параллельна наклонной плоскости, а ось $Y$ — перпендикулярна. В данном случае сила $|\mathbf{F}_y| = |\mathbf{N}|$ является составляющей силы тяжести $mg$. Другая составляющая силы $mg$, вызывающая движение тела, направлена параллельно трущимся поверхностям $F_т$

Сила трения скольжения $F_{тр}$ возникает в месте контакта, но, считая поперечный размер тела, лежащего на наклонной плоскости, незначительным, переносим точку ее приложения в центр тяжести тела. Направление силы трения скольжения противоположно направлению силы $F_x$, которая побуждает тело двигаться вниз по наклонной плоскости:

$$F_x = mg \sin \alpha,$$

где $\alpha$ — угол наклона плоскости к горизонту.

В свою очередь, сила трения скольжения $F_{\text{тр}}$, удерживающая тело на наклонной плоскости, также зависит от угла $\alpha$, так как

$$N = mg \cos \alpha,$$

и тогда

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

Соотношение сил $F_x$ и $F_{\text{тр}}$ зависит от угла а и физических характеристик трущихся поверхностей, т. е. от коэффициента трения.

Тело начнет двигаться по наклонной плоскости, когда сила $F_x$ превысит силу трения: $F_x > F_{\text{тр}}$.

Когда тело находится в покое, сила трения называется ***силой трения покоя,*** а коэффициент трения — ***коэффициентом трения покоя*** $(\mu_{\text{п}})$.

Тело можно заставить двигаться, увеличивая угол наклона $\alpha$. В момент начала движения движущая сила $F_x$ будет равна максимальному значению силы трения покоя. Так как сила трения покоя больше силы трения сколь-

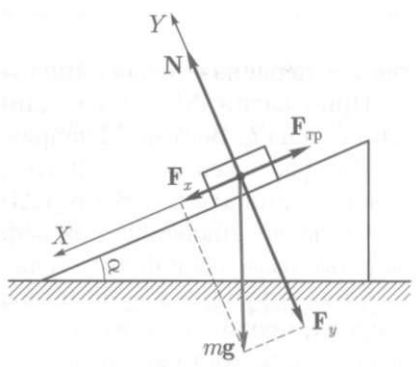


Рис. 2.17

Таблица 2.2

| Материалы | Коэффициент трения | | Материалы | Коэффициент трения | |
|---|---|---|---|---|---|
| | покоя $\mu_п$ | скольжения $\mu$ | | покоя $\mu_п$ | скольжения $\mu$ |
| Лед — лед | 0,05—0,15 | 0,02 | Сталь — сталь | 0,6 | 0,4 |
| Сталь — лед | 0,1 | 0,05 | Резина — мокрый | | |
| Резина — лед | 0,3 | 0,02 | бетон | 0,7 | 0,5 |
| Дерево — дерево | 0,5 | 0,5 | Стекло — стекло | 0,9 | 0,7 |
| Резина — асфальт | 0,6 | 0,4 | Резина — дерево | 0,9 | 0,7 |

жения, то очевидно, что и коэффициент трения покоя $\mu_п$ больше коэффициента трения скольжения в большинстве случаев. Поэтому сдвинуть тело с места «труднее», чем потом его перемещать $(\mu_п > \mu)$ (табл. 2.2).

Коэффициенты трения $\mu_п$ и $\mu$ в сильной степени зависят от рода и состояния трущихся поверхностей, кроме того, коэффициент трения скольжения зависит и от скорости движения. Во многих случаях он в начале движения уменьшается с увеличением скорости движения, а потом возрастает.

Из повседневного опыта известно, что легче везти груз на тележке, чем его тащить, потому что коэффициент трения качения меньше коэффициента трения скольжения для одних и тех же материалов $(\mu_{кач} < \mu)$. Например, для материалов сталь — сталь $\mu_{кач} = 0{,}001$.

**Сила упругости.** Деформация тела происходит под действием внешних сил и сопровождается изменением размеров и формы твердого тела.

Деформации, которые полностью исчезают при снятии деформирующих факторов, называют ***упругими.*** Деформации, которые не исчезают при снятии деформирующих факторов, являются ***пластическими.***

Упругость или пластичность тел в основном определяется материалом, из которого они изготовлены. Например, сталь и резина упруги, а медь и воск пластичны.

Упругие деформации, возникающие в телах, весьма разнообразны. Различают четыре основных вида деформаций: растяжение (сжатие), сдвиг, кручение и изгиб.

Наиболее часто при эксплуатации различных конструкций приходится рассчитывать упругие деформации растяжения или сжатия.

Деформация растяжения и сжатия характеризуется удлинением $\Delta l$:

$$\Delta l = l - l_0,$$

где $l_0$ — первоначальная длина тела или пружины.

При сжатии $\Delta l < 0$, т. е. длина тела $l$ после сжатия меньше первоначальной длины тела $l_0$. Вектор $\Delta\mathbf{l}$ направлен противоположно оси ***X.***

При растяжении $\Delta l > 0$, т. е. длина тела $l$ после растяжения больше первоначальной длины тела $l_0$. Вектор $\Delta\mathbf{l}$ совпадает с положительным направлением оси ***X.***

Силы, возникающие при деформации и стремящиеся восстановить первоначальные размеры и форму тела, называют ***силами упругости*** $F_{упр}$.

Сила упругости $F_{упр}$, возникающая при деформации тела, всегда направлена в сторону, противоположную смещению частиц тела. При одномерной линейной деформации растяжения или сжатия сила упругости направлена вдоль линии действия внешней силы и пропорциональна вектору $\Delta\mathbf{l}$.

Сила F и ускорение a направлены по одной прямой в одну сторону. Если на тело действует несколько сил, то под силой следует понимать равнодействующую всех сил. Единица силы — ньютон (Н).

• *Основной закон динамики:* $\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}$.

• *Третий закон Ньютона:* силы, с которыми две материальные точки действуют друг на друга, равны по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль прямой, соединяющей эти точки,

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}.$$

Эти силы приложены к разным телам, не уравновешивают друг друга и являются силами одной природы.

• *Закон всемирного тяготения:* две материальные точки притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс ($m_1$ и $m_2$) и обратно пропорциональной квадрату расстояния (r) меж $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$,

где $G$ — гравитационная постоянная ($G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м$^3 \cdot$ кг$^{-1}$с$^{-2}$).

• *Гравитационные силы* — силы притяжения — направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие материальные точки, являются центральными силами.

• *Сила тяжести* — сила, с которой тело притягивается Землей.

Сила тяжести равна произведению массы тела $m$ на ускорение свободного падения $g$

$$F_{тяж} = mg.$$

Сила тяжести приложена к телу.

• *Вес тела* — сила, с которой тело вследствие притяжения к вращающейся Земле действует на опору или подвес, удерживающие его от свободного падения. Вес тела приложен к опоре или подвесу.

• *Сила трения* скольжения возникает при скольжении одного тела по поверхности другого. Сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления (7V), прижимающей трущиеся поверхности друг к другу,

$$F_{тр} = \mu N,$$

где $\mu$ — коэффициент трения скольжения, зависящий от природы и состояния соприкасающихся поверхностей и скорости движения.

Сила трения направлена по касательной к трущимся поверхностям в сторону, противоположную движению данного тела относительно другого.

• *Силы упругости* возникают в результате взаимодействия тел, сопровождающегося их деформацией.

Сила упругости пропорциональна смещению частицы из положения равновесия и направлена к положению равновесия

$$F = -k\Delta l,$$

где $к$ — упругость; $\Delta l$ — удлинение.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Что изучает динамика? **2.** Какое тело называют свободным? **3.** Сформулируйте первый закон Ньютона. **4.** Какую систему отсчета называют инерциальной? **5.** Дайте определение силы. **6.** В чем заключается принцип независимости действия сил? **7.** Что такое инертность? Какая физическая величина является мерой инертности тела? **8.** Чему равен импульс тела? **9.** Сформулируйте второй закон Ньютона. **10.** Какую силу называют центростремительной? **11.** Сформулируйте третий закон Ньютона. **12.** Сформулируйте закон всемирного тяготения. **13.** В чем заключается физический смысл гравитационной постоянной? **14.** Дайте характеристику гравитационному взаимодействию. **15.** Дайте определение веса **17.** Какие способы измерени ния скольжения и чему **20.** Сформулируйте закон

**15.** Дайте определение веса тела. **16.** Какое состояние тела называют невесомостью? **17.** Какие способы измерения массы тела вам известны? **18.** Куда направлена сила трения скольжения и чему она равна? **19.** Какие силы называют силами упругости? **20.** Сформулируйте закон Гука.

### Примеры решения задач

• **Задача** 1. На вагон массой 20 т, движущийся со скоростью 54 км/ч, начинает действовать сила торможения, и он останавливается через 100 с. Определить силу, действующую на вагон; ускорение, с которым он двигался, и путь, пройденный вагоном до остановки.

**Дано:** $m = 20$ т $= 2 \cdot 10^4$ кг; $v_0 = 54$ км/ч $= 15$ м/с; $t = 100$ с; $v = 0$.

**Найти:** $a$; $S$; $F_{тр}$.

**Решение.** На вагон действуют (рис. 2.18): 1) сила тяжести $mg$, 2) сила реакции опоры $N$; 3) сила трения $F_{тр}$.

Вагон движется в горизонтальном направлении. За положительное направление оси $X$ примем направление движения вагона. Движение вагона равнозамедленное, векторы ускорения и скорости направлены в противоположные стороны.

В векторной форме второй закон Ньютона имеет вид $mg + F_{тр} + N = ma$, в проекции на ось $X$: $-F_{тр} = -ma$, или $F_{тр} = ma$.

Ускорение и путь, пройденный вагоном до остановки, найдем из уравнения кинематики $v = v_0 - at$, откуда

$$a = \frac{v_0}{t}, \text{ так как } v = 0;$$

$$S = \frac{v_0^2}{2a}.$$

**Вычисления:** $a = \dfrac{15 \text{ м/с}}{100 \text{ с}} = 0{,}15 \text{ м/с}^2$; $S = \dfrac{15^2 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 0{,}15 \text{ м/с}^2} = 750$ м; $F_{тр} = 2 \cdot 10^4 \text{ кг} \times$ $\times\, 0{,}15 \text{ м/с}^2 = 3 \cdot 10^3$ Н.

**Ответ:** $a = 0{,}15$ м/с$^2$; $S = 750$ м; $F_{тр} = 3 \cdot 10^3$ Н.

• **Задача** 2. Два груза массами 1 и 2 кг прикреплены к концам невесомой нерастяжимой нити, перекинутой через блок, подвешенный к потолку. Определить ускорение, с которым будут двигаться грузы. Считать блок невесомым, трением в оси блока пренебречь.

**Дано:** $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 2$ кг; $g = 9{,}8$ м/с$^2$.

**Найти:** $a$.

**Решение.** При решении задачи считаем, что блок не вращается, нить скользит по блоку без трения. По условию задачи:

1) нити нерастяжимы, следовательно, $a_1 = a_2$;

2) блок невесомый, следовательно, $T_1 = T_2 = T$.

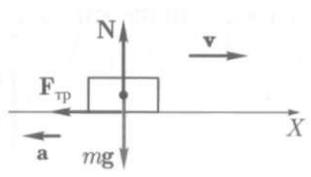


Рис. 2.18

На каждый из грузов действуют силы тяжести $m_1\mathbf{g}$, $m_2\mathbf{g}$ и силы натяжения $\mathbf{T}_1$ и $\mathbf{T}_2$ соответственно (рис. 2.19). В векторной форме второй закон Ньютона имеет вид: $m_1\mathbf{g} + \mathbf{T}_1 = m_1\mathbf{a}_1$ — для первого груза; $m_2\mathbf{g} + \mathbf{T}_2 = m_2\mathbf{a}_2$ — для второго груза, в проекции на ось $X$.

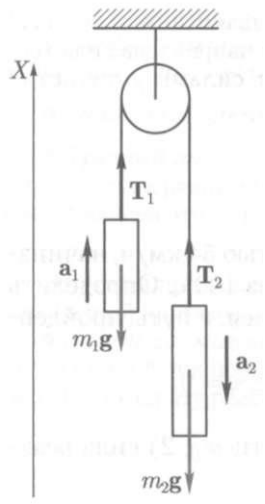



Рис. 2.19

$$\begin{cases} -m_1 g + T_1 = m_1 a_1; & (1) \\ -m_2 g + T_2 = -m_2 a_2. & (2) \end{cases}$$

Эту систему уравнений необходимо дополнить двумя уравнениями, так как они содержат четыре неизвестных:

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = T; & (3) \\ a_1 = a_2 = a. & (4) \end{cases}$$

Подставив (3) и (4) в уравнения (1) и (2), имеем

$$\begin{cases} -m_1 g + T = m_1 a; & (5) \\ -m_2 g + T = -m_2 a. & (6) \end{cases}$$

Вычитая из уравнения (5) уравнение (6), получаем

$$-m_1 g + T + m_2 g - T = m_1 a + m_2 a,$$

откуда

$$g(m_2 - m_1) = a(m_1 + m_2), \text{ или } a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} g.$$

**Вычисления:** $a = \dfrac{2 \text{ кг} - 1 \text{ кг}}{1 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 = 3{,}3 \text{ м/с}^2.$

**Ответ:** $a$ = 3,3 м/с$^2$.

• **Задача** 3. Вверх по наклонной плоскости с углом наклона 30° движется груз массой 1 кг. На груз действует сила 20 Н, направленная под углом 60° к наклонной плоскости. Найти ускорение, с которым движется тело, если коэффициент трения скольжения равен 0,05.

**Дано:** $m$ = 1 кг; $F$ = 20 Н = 200 кг/м$^2$; $a$ = 30°; $\beta$ = 60°; $\mu$ = 0,05; $g$ = 10 м/с$^2$.

**Найти:** $a$.

**Решение.** На тело действуют (рис. 2.20): 1) сила F, направленная под углом 60° к наклонной плоскости; 2) сила трения $\mathbf{F}_{тр}$; 3) сила реакции опоры N.

Положительное направление оси $X$ выберем вдоль плоскости вверх, положительное направление оси $Y$ — вверх, перпендикулярно оси $X$.

В векторной форме второй закон Ньютона имеет вид

$$F + F_{тр} + N + rag = ma,$$

в проекции на оси координат:

$$\begin{cases} F\cos\beta - F_{тр} - mg\sin\alpha = ma - \text{ось } X; & (1) \\ N + F\sin\beta - mg\cos\alpha = 0 - \text{ось } Y. & (2) \end{cases}$$

Из уравнения (1) определяем ускорение

$$a = \frac{F\cos\beta - F_{тр} - mg\sin\alpha}{m}. \qquad (3)$$

Чтобы найти ускорение, необходимо знать силу трения: $F_{тр} = \mu N$, где $N$ — сила реакции опоры.

Из уравнения (2) находим $N = mg\cos\alpha - F\sin\beta$. Тогда сила трения равна $F_{тр} = \mu(mg\cos\alpha - F\sin\beta)$. Подставляя $F_{тр}$ в уравнение (3), получаем

$$a = \frac{F\cos\beta - \mu(mg\cos\alpha - F\sin\beta) - mg\sin\alpha}{m}. \qquad (4)$$

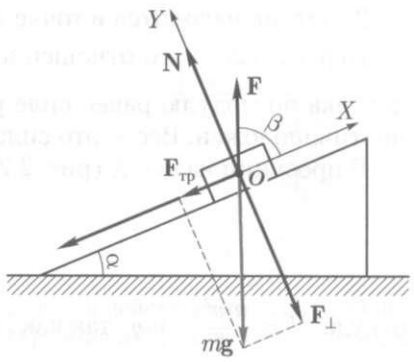



Рис. 2.20

**Вычисления:**

$$a = [200\ \text{кг/м}^2 \cdot \cos 60° - 0{,}05(1\ \text{кг} \cdot 10\ \text{м/с}^2 \cdot \cos 30° - 200\ \text{кг/м}^2 \cdot \sin 30°) - 1\ \text{кг} \cdot 10\ \text{м/с}^2 \cdot \sin 30°]/1\ \text{кг} = 5{,}4\ \text{м/с}^2.$$

**Ответ:** $a = 5{,}4$ м/с$^2$.

● **Задача 4.** Самолет описывает «мертвую петлю» в вертикальной плоскости. Определить наименьшую скорость самолета, при которой летчик в верхней точке петли не отрывался бы от кресла. Какую перегрузку испытывает летчик в нижней точке петли, если самолет движется с этой скоростью? Радиус петли 200 м.

**Дано:** $R = 200$ м; $g = 10$ м/с$^2$; $m = 70$ кг.

**Найти:** $v_{min}$; $n$.

**Решение.** На летчика действуют силы (рис. 2.21, *а*):

1) сила тяжести $m\mathbf{g}$;

2) сила реакции опоры $\mathbf{N}$.

Положительное направление оси $X$ выбираем к центру окружности.

1. Летчик находится в точке $A$. В векторной форме второй закон Ньютона

$$m\mathbf{g} + \mathbf{N} = m\mathbf{a}_{цс};$$

в проекции на ось $X$

$$mg + N = ma_{цс},$$

или

$$mg + N = \frac{mv^2}{R}, \qquad (1)$$

где $a_{цс} = \frac{v^2}{R}$.

В момент отрыва летчика от опоры (кресла) $v = v_{min}$ и $N = 0$, поэтому уравнение (1) для этого момента имеет вид

$$mg = \frac{mv_{min}^2}{R},$$

откуда $v_{min} = \sqrt{gR}$.

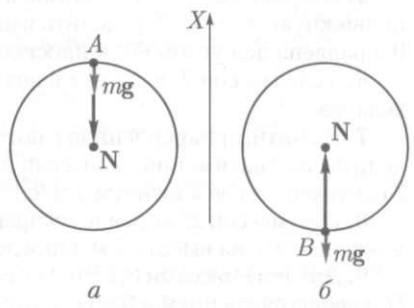



Рис. 2.21

2. Летчик находится в точке *B*.

Перегрузка — это отношение веса летчика к его силе тяжести $n = \frac{P}{mg}$. Вес летчика по модулю равен силе реакции опоры ***(P = N),*** но по направлению ей противоположен. Вес — это сила, с которой летчик действует на опору.

В проекции на ось ***X*** (рис. 2.21, ***б)*** второй закон Ньютона имеет вид

$$-mg + N = \frac{mv^2}{R},$$

откуда $N = \frac{mv^2}{R} + mg,$ так как $|N| = |P|$ то

$$P = \frac{mv^2}{R} + mg.$$

Определяем перегрузку

$$n = \frac{P}{mg} = \frac{\frac{mv^2}{R} + mg}{mg} = \frac{v^2}{Rg} + 1.$$

**Вычисления:**

$$v_{\min} = \sqrt{10\ \text{м/с}^2 \cdot 200\ \text{м}} \approx 14\ \text{м/с};$$

$$n = \frac{(14\ \text{м/с})^2}{200\ \text{м} \cdot 10\ \text{м/с}^2} + 1 = 1{,}1.$$

**Ответ:** $v_{\min}$ = 14 м/с; $n$ =1,1.

## ? *Задачи для самостоятельного решения*

**1.** При резком выдергивании моркови из земли ботва рвется, а при медленном — нет. Почему?

2. Может ли скорость тела изменяться мгновенно?

3. С одинаковым ли ускорением будет двигаться тело массой *m* в двух случаях (рис. 2.22). Нить невесома, нерастяжима.

4. Молекула массой $5{,}3 \cdot 10^{-26}$ кг, летящая нормально к стенке сосуда со скоростью 600 м/с, ударяется о стенку и упруго отскакивает от нее. Определить импульс, полученный стенкой.

5. Шар массой 0,15 кг, двигаясь со скоростью 10 м/с, упруго ударяется о гладкую неподвижную стенку. Определить импульс, полученный стенкой, если скорость шара была направлена под углом 60° к плоскости стенки.

6. Тело массой 2 кг падает в воздухе с ускорением 8 м/с$^2$. Найти силу сопротивления воздуха.

**7.** На нити, прикрепленной к потолку кабины лифта, подвешен груз массой 0,5 кг. Определить силу натяжения нити, если лифт: 1) покоится; 2) поднимается с ускорением 2 м/с$^2$; 3) опускается с ускорением 2 м/с$^2$.

8. Груз массой 25 кг равноускоренно поднимают с помощью веревки вертикально вверх в течение 10 с на высоту 5 м. Определить силу натяжения веревки.

9. Два тела массами 0,1 и 0,3 кг соединены нитью и перекинуты через невесомый блок. Пренебрегая трением в блоке, найти: 1) ускорение, с которым движутся тела; 2) силу натяжения нити.

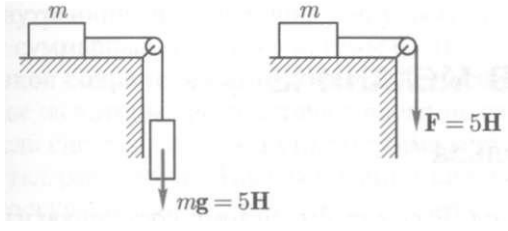



Рис. 2.22

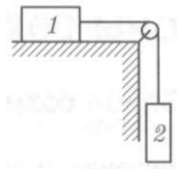



Рис. 2.23

**10.** На брусок массой 4 кг в горизонтальном направлении действует сила 20 Н. Определить ускорение, с которым движется брусок, если коэффициент трения бруска о поверхность 0,5.

**11.** Груз перемещается по горизонтальной плоскости под действием силы 294 Н, направленной под углом 30° к горизонту, с ускорением 5,9 м/с$^2$. Коэффициент трения груза о плоскость 0,1. Определить массу груза.

**12.** Два тела массами 0,5 и 0,7 кг, связанные невесомой нерастяжимой нитью, лежат на горизонтальной поверхности. На груз массой 0,5 кг действует горизонтально направленная сила 6 Н. Определить ускорение, с которым движутся грузы, и силу натяжения нити.

**13.** Поезд массой 1 000 т останавливается при торможении за 20 с, пройдя при этом расстояние 150 м. Найти начальную скорость поезда и силу торможения, если он двигался равнозамедленно.

**14.** Тело равномерно движется вниз по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30°. Найти коэффициент трения тела о плоскость.

**15.** Невесомый блок укреплен на конце стола (рис. 2.23). Тела равной массы по 0,5 кг соединены нитью и перекинуты через блок. Коэффициент трения первого тела о стол равен 0,2. Найти: 1) ускорение, с которым движутся тела; 2) силу натяжения нити.

**16.** Молот массой 200 кг падает с высоты 2 м на наковальню. Длительность удара 0,01с. Определить среднее значение силы удара.

**17.** Автомобиль массой 5 • 10$^3$ кг движется со скоростью 36 км/ч по выпуклому мосту. С какой силой он давит на мост в его верхней части, если радиус кривизны моста 50 м?

**18.** Ведро с водой вращается в вертикальной плоскости на веревке длиной 60 см. С какой наименьшей скоростью нужно вращать ведро с водой, чтобы вода из него не выливалась?

**19.** Определить радиус петли Нестерова, если, совершая ее, летчик давит на сидение кресла самолета в нижней точке с силой 7,1 кН. Масса летчика 80 кг, скорость самолета 140 м/с.

**20.** Какую перегрузку испытывает космонавт, вращающийся в горизонтальной плоскости на центрифуге радиусом 6 м с угловой скоростью 4,05 с$^{-1}$? Чему равна максимальная перегрузка, если эта центрифуга вращается в вертикальной плоскости с той же скоростью?

**21.** Определить силу притяжения между Солнцем и Землей.

**22.** На каком расстоянии от центра Земли расположено тело, которое будет притягиваться Землей и Луной с одинаковой силой? Радиус Земли 6,4 • 10$^6$ м, среднее расстояние между центрами Земли и Луны 3,84 • 10$^8$ м.

**23.** Определить ускорение свободного падения на высоте 100 км от поверхности Земли.

**24.** На какой средней высоте над поверхностью Земли вращается по круговой орбите искусственный спутник, если он движется со скоростью 8 • 10$^3$ м/с?

**25.** Определить массу Солнца, если период обращения Марса вокруг Солнца 687 суток, а среднее расстояние между их центрами 228 млн км.

**Ключевые слова:** *законы Ньютона, сила, масса, импульс, закон всемирного тяготения, сила тяжести, вес, сила трения, сила упругости, гравитационные силы.*

Глава 3

# ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

## 3.1. Закон сохранения импульса

**Изменение импульса системы тел.** Рассмотрим систему, состоящую из двух тел, например двух звезд.

Силы взаимодействия между телами, входящими в систему (между звездами), называются ***внутренними силами.*** Внутренние силы будем обозначать символом $\mathbf{F}_{ik}$. Здесь первый индекс $i$ обозначает номер тела, на которое действует сила $\mathbf{F}_{ik}$, а второй индекс $k$ — номер тела, со стороны которого действует сила $\mathbf{F}_{ik}$.

По третьему закону Ньютона:

$$\mathbf{F}_{ik} = -\mathbf{F}_{ik}. \tag{3.1}$$

Силы воздействия на тела данной системы (две звезды) со стороны тел, не входящих в эту систему (например, соседние космические тела), называются ***внешними силами.***

Равнодействующую всех внешних сил, действующих на **i**-е тело системы, будем обозначать $\mathbf{F}_i$.

Для каждого тела, входящего в систему, запишем второй закон Ньютона (2.17):

$$\frac{\Delta(m_1\mathbf{v}_1)}{\Delta t} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_1;$$

$$\frac{\Delta(m_2\mathbf{v}_2)}{\Delta t} = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_2. \tag{3.2}$$

Сложив левые и правые части уравнений, получим

$$\frac{\Delta(m_1\mathbf{v}_1)}{\Delta t} + \frac{\Delta(m_2\mathbf{v}_2)}{\Delta t} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_2.$$

Учитывая, что $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$, имеем

$$\frac{\Delta(m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2)}{\Delta t} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2,$$

$$\frac{\Delta\mathbf{p}}{\Delta t} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2, \tag{3.3}$$

где $\mathbf{p} = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2$ — суммарный импульс системы двух тел.

Из соотношения (3.3) следует, что *изменение суммарного импульса системы тел определяется векторной суммой внешних сил, действующих на эту систему.*

Внутренние силы, изменяя импульсы отдельных тел системы (3.2), не изменяют суммарный импульс системы (3.3).

**Закон сохранения импульса.** ***Замкнутая система*** — это система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы.

Если система тел замкнута, то сумма всех внешних сил, действующих на систему тел, равна нулю. Так как внешние силы не действуют ни на одно тело системы, то в уравнении (3.3) $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{0}$, тогда

$$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = 0, \text{ или } \Delta \mathbf{p} = 0, \Delta t \neq 0.$$

Таким образом, независимо от продолжительности интервала времени $\Delta t$ импульс системы тел в начале и конце этого интервала времени будет один и тот же, следовательно, $\mathbf{p} = \text{const}$ или

$$m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 = \text{const}. \qquad (3.4)$$

Соотношение (3.4) выражает закон сохранения импульса.

***Закон сохранения импульса:*** **в инерциальной системе отсчета суммарный импульс замкнутой системы тел с течением времени не изменяется.**

Импульс системы равен произведению массы $m$ системы на скорость ее центра масс $\mathbf{v}_C$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}_C. \qquad (3.5)$$

Для замкнутой системы тел $\mathbf{p} = m\mathbf{v}_C = \text{const}$, так как $m = \text{const}$, следовательно,

$$\mathbf{v}_C = \text{const}. \qquad (3.6)$$

*В инерциальной системе отсчета центр масс замкнутой системы тел движется прямолинейно и равномерно.*

Векторному уравнению (3.4) соответствуют два уравнения для проекций на оси прямоугольной декартовой системы координат:

$$m_1 v_{x1} + m_2 v_{x2} = \text{const};$$
$$m_1 v_{y1} + m_2 v_{y2} = \text{const}.$$

Все реальные системы не являются замкнутыми, потому что на тела системы действуют как силы тяжести, так и различные силы сопротивления, например трения.

В некоторых случаях закон сохранения импульса можно применять и для незамкнутых систем тел, если внешние силы, действующие на любое тело системы, уравновешиваются, т. е. сумма всех внешних сил равна нулю. Например, при соударении двух тел, например бильярдных шаров, можно применять закон сохранения импульса, так как силы тяжести $m_1\mathbf{g}_1$ и $m_2\mathbf{g}_2$ и силы реакции $\mathbf{N}_1$ и $\mathbf{N}_2$ уравновешиваются (рис. 3.1). Силой трения качения можно пренебречь в силу ее малости.

Если проекция суммы всех внешних сил на какую-либо координатную ось равна нулю, то име-

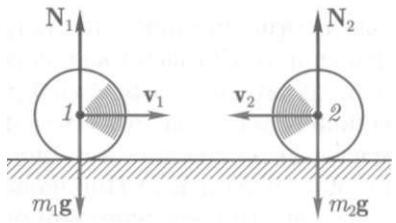


Рис. 3.1

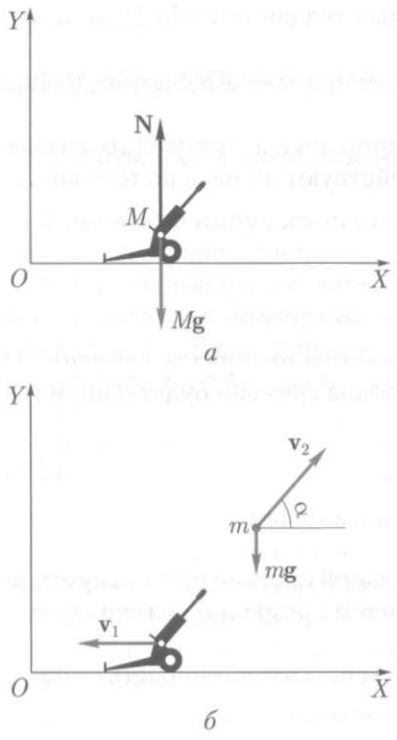



Рис. 3.2

ет место закон сохранения проекции импульса незамкнутой системы на данную координатную ось.

Рассмотрим пример. Пушка стоит на платформе. Масса системы пушка - снаряд равна $M$ (рис. 3.2, *а).* После выстрела снаряд массой $m$ летит со скоростью $v_2$, направленной под углом **а** к горизонту, пушка при этом откатывается со скоростью $\mathbf{v}_1$ (рис. 3.2, *б).* Модуль скорости $|v_x|$ может быть определен из закона сохранения проекции импульса на координатную ось $X$, так как проекция внешней силы — силы тяжести снаряда mg на ось $X$ — равна нулю. До выстрела скорость v системы пушка - снаряд равнялась нулю, импульс системы $M\backslash = 0$, поэтому $0 = (M-m)v_{x1} + mv_{x2}$. Учитывая, что $v_{x2} = v_2 \cos\alpha$, имеем $v_{x1} = |\mathbf{v}_1| = -\dfrac{mv_2 \cos\alpha}{M-m}$.

Знак «минус» означает, что при выстреле в положительном направлении оси $X$ скорость пушки направлена в противоположную сторону (см. рис. 3.2, *б).* Пушка смещается в направлении скорости — возникает «отдача». Модуль скорости $|\mathbf{v}_1|$ зависит от массы пушки *(M - m):* чем больше масса пушки, тем меньше $|\mathbf{v}_1|$. Чтобы уменьшить отдачу, охотник при выстреле прижимает ружье к плечу, так как масса системы ружье - пуля около 6 кг, а системы охотник - ружье - пуля более 60 кг.

Если происходят быстрые взаимодействия типа взрывов или ударов, то изменения импульсов отдельных тел системы происходят под действием внутренних сил, внешние силы — силы тяготения, трения — не успевают изменить импульс системы.

## 3.2. Реактивное движение

**Определение** реактивного движения. Закон сохранения импульса лежит в основе теории реактивного движения.

***Реактивное движение*** — движение, возникающее при отделении от тела некоторой его части с определенной скоростью относительно тела.

Примером реактивного движения является движение ракеты. При запуске ракеты происходит истечение продуктов сгорания топлива с некоторой скоростью $\boldsymbol{v}_x$ относительно ракеты (рис 3.3). Импульс продуктов сгорания $\mathbf{p}_1$ направлен «вниз». Согласно закону сохранения импульса, ракета будет иметь такой же по модулю импульс $\mathbf{p}_2$, но направленный в противоположную сторону — «вверх». В полете масса ракеты с течением времени убывает. Динамика тел переменной массы была создана в конце XIX в. русским профессором И. В. Мещерским (1859-1935) и К.Э.Циолковским (1857-1935). Приведем без доказательства формулу Циолковского для определения максимальной скорости $v_{max}$, которую получит ракета по израсходовании всего топлива:

$$v_{\max} = 2{,}3 v_1 \lg \frac{M_0}{M_1} \quad \text{или} \quad v_{\max} = v_1 \ln \frac{M_0}{M_1},$$

где $v_1$ — скорость истечения газов; $M_0$ — масса ракеты в момент старта, т. е. с полным запасом топлива; $M_1$ — масса ракеты без топлива.

Из этой формулы следует, что увеличить $v_{\max}$ можно, если:

увеличить отношение $\frac{M_0}{M_1}$;

• увеличить $v_1$ — скорость истечения газов. Этот путь увеличения скорости ракеты был указан К. Э. Циолковским. Он предложил использовать многоступенчатые ракеты для полета в космос.



Рис. 3.3

**Историческая справка.** Основоположник теории межпланетных сообщений К. Э. Циолковский писал: «Человечество не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство». Мечта русского ученого осуществилась.

Начало космической эры ознаменовалось запуском первого искусственного спутника Земли — 4 октября 1957 г. 2 января 1959 г. стартовала космическая ракета, которая вывела на орбиту первый искусственный спутник Солнца. 14 сентября 1959 г. ракета достигла поверхности Луны и доставила туда герб Советского Союза.

Другим этапом развития космонавтики явился полет человека в космос. Космический корабль «Восток», пилотируемый Ю. А. Гагариным, 12 апреля 1961 г. совершил полет вокруг земного шара. Спустя 8 лет — 20 июля 1969 г. два американских астронавта Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин из экипажа космического корабля «Аполлон-11» совершили посадку на Луну. В настоящее время полеты в космос стали обыденным делом, появились даже космические туристы.

Большой вклад в развитие отечественной космонавтики внес выдающийся ученый, конструктор первого искусственного спутника Земли, космических кораблей «Восток» и «Восход» - С.П.Королев (1906- 1966).

## 3.3. Работа силы

**Элементарная работа силы.** Элементарной работой $\Delta A$ силы **F** на элементарном перемещении $\Delta \mathbf{r}$ называют скалярную физическую величину, равную скалярному произведению векторов силы **F** и перемещения $\Delta \mathbf{r}$:

$$\Delta A = (\mathbf{F}, \Delta \mathbf{r}). \tag{3.7}$$

Согласно определению скалярного произведения векторов:

$$\Delta A = F \Delta r \cos \alpha, \tag{3.8}$$

где $\alpha$ — угол между векторами **F** и $\Delta \mathbf{r}$ (рис. 3.4); $F$ и $\Delta r$ соответственно модули силы и перемещения.

*Работа силы* **F** *на перемещении* $\Delta \mathbf{r}$ *равна произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними.*

Единица работы — джоуль (Дж), 1 Дж = 1 кг·м$^2$/с$^2$.

1 Дж — работа, совершаемая силой 1 Н на перемещении 1 м, если направления силы и перемещения совпадают.

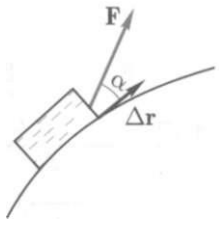


Рис. 3.4

Если на материальную точку (тело) одновременно действует несколько сил, то элементарная работа всех этих сил при перемещении точки (тела) на $\Delta\mathbf{r}$ равна

$$\Delta A = F_{\text{рез}} \Delta r \cos\alpha,$$

где $F_{\text{рез}}$ — модуль результирующей (равнодействующей) всех сил, действующих на материальную точку; $\alpha$ — угол между векторами $\mathbf{F}_{\text{рез}}$ и $\Delta\mathbf{r}$.

В зависимости от взаимной ориентации векторов F и $\Delta\mathbf{r}$, т. е. угла между ними, работа может быть:

• положительной $(\Delta A > 0)$, если $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, так как косинусы острых углов положительны;

• отрицательной $(\Delta A < 0)$, если $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, поскольку косинусы тупых углов отрицательны;

• равной нулю $(\Delta A = 0)$, если $\alpha < \frac{\pi}{2}$, так как $\cos\frac{\pi}{2} = 0$

*Сила, перпендикулярная перемещению, работу не совершает.* Например, не совершает работу сила тяжести при движении тела по горизонтальной плоскости.

Вследствие того что понятия покой и движение относительны, т. е. тело, покоящееся в одной системе отсчета, будет перемещаться в другой, движущейся относительно первой, *значение элементарной работы зависит от выбора системы отсчета.*

В общем случае вычисление работы силы на конечном перемещении очень сложно. Но если сила постоянна (F = const), а траектория тела прямолинейна $(\alpha = \text{const})$ (рис. 3.5), то, согласно (3.8), работа силы F при перемещении тела из точки ***A*** в точку ***B*** равна:

$$A = Fr_{AB}\cos\alpha = FS_{AB}\cos\alpha,$$

так как при прямолинейном движении модуль вектора перемещения равен пути $|\mathbf{r}_{AB}| = S_{AB}$.

**Работа потенциальных сил.** К потенциальным силам относятся силы упругости и силы тяготения, которые являются переменными силами, т. е. зависящими от $\Delta\mathbf{r}$.

***Потенциальные силы*** — это силы, работа которых зависит только от начального и конечного положений движущегося тела.

Следовательно, работа потенциальных сил не зависит от формы траектории движения.

*Работа потенциальной силы при замкнутой траектории всегда равна нулю.*

***Непотенциальные силы*** — это силы, работа которых зависит от формы траектории (например, силы трения).

Если известен график зависимости $F_r = f(\Delta r)$, то работа силы на перемещении *1* — *2* равна площади фигуры *1ab2* (рис. 3.6 и 3.7).

Элементарной работе $\Delta A$ соответствует площадь криволинейной трапеции с основанием $\Delta\mathbf{r}_i$ (см. рис. 3.7).

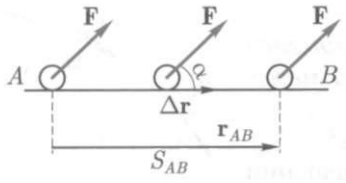



Рис. 3.5

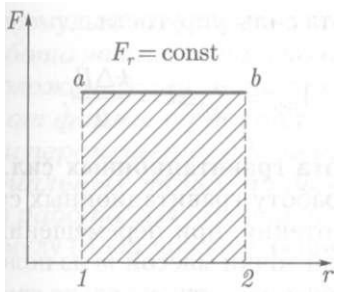



Рис. 3.6

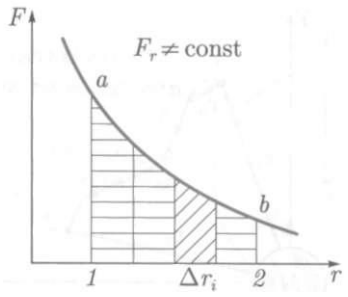



Рис. 3.7

**Работа упругой силы.** Работа упругой силы $F = k\Delta l$ ($k$ — жесткость; $\Delta l$ относительное удлинение) вычисляется двумя способами.

***Способ 1.*** График зависимости упругой силы от удлинения ***Al*** изображен на рис. 3.8.

Работа силы упругости при одномерном растяжении (сжатии), характеризующимся вектором удлинения $\Delta$l, равна площади прямоугольного треугольника (на рис. 3.8 он заштрихован), катетами которого являются $|F_{\Delta l}|$ и $|\Delta l|$:

$$A_{\text{упр}} = \frac{F_{\Delta l}\Delta l}{2} = \frac{k\Delta l^2}{2}.$$

Пусть ось ***X*** совпадает по направлению с вектором $\Delta$l; $x_1$ и $x_2$ — координаты начала и конца вектора $\Delta$l. Работа силы упругости в этом случае (рис. 3.9):

$$A_{\text{упр}} = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}. \tag{3.9}$$

Если $x_1 = x_2$, т. е. $\Delta l = 0$, — траектория замкнута, то, согласно (3.9), *при перемещении точки упругодеформируемого тела по замкнутой траектории работа силы упругости равна нулю.*

***Способ 2.*** В начале процесса одномерного растяжения (сжатия) $F_0 = 0$, так как $\Delta$l = 0, при удлинении $\Delta l$ сила упругости $F_{\Delta l} = k\Delta l$. Ее среднее значение находим как среднее арифметическое, потому что зависимость ***F от*** $\Delta l$ прямо пропорциональная:

$$F_{\text{ср}} = \frac{0 + k\Delta l}{2} = \frac{k\Delta l}{2}.$$

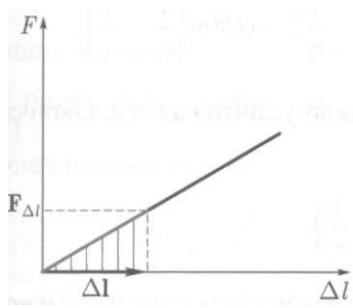



Рис. 3.8

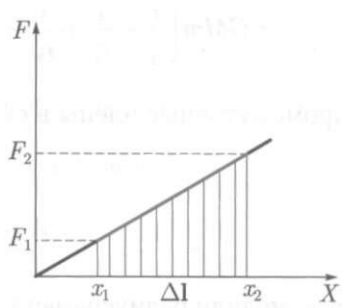
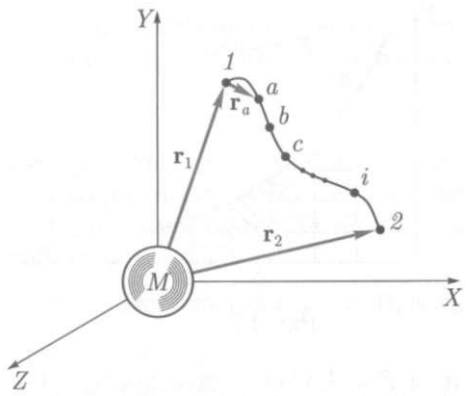



Рис. 3.9




Работа силы упругости

$$A_{\text{упр}} = F_{\text{ср}}\Delta l = \frac{k\Delta l^2}{2}. \qquad (3.10)$$

**Работа гравитационных сил.** Определим работу гравитационных сил, или сил тяготения, при перемещении материальной точки массой m из положения *1* в положение *2* относительно другой материальной точки ***M,*** помещенной в начало отсчета (рис. 3.10). При перемещении тела ***m*** сила изменяется обратно пропорционально $r^2$. Работу $A_{12}$ на участке $1-2$ определим как сумму работ на отдельных участках: $A_{12} = A_{1a} + A_{ab} + A_{bc} + \ldots + A_{i2}$.

Работа на участке $(1-a)$ $A_{1a} = F_{1a}(r_a - r_1)$, где $F_{1a}$ — средняя геометрическая сила, равная корню квадратному из произведения сил в крайних точках:

$$F_{1a} = \sqrt{F_1 F_a} = \sqrt{G\frac{Mm}{r_1^2}G\frac{Mm}{r_a^2}} = G\frac{Mm}{r_1 r_a}.$$

Работа на этом участке

$$A_{1a} = G\frac{Mm}{r_1 r_a}(r_a - r_1) = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a}\right).$$

Соответственно работа на участках (a—Ъ), (Ь — c) ... *(i—2)* будет

$$A_{ab} = GMm\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right);\quad A_{bc} = GMm\left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_c}\right);\quad A_{i2} = GMm\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Сложив полученные значения работы на отдельных участках, получим

$$A_{12} = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a}\right) + GMm\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right) + \ldots + GMm\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2}\right) =$$

$$= GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} + \ldots + \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2}\right) = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Все промежуточные члены в скобках взаимно уничтожаются. Окончательно имеем:

$$A = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right), \qquad (3.11)$$

где $r_1$ и $r_2$ — модули радиусов-векторов, характеризующих начальное и конечное положения перемещающегося тела.

Из формулы (3.11) следует:

• *работа зависит только от начального и конечного положений перемещающегося тела, т.е. не зависит от формы траектории;*

• *при перемещении одной из взаимодействующих материальных точек по замкнутой траектории* $(r_2 = r_1)$ *работа сил тяготения равна нулю.*

Формулу (3.11) можно переписать в виде

$$A = GMm\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}.$$

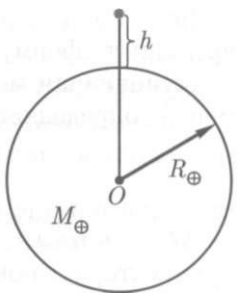


Рис. 3.11

Пусть тело ***m*** поднято на высоту ***h*** над поверхностью Земли (рис. 3.11). Тогда работа при подъеме тела массой ***m*** на высоту ***h*** с учетом того, что $r_1 = R_\oplus$, $r_2 = R_\oplus + h$, будет равна

$$A = GM_\oplus m\frac{h}{R_\oplus(R_\oplus + h)}, \tag{3.12}$$

где $M_\oplus$, $R_\oplus$ — соответственно масса и радиус Земли.

При условии $h \ll R_\oplus$ и учитывая, что модуль ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли $g = \dfrac{GM_\oplus}{R_\oplus^2}$ получим

$$A = mgh. \tag{3.13}$$

## 3.4. Мощность

**Средняя мощность.** При конструировании и эксплуатации машин необходимо учитывать не только работу, совершенную машиной, но и быстроту выполнения работы. Величина, характеризующая скорость выполнения работы, называется ***мощностью.***

***Средняя мощность*** $N_{ср}$ численно равна отношению работы $\Delta A$ к промежутку времени $\Delta t$, за который она совершается:

$$N_{\text{ср}} = \frac{A}{\Delta t}. \tag{3.14}$$

Единица мощности — ватт (Вт); $1\ \text{Вт} = 1\ \dfrac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$.

1 Вт *равен мощности, при которой работа* 1 Дж *совершается за время* 1 с.

Подставляя вместо работы $A$ ее выражение, получаем

$$N_{\text{ср}} = \frac{F\Delta S\cos\alpha}{\Delta t} = F\frac{\Delta S}{\Delta t}\cos\alpha = Fv_{\text{ср}}\cos\alpha, \tag{3.15}$$

где $v_{\text{ср}} = \dfrac{\Delta S}{\Delta t}$.

Если машина работает неравномерно, т. е. мощность изменяется с течением времени, то формула (3.14) будет определять среднюю мощность.

**Мгновенная мощность.** Мгновенная мощность — мощность в данный момент — определяется по формуле:

$$N = Fv\cos\alpha, \qquad (3.16)$$

где $v$ — мгновенная скорость.

***Мгновенная мощность*** равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора мгновенной скорости и на косинус угла между направлениями этих векторов.

*Мощность, как и работа, — величина скалярная.*

Мощность различных двигателей, в том числе и автомобильных, до сих пор измеряется в лошадиных силах: 1 л. с. = 735 Вт. Мощность человека *к,* 70 Вт.

## 3.5. Энергия

**Историческая справка.** В Природе все находится во взаимосвязи и взаимозависимости. Познавая и изучая последовательность и взаимосвязь явлений, естествоиспытатели открывают законы Природы.

Еще древнегреческий философ Аристотель в трактате «Физика» писал: «Так как природа есть начало движения и изменения, а предметом нашего исследования является природа, то нельзя оставлять невыясненным, что такое движение: ведь незнание движения необходимо влечет незнание природы». Позднее было установлено, что кроме механического движения существуют другие виды движения, напри

Термин «энергия» в современном смысле появился в начале XIX в. Английский физик Г. Юнг (1773-1829) первый определил энергию как работоспособность движущихся масс (1807).

В середине XIX в. были опубликованы работы Ю.Майера (1814-1878), Д.Джоуля (1818-1889) и Г. Гельмгольца (1821 -1894), в которых излагался закон сохранения и превращения энергии. Понятие энергии распространилось, кроме механического, на другие виды движения.



Д.Джоуль

Можно провести аналогию между превращением энергии и обменом валюты: рублей на доллары или евро; другие банкноты, другое название, но основное — покупательская способность — остается. Так и энергия, испытывая превращение, остается энергией и характеризует способность тела или системы тел совершать работу.

Взаимодействующие тела, например в гравитационном поле, способны совершать работу, следовательно, они «обладают» энергией.

Таким образом, понятия «движение и взаимодействие материальных объектов» и «энергия» связаны между собой.

Виды энергии. ***Энергия*** — скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения и взаимодействия материи.

В соответствии с различными формами движения материи говорят о разных видах энергии — механической, внутренней, ядерной и др. В процессе взаимодействия тел форма движения материи может изменяться, например при трении тела нагреваются, при этом изменяется и вид энергии, т. е. механическая энергия переходит во внутреннюю. Изменение вида энергии обусловлено действием на тело сил и связано с совершением работы.

*Энергия — физическая величина, характеризующая способность тела или системы тел совершать работу.*

Единица энергии, как и единица работы, — джоуль (Дж).

Совершая механическую работу, тело или система тел переходят из одного состояния в другое. Состояние механической системы определяется радиусами-векторами или координатами тел и их скоростями. При изменении состояния тела или системы тел их энергия меняется.

***Работа*** *A,* совершенная телом или системой тел при этом, является мерой изменения их энергии $\Delta E$:

$$A = \Delta E \text{ или } A = E_2 - E_1. \quad (3.17)$$

Запас энергии тела (системы тел) определяется наибольшей работой, которую может совершить тело (система тел).

Совершение работы силами связано с изменением энергии:

• если система тел совершает работу над внешними телами, то энергия системы тел уменьшается. Например, механические (пружинные) часы работают в течение определенного промежутка времени, так как энергия пружины расходуется на совершение работы по преодолению сил трения колесиков, стрелок, механизма часов;

• если внешние силы (внешние тела) совершают работу над системой тел, то энергия системы тел увеличивается. Чтобы механические часы работали, их надо завести, т. е. внешние силы должны совершить работу по деформации пружины часов.

***Механическая энергия*** — физическая величина, которая является функцией скоростей и взаимного расположения тел.

## 3.6. Кинетическая энергия

**Определение кинетической энергии.** Кинетическая (от греч. *kinetikos* — приводящий в движение) энергия $E_к$ материальной точки (тела) является мерой механического движения и зависит от скорости движения точки (тела) в данной инерциальной системе отсчета.

При движении тела переходят из одного состояния в другое, следовательно, изменяется их энергия. Изменение энергии равно работе внешних сил.

Вычислим работу постоянной силы $F$= const, действующей на тело массой $m$. Тело движется поступательно, прямолинейно, вдоль оси $X$, векторы силы и скорости тела сонаправлены (рис. 3.12). При перемещении тела на $\Delta x$ сила совершает работу, равную

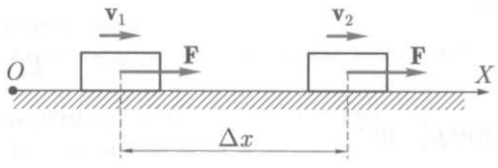



Рис. 3.12

*Кинетическая энергия тела равна квадрату импульса тела, деленному на удвоенную массу тела.*

Кинетическая энергия системы тел равна алгебраической сумме кинетических энергий всех тел, из которых состоит система:

$$E_{\text{к}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \ldots + \frac{m_i v_i^2}{2}. \qquad (3.22)$$

Кинетическая энергия тела *зависит от выбора системы отсчета,* но не может быть отрицательна, т. е. $E_{\text{к}} \geqslant 0$.

**Теорема о кинетической энергии.** На тело могут действовать различные силы — тяготения, упругости, трения или одновременно несколько сил.

Работа любой силы или результирующей сил, действующих на тело, является мерой изменения кинетической энергии тела. Ранее полученную формулу (3.19) можно переписать в виде:

$$\Delta A = E_{\text{к2}} - E_{\text{к1}} = \Delta E_{\text{к}}, \qquad (3.23)$$

где $E_{\text{к2}}$ — кинетическая энергия тела в конечном положении; $E_{\text{к1}}$ — кинетическая энергия тела в начальном положении.

***Изменение кинетической энергии тела*** $\Delta E_{\text{к}}$ ***при переходе из одного положения в другое равно работе всех сил, действующих на тело:***

- действие на тело сил, работа которых на данном перемещении положительна, приводит к увеличению кинетической энергии тела;
- действие на тело сил, работа которых на данном перемещении отрицательна, приводит к уменьшению кинетической энергии тела.

## 3.7. Потенциальная энергия

**Определение потенциальной энергии.** Тела, поднятые на некоторую высоту *h* над поверхностью Земли, при падении могут совершить работу (например, копер при забивании сваи в грунт). Следовательно, такие тела обладают энергией, которая называется потенциальной.

***Потенциальная энергия*** $E_{\text{п}}$ — это энергия, которая зависит от взаимного расположения тел или частей одного и того же тела.

Падающие на Землю тела совершают работу, потому что тело взаимодействует с Землей. Упругодеформированная пружина способна совершить работу, поскольку происходит взаимодействие между ее частями.

*Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия.*

Когда говорят о потенциальной энергии одного тела, всегда имеют в виду другие тела, с которыми данное тело взаимодействует. Поэтому иногда ее называют взаимной потенциальной энергией, или энергией потенциальных взаимодействий, например гравитационного взаимодействия.

*Понятие потенциальной энергии относится к системе взаимодействующих объектов.*

Мерой изменения потенциальной энергии при переходе системы из одного состояния в другое является работа потенциальных сил, осуществляющих взаимодействие между телами системы или частями одного и того же тела.

Работа потенциальных сил $A_{\text{п}}$ равна убыли потенциальной энергии системы $(E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}})$:

$$A_{\text{п}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} = -\Delta E_{\text{п}}, \qquad (3.24)$$

где $E_{\text{п1}}$ — потенциальная энергия системы в начальном состоянии; $E_{\text{п2}}$ — потенциальная энергия системы в конечном состоянии.

По формуле (3.24) работу потенциальных сил — сил взаимодействия — определяет разность значений потенциальной энергии $(\Delta E_{\text{п}})$, что особенно важно при решении физических задач. Поэтому для упрощения решения задачи необходимо выбрать состояние системы, в котором ее потенциальная энергия считается равной нулю. Этому состоянию соответствует нулевой уровень потенциальной энергии. В зависимости от выбора нулевого уровня потенциальная энергия может быть положительной $(E_{\text{п}} > 0)$, отрицательной $(E_{\text{п}} < 0)$ или равной нулю $(E_{\text{п}} = 0)$

Потенциальная энергия определяется взаимным расположением (расстоянием) тел в системе или частей одного и того же тела. Расстояния между телами не зависят от выбора системы отсчета, т. е. не изменяются при переходе от одной системы отсчета к другой, поэтому и *потенциальная энергия не зависит от выбора системы отсчета.*

**Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия.** Работа гравитационной силы, согласно (3.11), по перемещению тела массой ***m*** из точки *1* в точку *2,* находящихся на расстоянии $r_1$ и г, от центра Земли (рис. 3.13), равна:

$$A = \frac{GM_{\oplus}m}{r_1} - \frac{GM_{\oplus}m}{r_2}. \qquad (3.25)$$

Работа гравитационной силы может быть определена как по формуле (3.24), так и по формуле (3.25). Из сравнения этих формул следует:

$$E_{\text{п1}} = \frac{GM_{\oplus}m}{r_1}, \quad E_{\text{п2}} = \frac{GM_{\oplus}m}{r_2}.$$

Принято потенциальную энергию взаимодействия *относительно нулевого уровня отсчета считать положительной,* если при взаимодействии тела отталкиваются, например одноименно заряженные тела.

Если при взаимодействии тела *притягиваются,* например разноименно заряженные тела, или при гравитационном взаимодействии, то их потенциальная энергия *отрицательна относительно нулевого уровня отсчета.*

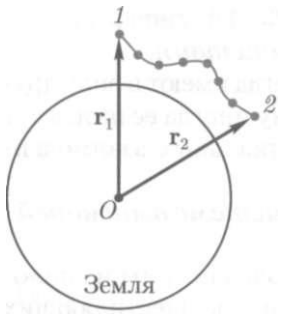


Рис. 3.13

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия системы двух материальных точек массами ***m*** и ***M,*** находящихся на расстоянии г друг от друга, равна:

$$E_{\text{п}} = -\frac{GmM}{r}. \qquad (3.26)$$

Целесообразно за нулевой уровень отсчета потенциальной энергии гравитационного взаимодействия Земли с материальными объектами массой ***m*** выбрать точку,

находящуюся на таком расстоянии от Земли, чтобы сила притяжения тела к Земле стремилась к нулю:

$$F = G\frac{M_\oplus m}{r^2} \to 0, \text{ если } r \to \infty.$$

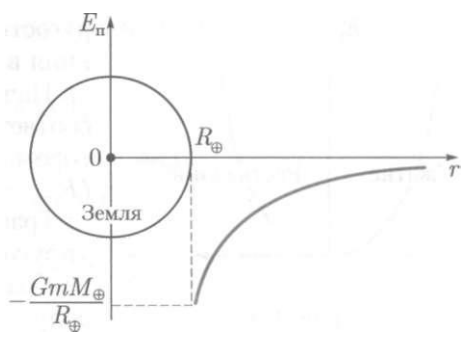


Рис. 3.14

Следовательно,

• начало отсчета потенциальной энергии находится на бесконечно большом расстоянии от центра Земли;

• на поверхности Земли $(r = R_\oplus)$ потенциальная энергия гравитационного взаимодействия минимальна и равна $E_п = -\frac{GmM_\oplus}{R_\oplus}$.

Таким образом, минимальная потенциальная энергия у тела, находящегося на поверхности Земли.

График зависимости потенциальной энергии системы тело - Земля от расстояния между телом и центром Земли изображен на рис. 3.14.

Работа силы тяжести вблизи поверхности Земли $(h \ll R_\oplus)$ определяется по формуле (3.13), следовательно, *тело, поднятое на высоту h относительно поверхности Земли, обладает потенциальной энергией:*

$$E_п = mgh. \tag{3.27}$$

**Потенциальная энергия упругодеформированного тела.** Деформация сжатия (растяжения) происходит под действием внешних сил. В упругодеформированных телах возникают силы упругости — потенциальные силы, которые препятствуют деформации тела. Их действие таково, что они стремятся вернуть тело в начальное (недеформированное) состояние равновесия. При этом силы упругости совершают работу (см. формулу (3.10))

$$A_{упр} = \frac{k\Delta l^2}{2},$$

где $\Delta l = l - l_0$; $l_0$, $l$ — длина тела, например пружины (рис. 3.15), соответственно в недеформированном и деформированном состояниях.

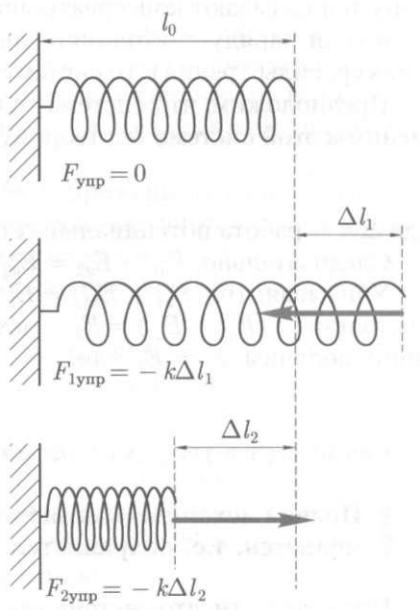


Рис. 3.15

В соответствии с (3.24) *потенциальная энергия упругих взаимодействий равна:*

$$E_п = \frac{k(\Delta l)^2}{2}. \tag{3.28}$$

Потенциальная энергия упругодеформированного тела равна работе силы уп-

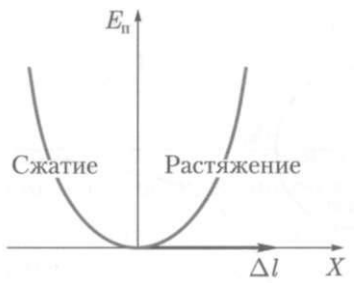



Рис. 3.16

ругости при переходе из деформированного состояния в недеформированное состояние.

Начало отсчета потенциальной энергии ($E_п = 0$) соответствует такому состоянию системы, при котором сила упругого взаимодействия равна нулю ($F_{упр} = 0,\ l = l_0,\ \Delta l = 0$)

График зависимости потенциальной энергии $E_п$ упругодеформированного тела от удлинения $\Delta l$ изображен на рис. 3.16 и представляет собой параболу.

Начало координат соответствует положению равновесия: $\Delta l = 0;\ E_п = 0$. Правая ветвь параболы отображает изменение потенциальной энергии при растяжении ($\Delta l > 0$, так как $l > l_0$); левая ветвь — при сжатии ($\Delta l < 0$, так как $l < l_0$)

## 3.8. Закон сохранения полной механической энергии

**Полная энергия тела.** ***Полная механическая энергия тела (системы тел)*** равна сумме кинетической и потенциальной энергий всех тел, входящих в систему,

$$E = E_к + E_п. \tag{3.29}$$

В зависимости от сил, действующих на тела, входящие в систему, различают консервативные и неконсервативные системы тел:

• если внутренние и внешние силы, действующие на тела системы, являются потенциальными (например, гравитационными или упругими силами), то систему тел называют консервативной;

• если наряду с потенциальными действуют и непотенциальные силы (например, силы трения), то систему тел называют неконсервативной.

Предположим, что система тел является замкнутой и консервативной. Применим к этой системе тел теорему о кинетической энергии (3.23):

$$\Delta A = E_{п1} - E_{п2},$$

где $\Delta A$ — работа потенциальных сил, равная убыли потенциальной энергии.

Следовательно, $E_{п1} - E_{п2} = E_{к2} - E_{к1}$ или $E_{п1} + E_{к1} = E_{п1} + E_{п2}$.

Учитывая, что $(E_{п1} + E_{к1}) = E_1$ — механическая энергия системы в начальном состоянии, а $(E_{п2} + E_{к2}) = E_2$ — механическая энергия системы в конечном состоянии, получим: $E_1 = E_2$, или

$$E = \text{const}. \tag{3.30}$$

Формула (3.30) выражает *закон сохранения полной механической энергии.*

> **Полная механическая энергия замкнутой консервативной системы не изменяется, т.е. сохраняется.**

Предположим, что система тел является неконсервативной. В этом случае работу сил, действующих на систему, можно представить как сумму работ потен-

циальных,$\Delta A_{\text{п}}$ и непотенциальных $\Delta A_{\text{нп}}$ сил. Применив теорему о кинетической энергии, получим

$$E_{\text{к1}} - E_{\text{к2}} = \Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{нп}}.$$

Учитывая, что $\Delta A_{\text{п}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}$, выражение примет вид

$$E_{\text{к2}} - E_{\text{к1}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} + \Delta A_{\text{нп}}.$$

$$(E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}) - (E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}) = \Delta A_{\text{нп}}.$$

Учитывая, что $(E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}) = E_2$, а $(E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}) = E_1$, получим

$$E_2 - E_1 = \Delta A_{\text{нп}}. \tag{3.31}$$

*Изменение полной механической энергии системы равно работе внутренних непотенциалъных сил* (например, замкнутая система, в которой наряду с потенциальными силами действуют и силы трения). Работа сил трения при движении системы уменьшает ее кинетическую энергию и, следовательно, механическая энергия системы уменьшается, переходя в энергию других немеханических форм движения материи.

**I Закон сохранения энергии — это универсальный закон природы.**

**Законы сохранения — фундаментальные законы природы.** * Законы сохранения являются фундаментальными законами природы по следующим причинам:

• позволяют решать ряд сложных задач без рассмотрения действующих на тела сил и не прослеживая движения системы тел. К таким задачам относятся, например, задачи о столкновении тел. Применение законов сохранения упрощает решение многих механических задач;

• выходят далеко за рамки механики (законы сохранения, открытые в механике). В тех случаях, когда законы Ньютона неприменимы, например для описания движения электронов в атоме, законы сохранения механических величин не теряют своего значения. Механические величины — масса, импульс, энергия — являются всеобщими в физике;

• «работают» в микро-, макро- и мегамире, т. е. применимы к системам всех материальных объектов, независимо от их размеров: элементарным частицам, макротелам (обычных для нас размеров) и к космическим телам. Законы сохранения играют центральную роль в физике, особенно при изучении атомов и элементарных частиц;

• помогают совершать новые открытия (например, предсказано существование элементарной частицы — *нейтрино,* она не обладает массой покоя, нейтральна — электрический заряд равен нулю, движется со скоростью света и имеет колоссальную проникающую способность. Планета Земля для нейтрино просто прозрачна. Теоретическое предсказание нейтрино на основании закона сохранения энергии было сделано в 1930 г. швейцарским физиком В.Паули (1900 — 1958). Экспериментальное открытие нейтрино свершилось спустя 26 лет после появления мощных источников нейтрино-ядерных реакторов;

• связаны с однородностью времени, однородностью и изотропностью пространства.

## 3.9. Применение законов сохранения

**Историческая справка.** Изучение столкновения тел или ударов[1] сыграло большую роль в физике. В 1666 г. Лондонское Королевское общество объявило конкурс на лучшую работу по изучению столкновения тел. Так как детально проследить, что происходит за краткий миг соударения тел, невозможно, необходимо было найти величины, остающиеся неизменными при соударениях. Результат поисков оказался удивительным: нидерландский ученый Х. Гюйгенс и английские физики Дж. Уоллис и К. Рен открыли закон сохранения импульса; Гюйгенс, полностью решивший задачу о столкновении тел, первый высказал мысль о сохранении кинетической энергии при упругих столкновениях.

**Столкновение тел.** Столкновения, или удары, тел подразделяют на абсолютно неупругие и абсолютно упругие.

***Абсолютно неупругий удар*** — столкновение тел, при котором между телами действуют непотенциальные силы и после взаимодействия тела движутся как единое целое.

***Абсолютно упругий удар*** — столкновение тел, при котором силы взаимодействия соударяющихся тел являются потенциальными и в результате взаимодействия механическая энергия системы не изменяется.

Абсолютно неупругий и абсолютно упругий удары являются физическими моделями для описания реальных столкновений.

Ограничимся рассмотрением центральных ударов, т.е. таких ударов, когда скорости тел до удара направлены вдоль линии, соединяющей центры масс тел.

**Абсолютно неупругий удар.** К абсолютно неупругим ударам можно отнести столкновение метеоритов с Землей, бабочки — со стеклом движущегося автомобиля.

Рассмотрим в качестве примера абсолютно неупругого удара столкновение грузового автомобиля с песком $M$, движущегося со скоростью $v_1$, и пули $m$, летящей со скоростью $v_2$. После центрального неупругого удара (пуля застревает в песке) их общая скорость равна $U$ (рис. 3.17). Определим эту скорость.

Эта система тел неконсервативна и незамкнута, но для нее выполняется закон сохранения проекции импульса на ось $X$, так как в этом направлении на тело не действуют силы:

$$Mv_{1x} + mv_{2x} = (M+m)U_x.$$

Или с учетом направления векторов $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ и оси $X$

$$Mv_1 + mv_2 = (M+m)U,$$

откуда

$$U = \frac{Mv_1 + mv_2}{M+m}. \qquad (3.32)$$

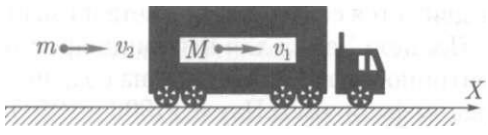



Рис. 3.17

Скорость $U$ системы $(M + m)$ после неупругого столкновения сонаправлена со скоростями $\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{v}_2$. При неупругих соударениях происходит изменение меха-

[1] ***Удар*** **— явление изменения скоростей тел за очень малый промежуток времени их столкновений.**

нической, в данном случае кинетической, энергии системы, поскольку при ударе между телами действуют непотенциальные силы:

$$\Delta E_к = E_{к2} - E_{к1};$$

$$E_{к2} = \frac{(M+m)U^2}{2};\quad E_{к1} = \frac{Mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2}.$$

Учитывая, что $U = \dfrac{Mv_1 + mv_2}{M+m}$, получим

$$\Delta E_к = \frac{M+m}{2}\left(\frac{Mv_1 + mv_2}{M+m}\right)^2 - \frac{Mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2};$$

$$\Delta E_к = -\frac{Mm}{2(M+m)}(v_1 - v_2)^2. \qquad (3.33)$$

Знак «минус» свидетельствует об уменьшении кинетической энергии; так как $\Delta E_к < 0$, то $E_{к2} < E_{к1}$.

**Абсолютно** упругий удар. К абсолютно упругим ударам можно отнести столкновение бильярдных шаров, удар шайбы о штангу ворот при игре в хоккей. Рассмотрим центральное соударение двух шаров массами $m_1$ и $m_2$, движущихся поступательно вдоль оси $X$ со скоростями $\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{v}_2$ (рис. 3.18). Определим скорость шаров $U_1$ и $U_2$ после центрального упругого удара.

Для этой системы тел выполняется закон сохранения проекции импульса на ось $X$. С учетом направления векторов $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ и оси $X$ закон сохранения импульса запишем в виде:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1U_1 + m_2U_2.$$

Система шаров консервативна, поэтому к ней применим закон сохранения механической энергии в виде:

$$\frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1U_1^2}{2} + \frac{m_2U_2^2}{2}.$$

Решив совместно уравнения, выражающие законы сохранения импульса и энергии, получим

$$U_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2x_2}{m_1 + m_2};\quad U_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}. \qquad (3.34)$$

Рассмотрим частное решение системы уравнений (3.34).

Пусть одно из тел до удара покоится. Например, в штангу ворот на хоккейной площадке массой $M$ попадает шайба массой $m$, летящая со скоростью $v_1$. Определим скорость шайбы $U_1$ и скорость ворот $U_2$ после упругого удара шайбы о штангу ворот.

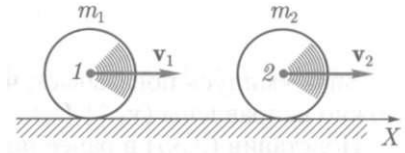


Рис. 3.18

В этом случае система уравнений, выражающих законы сохранения импульса и энергии, будет иметь вид:

$$\begin{cases} mv_1 + 0 = mU_1 + MU_2, \\ \dfrac{mv_1^2}{2} = \dfrac{mU_1^2}{2} + \dfrac{MU_2^2}{2}. \end{cases}$$

Члены уравнения, характеризующие шайбу, перенесем влево:

$$\begin{cases} mv_1 - mU_1 = MU_2, \\ \dfrac{mv_1^2}{2} - \dfrac{mU_1^2}{2} = \dfrac{MU_2^2}{2}. \end{cases}$$

Вынесем общий множитель $m$ и второе уравнение умножим на 2:

$$\begin{cases} m(v_1 - U_1) = MU_2, \\ m\left(v_1^2 - U_1^2\right) = MU_2^2. \end{cases}$$

Перепишем первое уравнение без изменений, а второе почленно разделим на первое:

$$\begin{cases} m(v_1 - U_1) = MU_2, \\ v_1 + U_1 = U_2. \end{cases}$$

Подставляя найденное значение $U_2$ в первое уравнение, имеем:

$$m(v_1 - U_1) = M(v_1 + U_1).$$

Раскроем скобки:

$$mv_1 - mU_1 = Mv_1 + MU_1.$$

Перенесем члены, содержащие $U_1$, влево

$$-mU_1 - MU_1 = Mv_1 - mv_1,$$

откуда получаем

$$-U_1(m + M) = (M - m)v_1$$

или

$$U_1 = -\frac{M - m}{M + m} v_1. \qquad (3.35)$$

Знак «минус» показывает, что скорости шайбы до и после удара противоположно направлены ($\mathbf{v}_1 \uparrow\downarrow \mathbf{U}_1$)

Подставив (3.35) в ранее полученное соотношение $v_1 + U_1 = U_2$, определяем скорость ворот после удара шайбы о их штангу:

$$U_2 = \frac{2m}{M+m} v_1. \qquad (3.36)$$

Скорость ворот и скорость шайбы до удара сонаправлены ($\mathbf{v}_1 \uparrow\downarrow \mathbf{U}_2$).

Если $M \gg m$ (например, при ударе теннисного мяча (то) о стенку (М)), то из формулы (3.35) следует

$$U_1 \approx -\frac{M}{M} v_1 \approx -v_1,$$

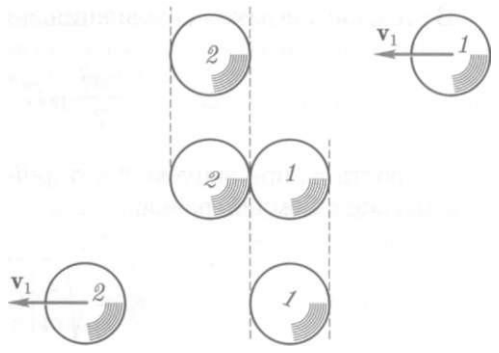



Рис. 3.19

т.е. скорость теннисного мяча после удара о стенку равна по модулю его скорости до удара, но противоположно ей направлена $\mathbf{v}_1 \uparrow\downarrow \mathbf{U}_1$.

Если ***M*** **—** то (например, два бильярдных шара, один из которых движется со скоростью $v_1$, а другой покоится), то из формул (3.35) и (3.36) следует, что при центральном упругом ударе (в бильярде называется щелчок) скорость первого шара $U_1 = 0$, скорость второго шара $U_2 = v_1$. При щелчке первый шар останавливается, а второй, ранее покоящейся, будет двигаться в направлении движения первого шара со скоростью $v_1$. В результате удара шары «обмениваются» скоростями (рис. 3.19).

**Вторая космическая скорость.** ***Вторая космическая скорость*** **—** это наименьшая скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно, преодолев гравитационное притяжение Земли (Венеры, Марса, Луны или другого космического тела), удалилось от нее на бесконечно большое расстояние.

Определим вторую космическую скорость $v_{\text{II}}$ ракеты массой то, стартовавшей с Земли $(M_\oplus)$ со скоростью $v_0$. Вблизи поверхности Земли механическая энергия ракеты будет

$$E = \frac{mv_0^2}{2} - G\frac{mM_\oplus}{R_\oplus}.$$

По мере удаления от Земли потенциальная энергия ракеты увеличивается, а кинетическая — уменьшается. В точке, находящейся на расстоянии *г* от центра Земли, механическая энергия ракеты, движущейся со скоростью $v < v_0$, будет

$$E = \frac{mv^2}{2} - G\frac{mM_\oplus}{r}.$$

На основании закона сохранения энергии

$$\frac{mv_0^2}{2} - G\frac{mM_\oplus}{R_\oplus} = \frac{mv^2}{2} - G\frac{mM_\oplus}{r}.$$

Ракета преодолеет гравитационное притяжение Земли, если потенциальная энергия взаимодействия с Землей $E_{\text{п}} \to 0$, т. е.

$$-G\frac{mM_\oplus}{r} \to 0, \quad \text{при} \quad r \to \infty.$$

В этом случае закон сохранения энергии имеет вид

$$\frac{mv_0^2}{2} - G\frac{mM_\oplus}{R_\oplus} = \frac{mv^2}{2}.$$

Скорость $v_0$, при запуске с которой ракета преодолеет гравитационное взаимодействие с Землей, равна:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{m}\left(G\frac{mM_\oplus}{R_\oplus} + \frac{mv^2}{2}\right)}.$$

Скорость $v_0$ будет минимальна, т. е. будет являться второй космической скоростью $v_0 = v_{II}$, если подкоренное выражение будет иметь минимальное значение, т. е. $\frac{mv^2}{2} = 0$,

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_\oplus}{R_\oplus}}. \qquad (3.37)$$

Вычислим по формуле (3.37) вторую космическую скорость

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ (\text{Н} \cdot \text{м}^2)/\text{кг}^2 \cdot 6 \cdot 10^{24}\ \text{кг}}{6{,}4 \cdot 10^6\ \text{м}}} \approx 11{,}2 \cdot 10^3\ \text{м/с, или } v_{II} \approx 11{,}2\ \text{км/с}.$$

Согласно (2.19), $g = G\frac{M_\oplus}{R_\oplus^2}$, поэтому

$$v_{II} = \sqrt{2gR_\oplus}. \qquad (3.38)$$

Учитывая, что первая космическая скорость [см. (2.22)] $v_I = \sqrt{gR_\oplus}$ = 7,9 км/с, вторая космическая скорость больше первой космической в $\sqrt{2}$ раз, т. е. $v_{II} = \sqrt{2}v_I$, или $v_{II} \approx 1{,}41 v_I$.

В табл. 3.1 приведены значения второй космической скорости для планет земной группы.

Таблица 3.1

| Планета | $v_{II}$, км/с | Планета | $v_{II}$, км/с |
|---|---|---|---|
| Меркурий | 4,2 | Земля | 11,2 |
| Венера | 10,3 | Марс | 5,0 |

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• ***Изменение суммарного импульса системы тел*** определяется суммой внешних тел, действующих на эту систему.

• ***Замкнутая система*** — это система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы.

• *Закон сохранения импульса:* в инерциальной системе отсчета суммарный импульс замкнутой системы тел с течением времени не изменится. Закон сохранения импульса является теоретической основой реактивного движения.

• *Работа силы* — скалярная физическая величина, равная скалярному произведению вектора силы на вектор перемещения:

$$A = (\mathbf{F}, \Delta\mathbf{r}) \quad \text{или} \quad A = F\Delta r \cos\alpha.$$

• *Потенциальные силы* — силы, работа которых зависит только от начального и конечного положений тела. Работа потенциальных сил при замкнутой траектории равна нулю.

• *Непотенциалъные силы* — силы, работа которых зависит от траектории.

• *Мощность* равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора скорости и на косинус угла между направлениями этих векторов: $N = Fv\cos\alpha$.

• *Энергия* — скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения и взаимодействия материи.

• *Кинетическая энергия при поступательном движении тела* равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости: $E_к = \frac{mv^2}{2}$.

• *Изменение кинетической энергии тела* $\Delta E_к$ при переходе из одного положения в другое равно работе всех сил, действующих на тело.

• *Потенциальная энергия* — энергия взаимодействия.

• *Полная механическая энергия системы тел* — сумма кинетической и потенциальной энергий всех тел, входящих в систему.

• *Закон сохранения энергии:* механическая энергия замкнутой консервативной системы не изменяется, т. е. сохраняется.

• *Абсолютно неупругий удар* — столкновение тел, при котором между телами действуют непотенциальные силы и после взаимодействия тела движутся как единое целое.

• *Абсолютноупругийудар* — столкновение тел, при котором силы взаимодействия соударяющихся тел являются потенциальными и в результате взаимодействия механическая энергия системы не изменяется.

• *Вторая космическая скорость* $v_{II}$ — наименьшая скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы оно, преодолев гравитационное притяжение Земли (Венеры, Марса, Луны или другого космического тела), удалилось от нее на бесконечно большое расстояние ($v_{II}$ = 11,2 км/с).

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Какие силы называются внутренними, внешними? **2.** Какая система тел называется замкнутой? Приведите примеры замкнутых систем тел. **3.** Сформулируйте закон сохранения импульса. **4.** Какое движение называют реактивным? Почему для запуска космических кораблей с поверхности Земли используются многоступенчатые ракеты? **5.** Сформулируйте определение работы силы. В каких единицах измеряется работа? **6.** При каких условиях работа силы положительная? отрицательная? равна нулю? **7.** Какие силы называются потенциальными? Приведите примеры. **8.** Чему равна работа, совершаемая упругой силой? гравитационной силой? **9.** Дайте определение мощности. В каких единицах измеряется мощность? **10.** Сформулируйте определение энергии. В каких единицах измеряется энергия? **11.** Что является мерой изменения энергии систем тел? **12.** Дайте определение кинетической энергии тела. **13.** Сформулируйте теорему о кинетической энергии. **14.** Приведите определение потенциальной энергии систем тел. Почему потенциальная энергия не зависит от выбора системы отсчета? **15.** Чему равна потенциальная энергия упругодеформированного тела? **16.** Чему равна полная механическая энергия системы тел? **17.** Дайте определения консервативных и неконсервативных систем тел. **18.** При каких условиях полная механическая энергия системы сохраняется? **19.** Чему равно изменение полной механической энергии системы? **20.** Какой удар называют абсолютно неупругим? абсолютно упругим? **21.** Почему планеты Солнечной системы имеют различную вторую космическую скорость?

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** Человек массой $m$ = 60 кг спускается на Землю по лестнице длиной $s$ = 20 м, расположенной под углом $\beta$ = 30° к горизонтальной плоскости. Найти работу силы тяжести.

**Дано:** $m$ = 60 кг; $s$ = 20 м; З = 30°; g = 10 м/с$^2$.

**Найти:** $A$.

**Решение.** *Способ 1.* Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (1)$$

Считаем, что потенциальная энергия человека на поверхности Земли равна нулю $(mgh_2 = 0)$, тогда

$$A = mgh_1, \quad (2)$$

где

$$h_1 = s\sin\beta \text{ (рис. 3.20)}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем

$$A = mgs\sin\beta.$$

**Вычисления:** $A$ = 60 кг -10 м/с$^2$ • 20 м • sin 30° = 6 • 10$^3$ Дж.

*Способ 2.* Работа силы тяжести равна (см. рис 3.20)

$$A = Fs\cos\alpha \text{ или } A = mgs\cos\alpha,$$

где а — угол между векторами силы и перемещения:

$$\alpha = 90° - \beta = 90° - 30° = 60°.$$

**Вычисления:** $A$ = 60 кг • 10 м/с$^2$ • 20 м • cos 60° = 6 • 10$^3$ Дж.

**Ответ:** $A$ = 6 кДж.

• **Задача 2.** Пуля, летящая со скоростью $v_{01}$, углубляется в мишень на $S_x$ = 0,5 см. На сколько углубится в ту же мишень пуля, летящая со скоростью $v_{02}$ = 2%?

**Дано:** $v_{01}$, $v_{02} = 2v_{01}$; $S_x$ = 0,5 см = 5 • 10"$^3$м; $v$ = 0.

**Найти:** $S_x$.

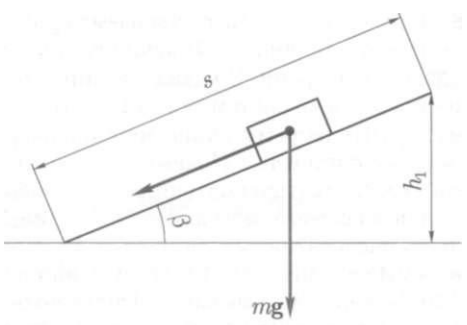



Рис. 3.20

**Решение.** Кинетическая энергия пули расходуется на совершение работы по преодолению силы сопротивления мишени. Считаем, что сила сопротивления постоянна.

Для первого случая:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_{01}^2}{2} = FS_1.$$

Для второго случая:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_{02}^2}{2} = FS_2.$$

Так как $v_{02} = 2v_{01}$ и $v = 0$, то

$$-\frac{mv_{01}^2}{2} = FS_1; \quad (1) \qquad -\frac{m \cdot 4v_{01}^2}{2} = FS_2. \quad (2)$$

Разделив (2) на (1), получим

$$\frac{m \cdot 4v_1^2 \cdot 2}{2mv_1^2} = \frac{FS_2}{FS_1} \quad \text{или} \quad 4 = \frac{S_2}{S_1}, \quad S_2 = 4S_1.$$

**Вычисления:** $S_2 = 4 * 5 \cdot 10^{-3}$ м = $2 \cdot 10^{-2}$ м = 2 см.

**Ответ:** $S_2 = 2$ см.

• **Задача** 3. Спускаясь под уклон при выключенном двигателе, автомобиль массой $m = 2 \cdot 10^3$ кг движется равномерно со скоростью $v = 10$ м/с. Определить мощность двигателя при подъеме автомобиля по такому же уклону с той же скоростью. Уклон участка, по которому движется автомобиль, равен 0,1.

**Дано:** $m = 2 \cdot 10^3$ кг; г> = 10 м/с; sin8 = 0,1; g = 10 м/с$^2$; $a = 0$.

**Найти:** $P$.

**Решение.** При равномерном движении автомобиля мощность двигателя (в данной задаче мощность обозначим буквой $P$ (обычно $N$), чтобы не путать с силой реакции опоры):

$$P = Fv,$$

где $F$ — сила тяги автомобиля; $v$ — скорость равномерного движения.

Силу $F$ определяем по второму закону Ньютона, учитывая, что $v$ = const или $a = 0$.

На автомобиль, спускающийся под уклон, действуют силы (рис. 3.21):

1) сила тяжести ***mg;***

2) сила трения $\mathbf{F}_{тр}$;

3) сила реакции опоры N.

Запишем в векторной форме второй закон Ньютона: N + mg + $F_{тр}$ — 0, или в проекции на оси:

$$\begin{cases} -F_{тр} + mg\sin\beta = 0 - \text{проекция на ось } X; \\ N - mg\cos\beta = 0 - \text{проекция на ось } Y, \end{cases}$$

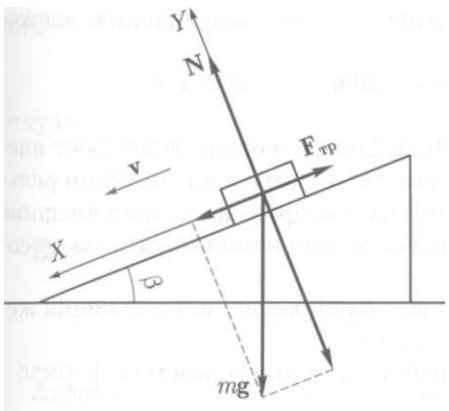



Рис. 3.21

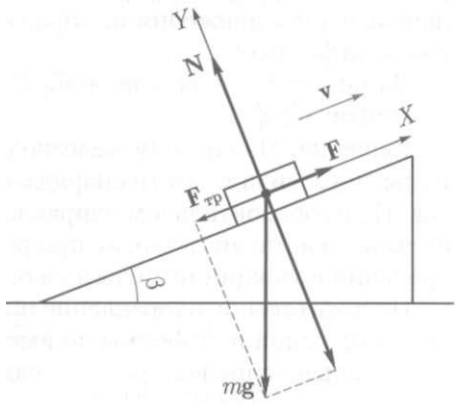



Рис. 3.22

из первого уравнения получим

$$F_{тр} = mg\sin\beta. \quad (1)$$

При движении автомобиля вверх по уклону на него действуют силы (рис. 3.22):
1) сила тяжести mg;
2) сила трения $F_{тр}$;
3) сила реакции опоры N;
4) сила тяги автомобиля F.
Запишем в векторной форме второй закон Ньютона:

$$N + mg + N + F = 0,$$

или в проекции на ось ***X.***

$$-mg\sin\beta - F_{тр} + F = 0,$$

откуда

$$F = F_{тр} + mg\sin\beta.$$

Сила трения при движении вверх и вниз по уклону для одного и того же тела одинакова, тогда с учет $F = mg\sin\beta + mg\sin\beta = 2mg\sin\beta.$

Мощность двигателя $P = Fv\cos\alpha$, но $\alpha = 0$, т. е. $\cos\alpha = 1$.
Тогда

$$P = Fv = 2mgv\sin\beta.$$

**Вычисления:**

$$P = 2 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 0{,}1 * 10 \text{ м/с} = 4 * 10^4 \text{ Вт} = 40 \text{ кВт}.$$

**Ответ:** $P$ = 40 кВт.

• **Задача** 4. С железнодорожной платформы, движущейся со скоростью $v$ = = 2 м/с, выстрелили из пушки. Общая масса платформы с пушкой $M$= 2- $10^3$кг, масса снаряда $m_щ$ = 20 кг, его начальная скорость $v_2$ = 600 м/с. Какова будет скорость платформы в момент выстрела, если направление выстрела: а) совпадает с направлением движения платформы; б) противоположно направлению движения платформы?

**Дано:** $v = 2$ м/с; $M = m_1 + m_2 = 2 \cdot 10^3$ кг; $m_2 = 20$ кг; $v_2 = 600$ м/с.

**Найти:** $v_1'$; $v_1''$.

**Решение.** На систему железнодорожная платформа-снаряд действуют внешние силы: сила тяжести снаряда, сила тяжести платформы, сила реакции рельсов. Но в горизонтальном направлении на систему платформа - снаряд внешние силы не действуют, поэтому при решении задачи можно использовать закон сохранения проекции импульса на ось ***X.***

Положительное направление оси ***X*** совпадает с направлением движения железнодорожной платформы до выстрела.

1. Направление выстрела совпадает с направлением движения платформы:

$$Mv = (M - m_2)v_1' + m_2v_2,$$

откуда

$$v_1' = \frac{Mv - m_2 v_2}{M - m_2}.$$

2. Направление выстрела противоположно направлению движения платформы:

$$Mv = (M - m_2)v_1'' - m_2 v_2,$$

откуда

$$v_1'' = \frac{Mv + m_2 v_2}{M - m_2}.$$

**Вычисления:** $v_1' = \dfrac{2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с} - 20 \text{ кг} \cdot 600 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^3 \text{ кг} - 20 \text{ кг}} \approx -4 \text{ м/с},$

$$v_1'' = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с} + 20 \text{ кг} \cdot 600 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^3 \text{ кг} - 20 \text{ кг}} \approx 8 \text{ м/с}.$$

**Анализ:** $v_1'$ = —4 м/с, следовательно, направление движения железнодорожной платформы изменилось на противоположное, скорость платформы в этом направлении 4 м/с;

$v_1''$ = 8 м/с, следовательно, скорость движения платформы увеличилась, платформа движется в прежнем направлении.

**Ответ:** $v_1'$ = —4 м/с, $v_1''$ = 8 м/с.

• **Задача 5.** Два товарных вагона движутся навстречу друг другу со скоростями $v_1$ = 0,4 м/с и г>$_2$ = 0,1 м/с. Массы вагонов соответственно равны $m_1$ = 12 т, $m_2$ = 48 т. С какой скоростью и в каком направлении будут двигаться вагоны после столкновения? Удар считать неупругим.

**Дано:** $v_1$ =0,4 м/с; $v_2$ = 0,1 м/с; $m_1$ = 12 т = 12-10$^3$кг; $m_2$ = 48 т = 48 • 10$^3$кг.

**Найти:** $v$.

**Решение.** Используем закон сохранения проекции импульса на ось *X*. Положительное направление оси *X* совпадает с направлением движения первого вагона:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2)v,$$

**откуда**

$$v = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

**Вычисления:**

$$v = \frac{12 \cdot 10^3 \text{кг} \cdot 0,4 \text{ м/с} - 48 \cdot 10^3 \text{кг} \cdot 0,1 \text{ м/с}}{12 \cdot 10^3 \text{ кг} + 48 \cdot 10^3 \text{ кг}} = 0.$$

**Анализ:** $v$ = 0, следовательно, после столкновения вагоны остановятся.

**Ответ:** $v$ = 0.

• **Задача** 6. Тело брошено под углом к горизонту со скоростью $v_0$ = 10 м/с. Какую скорость будет иметь тело на высоте $h$ = 3,2 м над горизонтом? Сопротивлением воздуха пренебречь.

**Дано:** $v_0$ = 10 м/с; $h$ = 3,2 м; $g$ = 10 м/с$^2$.

**Найти:** $v_0$.

**Решение.** К замкнутой системе Земля-тело применим закон сохранения механической энергии:

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mgh.$$

Решив уравнение относительно $v$, получим

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2gh}.$$

**Вычисления:** $v = \sqrt{(10\ \text{м/с})^2 - 2 \cdot 10\ \text{м/с}^2 \cdot 3{,}2\ \text{м}} = 6\ \text{м/с}.$

**Ответ:** $v$ = 6 м/с.

• **Задача 7.** Футбольный мяч массой $m$ — 0,4 кг летит в направлении ворот со скоростью $v_1$ = 20 м/с. Навстречу ему бежит вратарь со скоростью $v_2$ = 2 м/с. Определить кинетическую энергию мяча относительно ворот и относительно вратаря.

**Дано:** $m$ = 0,4 кг; $v_1$ = 20 м/с; $v_2$ = 2 м/с.

**Найти:** $E_{к1}$; $E_{к2}$.

**Решение.** 1. Кинетическая энергия мяча относительно ворот

$$E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2}.$$

2. Кинетическая энергия мяча относительно вратаря

$$E_{к2} = \frac{m(v_1 + v_2)^2}{2},$$

где $v_1 + v_2 = v$ — скорость мяча относительно вратаря.

**Вычисления:** $E_{к1} = \dfrac{0{,}4\ \text{кг} \cdot (20\ \text{м/с})^2}{2} = 80\ \text{Дж};$

$$E_{к2} = \frac{0{,}4\ \text{кг} \cdot (20\ \text{м/с} + 2\ \text{м/с})^2}{2} = 96{,}8\ \text{Дж}.$$

**Ответ:** $E_{к1} = 80$ Дж; $E_{к2} = 96{,}8$ Дж.

• **Задача** 8. Тело, падающее на поверхность Земли, на высоте 4,8 м имело скорость 10 м/с. С какой скоростью тело упадет на Землю? Сопротивлением воздуха пренебречь.

**Дано:** $h_1$ = 4,8 м; $v_1$ = 10 м/с; }ц = 0, g = 10 м/с$^2$.

**Найти:** $v_2$ — *?*

**Решение.** Система Земля-тело является замкнутой, поэтому к этой системе применим закон сохранения механической энергии:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

На поверхности Земли потенциальная энергия тела $E_{п2} = mgh_2 = 0$, т. е. поверхность Земли выбираем за нуль отсчета потенциальной энергии. Следовательно,

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2},$$

**откуда**

$$v_2 = \sqrt{2gh_1 + v_1^2}.$$

**Вычисления:** $v_2 = \sqrt{2 \cdot 10\ \text{м/с}^2 \cdot 4{,}8\ \text{м} + (10\ \text{м/с})^2} = 14\ \text{м/с}.$

**Ответ:** $v_2 = 14$ м/с.

• **Задача 9.** Тело брошено вертикально вверх со скоростью $v_1 = 8$ м/с. На какой высоте потенциальная энергия тела будет равна кинетической энергии? Сопротивлением воздуха пренебречь.

**Дано:** $v_1 = 8$ м/с; $E_{п2} = E_{к2}$; $g = 10$ м/с$^2$; $h_1 = 0$.

**Найти:** $h_2$.

**Решение.** Система Земля - тело является замкнутой, следовательно, полная механическая энергия системы остается постоянной. За нуль отсчета потенциальной энергии выбираем точку бросания, т. е. $h_1 = 0$.

По закону сохранения энергии:

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

По условию задачи $E_{п2} = E_{к2}$, т. е.

$$\frac{mv_2^2}{2} = mgh_2.$$

Тогда $\frac{mv_1^2}{2} = 2mgh_2$, откуда $h_2 = \frac{v_1^2}{4g}$.

**Вычисления:** $h_2 = \frac{(8\ \text{м/с})^2}{4 \cdot 10\ \text{м/с}^2} = 1{,}6\ \text{м}.$

**Ответ:** $h_2 = 1{,}6$ м.

• **Задача 10.** Автомобиль движется по горизонтальной асфальтовой дороге со скоростью 108 км/ч. Определить его тормозной путь. Коэффициент трения шин автомобиля об асфальт равен 0,4.

**Дано:** $v_1$ - 108 км/ч = 30 м/с; $v_2 = 0$, $\mu = 0{,}4$.

**Найти:** $S$.

**Решение.** Тормозной путь — это расстояние $S$, проходимое автомобилем до полной остановки, следовательно, конечная скорость $v_2 = 0$.

При торможении на автомобиль действуют силы — тяжести, реакции опоры и трения. Работа сил тяжести и реакции опоры равна нулю, так как они перпендикулярны направлению перемещения.

При торможении автомобиля работу совершают лишь силы трения, направленные противоположно перемещению (скорости) автомобиля:

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg.$$

Работа сил трения на тормозном пути отрицательна и равна:

$$A_{\text{тр}} = \mu mgS.$$

По теореме о кинетической энергии имеем

$$-\mu mgS = -\frac{mv_1^2}{2}, \text{ откуда } S = \frac{v_1^2}{2\mu g}.$$

**Анализ:** тормозной путь не зависит от массы автомобиля.

**Вычисления:** $S = \dfrac{(30 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 0{,}4 \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2} \approx 115 \text{ м}.$

**Ответ:** $S \approx 115$ м.

## Задачи для самостоятельного решения

**1.** Подъемный кран, мощность двигателя которого 15 кВт, равномерно поднимает груз со скоростью 1,5 м/с. Определить массу груза.

**2.** Человек массой 60 кг пробегает лестницу высотой 10 м за 15 с. Какую среднюю мощность развивает человек в этом случае?

3. Груз массой 10 кг падает с некоторой высоты и достигает поверхности Земли через 2,5 с. Найти работу силы тяжести.

4. Поезд массой 250 т равномерно поднимается со скоростью 30 км/ч по уклону 10 м на 1 км пути. Коэффициент трения 0,002. Определить мощность, развиваемую локомотивом поезда.

5. Мощность двигателя танка 368 кВт. С какой максимальной скоростью может равномерно подниматься танк в гору с уклоном 30°? Масса танка 15 т.

6. Конькобежец массой 50 кг, стоя на льду, бросает в горизонтальном направлении шайбу массой 300 г со скоростью 15 м/с. На какое расстояние откатится конькобежец, если коэффициент трения коньков о лед 0,01?

7. Навстречу вагону с песком, движущемуся со скоростью 36 км/ч, горизонтально летит снаряд со скоростью 500 м/с. Определить скорость их совместного движения, если снаряд застревает в песке. Масса вагона 10т, масса снаряда 100 кг.

8. Снаряд, летящий со скоростью 15 м/с, разрывается на два осколка массами 6 и 14 кг. Определить скорость большего осколка, если меньший осколок полетит со скоростью 6 м/с в направлении, противоположном направлению движения снаряда.

9. Два шара массами 6 и 4 кг движутся вдоль одной прямой со скоростями 8 и 3 м/с. С какой скоростью они будут двигаться после абсолютно неупругого удара, если первый шар догоняет второй?

**10.** Пуля массой $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ кг, летящая со скоростью 400 м/с, попадает в преграду. Средняя сила сопротивления преграды движению пули 7,6 кН. Пробьет ли пуля преграду, если ее толщина 30 см?

**11.** Тело поднимают вертикально вверх с ускорением 2 м/с$^2$. Определить массу тела, если в течение первых пяти секунд была совершена работа 1,48 кДж.

**12.** Тело массой 5 кг падает с высоты 20 м. Определить сумму потенциальной и кинетической энергий тела в точке, находящейся от поверхности Земли на высоте 7 м. Трением тела о воздух пренебречь.

**13.** Тело, падая с высоты 5,14 м, в момент соприкосновения с Землей обладает импульсом 100 кг • м/с. Определить массу тела и его кинетическую энергию в момент удара о Землю.

14. Автомобиль массой 2 т останавливается за 12 с, пройдя расстояние 60 м. Определить начальную скорость автомобиля и силу трения, совершающую работу по торможению автомобиля.

**15.** Груз массой 4 кг, падающий с высоты 5 м, проникает в грунт на глубину 0,05 м. Определить среднюю силу сопротивления грунта.

16. Из пружинного пистолета произведен выстрел вертикально вверх пулей массой 40 г. На какую высоту поднимется пуля, если пружина жесткостью 392 Н/м была сжата на 10 см? Сопротивлением воздуха и массой пружины пренебречь.

**17.** Пуля, летящая горизонтально со скоростью 500 м/с, попала в подвешенный на длинной веревке мешочек с песком и застряла в нем. На какую высоту поднимается мешочек с песком, если его масса 6 кг, а масса пули 15 г?

**18.** Пренебрегая трением, определить наименьшую высоту, с которой должен начать разбег велосипедист, чтобы он смог проехать по вертикальной петле радиусом 4 м и не оторваться от нее в верхней точке.

**19.** Искусственный спутник Земли движется по эллиптической орбите. Определить скорость движения спутника в апогее, если его скорость в перигее 8,25 км/с. Перигей орбит находится на расстоянии 200 км, а апогей — на расстоянии 400 км от поверхности Земли.

**Ключевые слова:** ***закон сохранения импульса, реактивное движение, работа силы, мощность, энергия, кинетическая энергия, потенциальная энергия, закон сохранения механической энергии.***

РАЗДЕЛ II

# ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

В физике для описания взаимодействия частиц (атомов, молекул, ионов), составляющих тело, применяют два метода: молекулярно-кинетический (статистический) и термодинамический.

Молекулярно-кинетический метод основан на представлении о том, что все вещества состоят из молекул, находящихся в хаотическом движении. Так как число молекул огромно, с помощью законов статистики можно выявить определенные закономерности для вещества в целом.

Термодинамический метод исходит из основных опытных законов — законов термодинамики — без рассмотрения внутреннего строения вещества.

***Молекулярная физика*** — раздел физики, изучающий зависимости строения и физических свойств тел от характера движения и взаимодействия между частицами, из которых состоят тела.

**И Историческая справка.** Учение о том, что все тела состоят из отдельных частиц — атомов, возникло в Древней Греции в IV в. до н. э.

Основоположником атомистической теории был философ Демокрит. Воззрения Демокрита, естественно, весьма далеки от современных представлений, но они сыграли важную роль в развитии физики.

Среди трудов крупных философов-физиков, занимавшихся учением о молекулярном строении вещества, особую роль сыграли труды великого русского ученого М. В.Ломоносова. Ученый выдвинул гипотезу о том, теплота есть движение нечувствительных частиц. Характер этого движения может быть вращательным, поступательным, колебательным. Им были рассмотрены вопросы вращательного движения молекул и объяснены тепловые явления, происходящие при этом виде движения.



М. В. Ломоносов

Он отвергал господствовавшее в то время учение о теплороде — некоторой невесомой жидкости, якобы определяющей тепловые свойства тел, и утверждал, что «теплота состоит во внутреннем движении материи».

Работа М. В. Ломоносова «Размышления о причине теплоты и холода» (1750) представляет собой набросок будущей науки — термодинамики. В ней ученый объяснил происхождение теплоты при трении.

Основные представления, высказанные Ломоносовым, были в дальнейшем развиты Л. Больцманом, Р. Клаузиусом, Д. Максвеллом, Л. Гей-Люссаком, А. Авогадро и др.

Глава 4

# ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

## 4.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

**Основные положения молекулярно-кинетической теории.** Многочисленные исследования позволили сформулировать *основные положения молекулярно-кинетической теории:*

**1. Все тела состоят из мельчайших частиц — атомов, молекул, в состав которых входят еще более мелкие элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны). Строение любого вещества дискретно (прерывисто).**

**2. Атомы и молекулы вещества всегда находятся в непрерывном хаотическом движении.**

**3. Между частицами любого вещества существуют силы взаимодействия — притяжения и отталкивания. Природа сил — электромагнитная.**

Эти положения подтверждаются явлениями диффузии, броуновского движения, особенностями строения и свойствами газов, жидкостей, твердых тел и др.

**Тепловое движение.** Опытные данные, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории, служат наглядным доказательством молекулярного теплового движения и зависимости этого движения от температуры. В отличие от механического движения нагревание или охлаждение тел может привести к изменению их физических свойств. Так, при сильном охлаждении вода превращается в лед, а при нагревании — в газ.

Течение тепловых процессов непосредственно связано со структурой вещества, поэтому тепловые явления могут быть использованы для объяснения строения вещества, а строение вещества, в свою очередь, дает нам представление о физической сущности тепловых явлений.

Чтобы объяснить эти процессы и научиться управлять ими, необходимо установить законы, которым подчиняются изменения, происходящие с телами под действием теплоты. Эти законы описывают тепловую форму движения материи.

## 4.2. Размеры и масса молекул и атомов

**Размеры молекул.** Все тела состоят из огромного числа молекул и атомов. Так как размеры атомов и молекул очень малы, то увидеть их невооруженным глазом нельзя. Только с помощью электронного микроскопа, дающего увеличение в 30 000 раз и более, были сфотографированы отдельные крупные молекулы. Методом рентгеноструктурного анализа с хорошей точностью можно определить размеры молекул. Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что наибольший линейный размер двухатомной молекулы кислорода порядка $4 \cdot 10^{-10}$ м, такой же размер имеют молекулы азота.

О том, что размеры молекул чрезвычайно малы, можно судить и без измерений. Проведем следующий простой опыт. В 1 л $(10^{-3}\ м^3)$ чистой воды разведем $1\ мм^3$ $(10^{-9}\ м^3)$ зеленых чернил, т.е. разбавим чернила в 1 000 000 раз. Увидим, что раствор имеет зеленую окраску и вместе с тем однороден. Это свидетельствует о том, что даже при значительном разбавлении в воде находится большое количество молекул красящего вещества (чернил).

Большие успехи, достигнутые в последнее время в изучении строения вещества, раскрыли перед нами новый мир — мир мельчайших частиц — микромир, который оказался очень сложным. Молекулы любого тела состоят из еще более мелких частиц — атомов, которые, в свою очередь, состоят из электронов и ядер. Ядра атомов включают в себя протоны и нейтроны — частицы, также имеющие сложное строение.

***Атомом*** называют наименьшую частицу данного химического элемента.

Каждому химическому элементу соответствуют вполне определенные атомы, сохраняющие химические свойства данного элемента.

***Молекулой*** называют наименьшую устойчивую частицу данного вещества, обладающую его основными химическими свойствами.

**Масса молекул.** Массы отдельных молекул и атомов очень малы, например абсолютное значение массы молекулы воды порядка $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Массы отдельных молекул экспериментально определяют с помо
масс-спектрометра.

В молекулярной физике принято характеризовать массы атомов и молекул не их абсолютными значениями (в кг), а относительными безразмерными величинами, называемыми ***относительной атомной массой*** $A_0$ и ***относительной молекулярной массой*** $M_0$.

По международному соглашению в качестве атомной единицы массы (а. е. м.) $m_0$ принимается $^1/_{12}$ массы изотопа углерода $^{12}C$ $(m_{0C})$:

$$m_0 = {}^1/_{12}\, m_{0C} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ кг = 1\ а.\ е.\ м.$$

Относительную молекулярную массу, или относительную массу молекулы $(M_r)$, можно определить, если абсолютное значение массы молекулы $(m_{мол}$ в кг$)$ разделить на атомную единицу массы $(1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг$)$:

$$M_r = \frac{m_{мол}}{m_0}. \qquad (4.1)$$

Аналогичной формулой определяется и относительная атомная масса $A_r$, надо лишь под $m_{мол}$ в формуле (4.1) понимать абсолютное значение массы атома $(m_{ат})$:

$$A_r = \frac{m_{ат}}{m_0}.$$

**Количество вещества.** Микроскопические тела состоят из огромного количества молекул. Так как массы отдельных молекул отличаются друг от друга, то одинаковое число молекул разных веществ имеют разную массу, например $10^{28}$ молекул водорода имеют массу 33,45 кг, а $10^{28}$ молекул кислорода — 531,45 кг. Поэтому принято сравнивать число молекул или атомов в данном веществе с числом атомов, содержащихся в 0,012 кг углерода. Относительное число атомов или молекул, содержащихся в макроскопическом теле, характеризуется физической величиной, называемой количеством вещества $\nu$.

***Количество вещества*** — это отношение числа Л' молекул (атомов) в данном макроскопическом теле к числу $N_A$ атомов в 0,012 кг углерода:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \tag{4.2}$$

Количество вещества выражают в ***молях.***

***Моль*** — количество вещества, содержащего столько же молекул (атомов), сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода.

Моль любого вещества содержит, по определению, одинаковое число молекул (атомов). Это число называют ***постоянной Авогадро:***

$$N_A = \frac{0,012 \text{ кг}}{12m_0} \text{моль}^{-1} = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \text{моль}^{-1} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Понятие моля относится к числу молекул (атомов) вещества. Например, неправильно говорить, что в баллоне содержится два моля углекислого газа $C0_2$. Нужно говорить: в баллоне содержится два моля молекул углекислого газа. Это означает, что в баллоне имеется $2 \cdot 6,02 \cdot 10^{-23}$ молекул $C0_2$, т. е. два моля атомов углерода и четыре моля атомов кислорода.

**Молярная масса.** В молекулярной физике пользуются также понятием *МОЛЯРНОЙ МАССЫ M,* которая определяется как масса одного моля вещества:

$$M = m_{\text{мол}} N_A. \tag{4.3}$$

Молярная масса выражается в ***килограммах на моль*** (кг/моль) и равна отношению массы вещества к содержащемуся в нем количеству вещества ***v;***

$$M = \frac{m}{\nu}.$$

В 1 моль любого вещества содержится $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул. Известно, что моль при нормальных условиях занимает объем $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м$^3$. Следовательно, в 1 м$^3$ любого газа при нормальных условиях содержится одинаковое число молекул:

$$N_Л = \frac{N_A}{V_0} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ моль}^{-1} \cdot \text{м}^3} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Это число получило название *постоянной Лошмидта.*

## 4.3. Броуновское движение. Диффузия

**Броуновское движение.** В 1827 г. английский ботаник Р. Броун, изучая внутреннее строение растений с помощью микроскопа, обнаружил, что частички твердого вещества в жидкой среде совершают непрерывное хаотическое движение. Аналогичное движение можно наблюдать в микроскопе, если рассматривать дым, капельки жира в воде или частички твердого тела, взвешенные в жидкости или газе. Тепловое движение взвешенных в жидкости (газе) частичек получило название ***броуновского движения.*** Было установлено, что скорость броуновских частиц зависит от их размеров и температуры. Чем выше



Рис. 4.1

температура и меньше размеры, тем быстрее движутся частицы. Причиной броуновского движения является непрерывное хаотическое движение молекул жидкости или газа, которые, беспорядочно ударяясь со всех сторон о взвешенные в жидкости (газе) частички, приводят их в движение.

Если размеры такой частички велики, она испытывает со всех сторон большое число ударов; результирующий импульс, полученный ею при соударениях, оказывается равным или близким к нулю; частичка остается практически неподвижной.

При микроскопических размерах частички сумма импульсов, полученных ею от молекул с разных сторон, может стать не равной нулю как вследствие разного числа ударов, так и вследствие того, что частичку с одной стороны могли ударить несколько молекул, обладающих в данный момент времени большими скоростями, чем молекулы, ударившие ее с другой стороны. Такая частичка начинает двигаться. Через какое-то время под действием новых соударений направление ее движения может измениться. Если наблюдать за этой частичкой, то мы увидим, что она движется по ломаной траектории (рис. 4.1). Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана А. Эйнштейном, экспериментальное подтверждение она получила в трудах французского физика Ж. Перрена.

**Диффузия.** Непрерывное движение молекул любого вещества (твердого, жидкого, газообразного) подтверждается многочисленными опытами по диффузии. ***Диффузией*** называют явление самопроизвольного проникновения одного вещества в другое. Если пахучее вещество (эфир, керосин, нафталин, духи и т.д.) внести в помещение, то через некоторое время запах этого вещества распространится по всему помещению. Это свидетельствует о том, что молекулы одного вещества без воздействия внешних сил проникают в другое. Опытным путем было установлено, что скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры. Диффузия в жидкостях происходит медленнее, чем в газах, но быстрее, чем в твердых телах, потому что чем плотнее вещество, тем ближе друг к другу расположены в нем молекулы.

## 4.4. Силы и энергия межмолекулярного взаимодействия

**Молекулярные силы.** При изучении строения вещества было установлено, что между молекулами одновременно действуют силы притяжения и отталкивания, называемые ***молекулярными силами.*** Способность твердых тел сопротивляться растяжению, особые свойства поверхности жидкости и другие явления приводят к выводу, что между молекулами действуют ***силы притяжения.*** Малая сжимаемость весьма плотных газов и особенно жидкостей и твердых тел означает, что между молекулами существуют ***силы отталкивания.*** В твердых и жидких телах силы отталкивания и притяжения действуют одновременно. Если бы этого не было, то тела не были бы устойчивыми: либо разлетались бы на частицы, либо слипались. Силы межмолекулярного взаимодействия по своей природе являются силами электромагнитного происхождения.

Строение атомов и молекул. Атомы, входящие в состав молекул, представляют собой сложную систему, состоящую из заряженных частиц — электронов, имеющих отрицательный заряд, и ядер, заряд которых положителен. Электроны около ядра в атоме удерживаются кулоновскими силами притяжения разноименных зарядов. Атом в целом электрически нейтрален. Молекулы состоят из атомов. Силы, удерживающие вместе атомы в молекуле, по своей природе являются электрическими, однако возникновение их несколько сложнее. Строгая теория молекулярных сил дается с позиций квантовой механики.

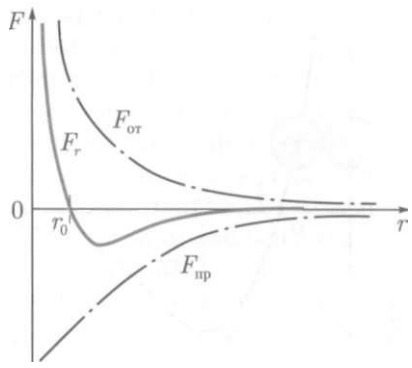


Рис. 42

***Межмолекулярное взаимодействие*** — это взаимодействие электрически нейтральных молекул или атомов.

**Зависимость молекулярных сил от расстояния между молекулами.** Силы взаимодействия зависят от расстояния между молекулами. На расстояниях, превышающих размеры молекул в несколько раз, их действие практически равно нулю. На рис. 4.2 представлена зависимость сил взаимодействия ^двух молекул от расстояния между ними г.

Между электронами одной молекулы и атомными ядрами другой действуют силы притяжения $F_{пр}$, которые условно принято считать отрицательными. Одновременно между электронами молекул и их ядрами действуют силы отталкивания $F_{от}$, которые условно считают положительными. На расстоянии $r = r_0$, как видно из рис. 4.2, результирующая сила равна нулю $(F_r = 0)$[1], т. е. силы притяжения уравновешивают силы отталкивания. Этому соответствует наиболее устойчивое расположение взаимодействующих молекул. При $r > r_0$ сила притяжения превосходит силу отталкивания, при $r < r_0$ — наоборот.

Так как силы притяжения и отталкивания действуют одновременно, то можно определить их равнодействующую, которая характеризует силу взаимодействия между молекулами. Кривая, характеризующая силу взаимодействия, позволяет дать качественное объяснение появления силы упругости при сжатии и растяжении тел. При сжатии твердого тела происходит сближение частиц. На расстоянии меньше $r_0$ возникает сила, препятствующая сближению частиц и стремящаяся вернуть частицы в первоначальное положение. При растяжении твердого тела происходит удаление частиц друг от друга на расстояние $r > r_0$; при этом начинают действовать силы притяжения между частицами, стремящиеся возвратить частицу в исходное положение $(r = r_0)$

**Зависимость энергии взаимодействия от расстояния между молекулами.** Атомы и молекулы взаимодействуют и, следовательно, обладают потенциальной энергией $E_п$.

Установим примерный характер зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними.

[1] **Более строго, под $F_r$ подразумевается проекция силы на направление вектора** г, **определяющего расстояние между центрами молекул.**

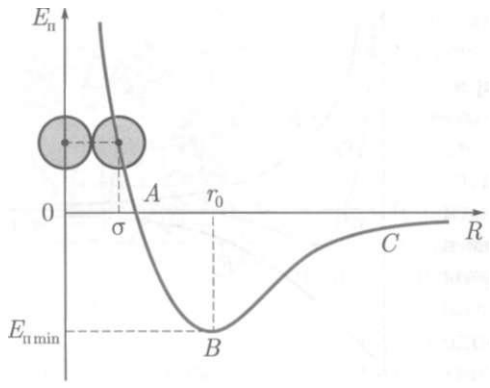



Рис. 4.3

Потенциальная **энергия считается** положительной **при** отталкивании **молекул,** отрицательной — **при** притяжении.

Потенциальную энергию тяготеющих тел, находящихся на бесконечном расстоянии друг от друга, условились считать равной нулю. При сближении молекул (рис. 4.3) потенциальная энергия их будет уменьшаться и достигнет минимального значения при $r = r_0\,(F_r = 0)$. Дальнейшее сближение молекул возможно только за счет работы, совершаемой против сил отталкивания. При этом потенциальная энергия молекул начнет резко возрастать. Итак, потенциальная энергия взаимодействия молекул имеет минимум при $r = r_0$. Следовательно,

**Положение** устойчивого равновесия молекул **соответствует** минимуму их потенциальной **энергии.**

График зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними называют ***потенциальной кривой;*** участок *ABC* ***— потенциальной ямой;*** $E_{п\,min}$ ***— глубиной потенциальной ямы;*** $\sigma$ ***— эффективным диаметром молекулы,*** определяющим размеры той области, в которую другая молекула проникнуть не может.

Как правило, межмолекулярное взаимодействие описывается потенциальной энергией взаимодействия, характеризующей состояние и многие свойства вещества. Атомы и молекулы находятся в движении и, следовательно, обладают кинетической энергией.

Соотношение между минимальной потенциальной энергией $E_{п\,min}$ и средней кинетической энергией $\langle E_к \rangle$ хаотического теплового движения определяет возможность существования того или иного агрегатного состояния вещества: ***газообразного*** $(\langle E_к \rangle \gg E_{п\,min})$***, твердого*** $(\langle E_к \rangle \ll E_{п\,min})$ и ***жидкого*** $(\langle E_к \rangle \approx E_{п\,min})$

## 4.5. Строение газообразных, жидких и твердых тел

**Газы.** Характер теплового движения молекул и атомов зависит от агрегатного состояния вещества и определяется силами молекулярного взаимодействия. Вещество может находиться в четырех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном и в виде плазмы. Качественное объяснение основных свойств вещества, находящегося в определенном агрегатном состоянии, дает молекулярно-кинетическая теория.

**Частицы газа не связаны молекулярными силами притяжения и движутся свободно, равномерно, заполняя весь предоставленный им объем.**

В газах при нормальных условиях молекулы находятся на расстояниях, во много раз превышающих размеры самих молекул. Молекулы газа движутся со скоростями порядка нескольких сотен метров в секунду. Давление внутри газа и на стенки сосуда, в котором он заключен, создается столкновениями молекул друг с другом и со стенками сосуда. При столкновениях передается импульс, который обусловливает давление газа. Вследствие того что силы молекулярного взаимодействия практически отсутствуют, газы могут легко сжиматься и неограниченно расширяться.

**Жидкости.** Это агрегатное состояние вещества, в котором наблюдается упорядоченное относительное расположение соседних частиц. Молекулы жидкости совершают колебательное движение около определенных положений равновесия. Эти колебания возможны потому, что между молекулами жидкости существует своеобразное «свободное» пространство.

Советский физик-теоретик Я. И. Френкель разработал теорию, согласно которой ***время «оседлой жизни» частицы,*** т.е. ***время колебания около положения равновесия, очень мало,*** порядка $10^{-10}-10^{-12}$ с, после чего частица переходит в новое положение равновесия и, таким образом, перемещается внутри жидкости. С повышением температуры время «оседлой жизни» молекул жидкости уменьшается. Основное свойство жидкости — ***текучесть.*** Под действием внешней силы в жидкости появляется направленность скачков частиц из одного «оседлого положения» в другое вдоль направления действия силы. Вот почему жидкость течет и принимает форму сосуда, в котором она находится.

**Твердые вещества.** Они отличаются от двух предыдущих агрегатных состояний вещества постоянством формы и объема. В твердых телах атомы и молекулы жестко связаны друг с другом, образуя пространственные кристаллические решетки, упорядоченное, периодически повторяющееся в пространстве расположение частиц. Силы взаимодействия (силы притяжения) настолько велики, что частицы твердого тела не могут удалиться от своих «соседей» на сколько-нибудь значительное расстояние. Тепловое движение частиц в твердых телах представляет собой хаотическое колебание относительно их положений равновесия. В кристаллах положениями равновесия являются ***узлы кристаллической решетки,*** т. е. точки, соответствующие наиболее устойчивому положению частиц твердого тела.

Расположение частиц в кристаллических решетках обусловливает форму и свойства кристаллов. Наряду с твердыми телами в природе встречаются и ***аморфные тела,*** у которых отсутствует кристаллическая решетка. Примером аморфных тел могут быть пластилин, стекло, смола и другие вещества. Аморфное состояние — это неустойчивое состояние, которое с течением времени переходит в кристаллическое (см. подразд. 8.1).

**Плазма.** Это еще одно агрегатное состояние вещества. ***Плазма*** — газ, в котором имеется большое количество положительно и отрицательно заряженных ионов, а также свободных электронов[1]. Она может быть получена при нагревании вещества до очень высоких температур (порядка $10^5$ К). При этих условиях вещество находится в газообразном состоянии, причем вследствие тепловых столкновений почти все атомы превращаются в ионы. Подобные условия существуют на Солнце и других звездах, где температура достигает порядка $10^9$ К и более.

[1] **Суммарный заряд электронов и ионов в каждом элементарном объеме равен (или почти равен) нулю.**

## 4.6. Скорости движения молекул и их измерение

Опыт Штерна. Метод определения скоростей молекул был предложен О.Штерном (1920). Измерение скоростей молекул было проведено на установке, схема которой представлена на рис. 4.4.

Установка состоит из двух концентрических цилиндров *A и B,* имеющих различные диаметры и общую ось. Воздух внутри цилиндров откачан, в цилиндре *A* имеется узкая щель *C.* По оси протянута платиновая проволока *P,* покрытая слоем серебра, по которой пропускают электрический ток. При нагревании проволоки током серебро испаряется, атомы его вылетают через щель *C* и попадают на внутреннюю поверхность цилиндра *B.* Если оба цилиндра неподвижны, то все атомы серебра независимо от их скорости попадут в одну и ту же точку *D* цилиндра *B.*

При одновременном вращении обоих цилиндров с угловой скоростью $\omega$ атом серебра в зависимости от скорости попадает в другую точку на стенке цилиндра *B,* например в точку *D',* так как за время пролета атомов от проволоки *P* до стенки цилиндр *B* успевает немного повернуться.

Зная расстояния *d,* на которые сместились следы атомов относительно их следов при неподвижных цилиндрах, угловую скорость вращения цилиндров, радиусы внешнего ***R*** и внутреннего г цилиндров, легко вычислить скорость молекулы.

Действительно, если скорость внешнего цилиндра *u,* а время пролета молекулы от внутреннего цилиндра до внешнего £, то расстояние на поверхности цилиндра $d = ut = \omega Rt,$ а скорость молекулы $v = (R - r)/t.$ Исключив из обоих уравнений *t,* получим

$$v = \frac{wR(R-r)}{d}. \tag{4.4}$$

Средняя скорость атомов серебра в опыте оказалась равной 650 м/с. Характерно, что слой серебра на внешнем цилиндре получился размытым. Это означает, что скорости движения атомов различны.

**Распределение молекул по скоростям.** Закон распределения скоростей молекул в газе был получен Дж. К. Максвеллом.

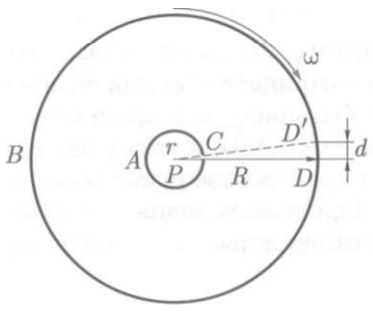


Рис. 4.4

Ввиду сложности закона здесь представлено лишь его графическое изображение (рис. 4.5). По оси ординат отложена функция распределения

$$f(v) = \frac{\Delta n}{n \Delta v},$$

где *п* — общее число молекул; $\Delta n$ — число молекул, имеющих скорости в интервале от $v$ до $v + \Delta v,$ а по оси абсцисс — скорость молекул.

Площадь заштрихованной полосы с основанием $\Delta v$ показывает, какая часть от общего числа молекул имеет скорости, лежащие в данном ин-

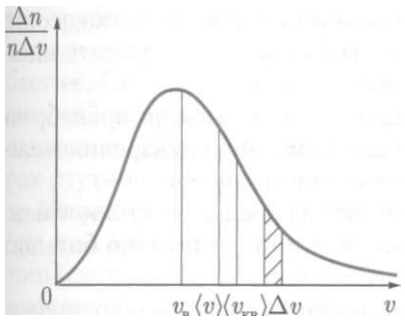



Рис. 4.5

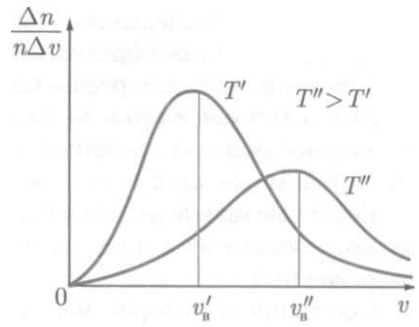



Рис. 4.6

тервале. Максимум кривой распределения, представленной на рис. 4.5, соответствует ***наиболее вероятной скорости*** $v_в$.

Большинство молекул газа движется с наиболее вероятной скоростью, тогда как число молекул, имеющих очень малые и очень большие скорости, мало. Кроме наиболее вероятной скорости $v_в$ движение молекул газа характеризуется:

а) ***средней арифметической скоростью***

$$\langle v\rangle = \frac{v_1 + v_2 + ... + v_n}{n}, \tag{4.5}$$

представляющей собой среднее арифметическое значений скоростей всех молекул;

б) ***средней квадратической скоростью***

$$\langle v_{кв}\rangle = \sqrt{v_{кв}^2} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + ... + v_n^2}{n}}, \tag{4.6}$$

равной корню квадратному из среднего арифметического значения квадратов скоростей.

Если все молекулы одинаковы по массе, то

$$v_в < \langle v\rangle < \langle v_{кв}\rangle. \tag{4.7}$$

С повышением температуры наиболее вероятная скорость возрастает, максимум распределения молекул по скоростям сдвигается в сторону больших скоростей (рис. 4.6). С повышением температуры увеличивается относительное число молекул, обладающих большими скоростями.

## 4.7. Параметры состояния идеального газа

**Идеальный газ.** В молекулярной физике и термодинамике рассматриваются системы, состоящие из большого числа частиц, т. е. макроскопические системы. Для одной частицы в отдельности нельзя указать ее координату и направление движения, определить температуру и давление. Измеримы только ***параметры состояния*** совокупности молекул, т. е. макроскопические характеристики.

Выясним вначале, каким закономерностям подчиняется поведение вещества, находящегося в газообразном состоянии. При этом будем рассматривать идеализированную модель реальных газов — идеальный газ.

***Идеальным газом*** называют такой газ, для которого можно пренебречь размерами молекул, силами молекулярного взаимодействия; соударения молекул в таком газе происходят по закону соударения упругих шаров.

Реальные газы ведут себя подобно идеальному, когда среднее расстояние между молекулами во много раз больше их размеров, т. е. при достаточно больших разрежениях.

Состояние некоторой массы газообразного вещества характеризуют зависимыми друг от друга физическими величинами, называемыми параметрами состояния. К ним относятся объем $V$, давление $p$ и температура $T$.

***Объем газа*** всегда совпадает с вместимостью того сосуда, который он занимает. Единица объема в СИ — *кубический метр* ($м^3$).

***Давление*** — физическая величина, равная отношению силы $F$, действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади $S$ этого элемента:

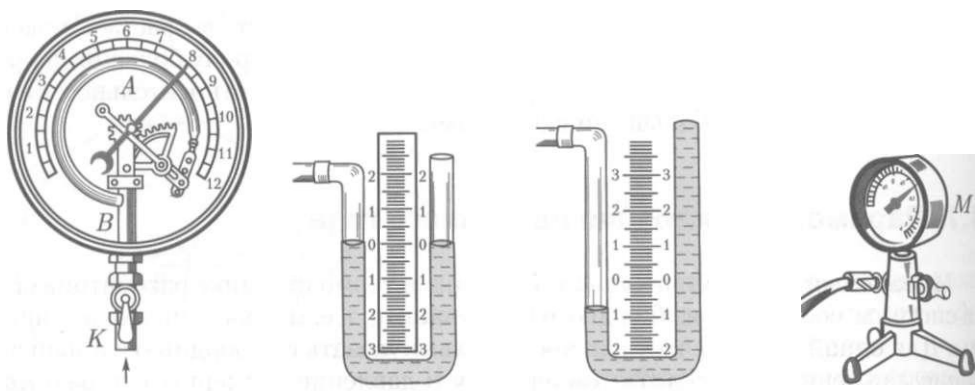
$$p = \frac{F}{S}. \qquad (4.8)$$

Единица давления в СИ — *паскаль* (1 $Н/м^2$ = 1 Па).

До настоящего времени употребляются следующие внесистемные единицы давления: *техническая атмосфера* 1 ат = 9,81 • $10^4$ Па; *физическая атмосфера* 1 атм = 1,013 • $10^5$ Па; *миллиметр ртутного столба* 1 мм рт. ст. = 133 Па.

**Измерения давления газа.** Каждая молекула газа, ударяясь о стенку сосуда, в котором она находится, в течение малого промежутка времени действует на стенку с определенной силой. В результате беспорядочных ударов о стенку сила со стороны всех молекул на единицу площади стенки быстро меняется со временем относительно некоторой (средней) величины. Приборы, измеряющие давление, называют ***манометрами*** (рис. 4.7, *а-г*). Манометры фиксируют среднюю по времени силу давления, приходящуюся на единицу площади его чувствительного элемента (мембраны) или другого приемника давления.

На рис. 4.7, *а* изображена схема устройства *металлического манометра* для измерения больших давлений. Основной его частью является изогну-




*а* *б* *в*

Рис. 4.7

тая трубка *A,* открытый конец которой припаян к трубке *B,* а закрытый — соединен со стрелкой. Газ поступает через кран *K* и трубку *B* в трубку *A* и разгибает ее. Свободный конец трубки *A,* перемещаясь, приводит в движение передающий механизм и стрелку. Шкала градуирована в определенных единицах давления: либо в Паскалях, либо в технических атмосферах, либо в миллиметрах ртутного столба.

На рис. 4.7, *б, в* показаны схемы *жидкостных манометров:* открытого (см. рис. 4.7, *б)* для измерения небольших давлений выше атмосферного и закрытого (см. рис. 4.7, *в)* для измерений давлений ниже атмосферного, т. е. небольшого вакуума[1].

Физический смысл понятия температуры будет раскрываться по мере изучения молекулярно-кинетической теории газов и основ термодинамики.

Между параметрами ***V, p, T*** существует однозначное соотношение. В общем виде это уравнение состояния. Для простых систем оно может быть записано следующим образом: ***f(p, V, T)*** — 0. С помощью уравнения состояния всегда по двум параметрам можно определить третий.

## 4.8. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

**Движение молекул.** Давление возникает в результате ударов молекул о стенки сосудов. Рассмотрим поведение одной произвольно выбранной молекулы *г* идеального газа, находящейся в сосуде, имеющем форму куба (рис. 4.8). Пусть $v_i$ — ее скорость, направленная перпендикулярно стенке сосуда, а $m_i$ — масса. При упругом ударе молекула сообщит стенке импульс $m_i v_i$, после удара ее импульс станет равным $-m_i v_i$. Следовательно, импульс молекулы изменится на $m_i v_i - (-m_i v_i) = 2m_i v_i$. По второму закону Ньютона,

$$F_i t_i = 2m_i v_i. \qquad (4.9)$$

Если в кубе, длина ребра которого равна *l,* находится *n* молекул, то вследствие беспорядочного движения молекул и равновероятности всех направлений можно считать, что п/3 молекул движется вдоль оси *X, n*/3 — вдоль оси *Y, n/*3 молекул — вдоль оси *Z.* Чтобы найти среднюю силу давления газа, следует подсчитать сумму импульсов всех молекул о стенку за определенное время. От одного до другого удара о ту же грань молекула проходит путь, в среднем равный *21.* Интервал времени между двумя этими ударами равен $t_i = 2l/v_i$. Определим теперь среднюю силу, с которой действует на одну из стенок сосуда одна молекула. В уравнение (4.9) подставим время $t_i$ между двумя ударами $F_i(2l/v_i) = 2m_i v_i$, откуда

$$F_i = \frac{2m_i v_i^2}{2l}, \text{ или } F_i = \frac{m_i v_i^2}{l}. \qquad (4.10)$$

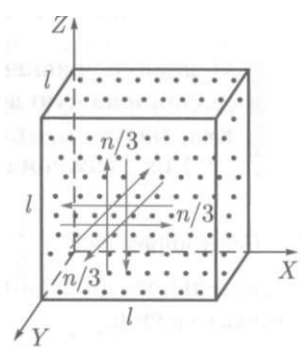


Рис. 4.8

[1] **Газ, давление которого ниже атмосферного, называют** *разреженным.* **Такое состояние называют** *вакуумом.*

**Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов.** Молекулы газа движутся с различными скоростями $(v_1, ..., v_i, ..., v_n)$; следовательно, они сообщают стенке сосуда и различные импульсы. Выберем какое-либо одно направление движения молекул (например, вдоль оси ***X).*** Между двумя противоположными гранями куба в этом направлении движется n/3 всех молекул, и суммарная сила ударов об одну грань

$$F = \frac{1}{3}\left(\frac{m_1 v_1^2}{l} + \frac{m_2 v_2^2}{l} + ... + \frac{m_n v_n^2}{l}\right). \qquad (4.11)$$

В идеальном газе $m_1 = m_2 = ... = m_n = m_0$, поэтому

$$F = \frac{1}{3}\frac{m_0}{l}\left(v_1^2 + v_2^2 + ... + v_n^2\right). \qquad (4.12)$$

Умножив и разделив правую часть равенства (4.12) на *n,* получим

$$F = \frac{1}{3}\frac{m_0 n}{l}\left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + ... + v_n^2}{n}\right). \qquad (4.13)$$

Выражение, стоящее в скобках, есть квадрат средней квадратической скорости движения молекул $\langle v_{кв}\rangle^2$. Таким образом,

$$F = \frac{1}{3}\frac{m_0 n}{l}\langle v_{кв}\rangle^2, \qquad (4.14)$$

где $F = pS$.

В рассматриваемом случае $S = l^2$; следовательно,

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{l^2} = \frac{m_0 n \langle v_{кв}\rangle^2}{3l^3}, \qquad (4.15)$$

где $n/l^3 = n/V = n_0$ — число молекул в единице объема, или концентрация молекул.

$$p = \frac{1}{3} n_0 m_0 \langle v_{кв}\rangle^2 \qquad (4.16)$$

***— основное уравнение молекулярно-кинетической теории.***

**I Основное уравнение молекулярно-кинетической теории определяет макI роскопическую величину — давление газа через концентрацию $n_0$ молеI кул, массу $m_0$ отдельных молекул и среднюю квадратическую скорость $\langle v_{кв}\rangle$ их движения.**

Если через $\langle E\rangle = \frac{1}{2} m_0 \langle v_{кв}\rangle^2$ обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения некой «средней» молекулы, то уравнение (4.16) можно записать в виде

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle E\rangle. \qquad (4.17)$$

**IДавление газа равно $^2/_3$ от средней кинетической энергии поступательного движения всех молекул, которые содержатся в единичном объеме газа.**

## 4.9. Температура и ее измерение

**Тепловое равновесие.** Понятие температуры — одно из важнейших в молекулярной физике. Даже без специальных приборов человек различает тепло и холод, более нагретые и менее нагретые тела. Степень нагретости тел характеризуют *ТЕМПЕРАТУРОЙ.* Такое определение понятия температуры имеет лишь качественный характер. Для установления количественного определения температуры необходимо ввести понятие теплового равновесия. Поясним это. Если положить нагретый металл на лед, то лед начнет плавиться, а металл — охлаждаться до тех пор, пока температуры тел не станут одинаковыми. При контакте между двумя телами происходит обмен теплотой (теплообмен), в результате которого энергия металла уменьшается, а энергия льда (при плавлении) увеличивается.

Теперь возьмем несколько тел (систему тел): нагретое железо (тело *А),* воду при комнатной температуре (тело *Б)* и лед (тело *В).* Введем условную запись, показывающую, как при теплообмене между этими телами происходит изменение энергии тел:

$$A \rightleftarrows Б \rightleftarrows B.$$

Направление стрелок указывает, от какого тела к какому передается энергия при теплообмене. Энергия при теплообмене всегда передается от тела с более высокой температурой к телу с более низкой. В конце концов наступает состояние системы тел, при котором теплообмен между телами системы будет отсутствовать. Такое состояние называют ***тепловым равновесием.***

**Тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковые температуры.**

Если система тел находится в состоянии теплового равновесия, то объем, температура ее частей и другие характеристики состояния не меняются со временем. Свойство температуры определять направление теплового обмена между телами является важнейшим в термодинамике.

**Измерение температуры.** При изменении температуры изменяются размеры тел, их объемы, электрическое сопротивление и другие свойства. В большинстве физических и химических явлений обнаруживаются зависимости от температуры. Таким образом, температуру можно определить по изменению какого-либо удобного для измерения физического свойства данного вещества.

**Для однозначного определения температуры необходим выбор термометрического тела и температурного параметра.**

В качестве термометрического тела для определенных интервалов температур можно выбрать газ (например, водород) или жидкость (ртуть, спирт). Температурным параметром у них является объем. Температурными параметрами могут быть электрическое сопротивление некоторых полупроводников и проводников, интенсивность излучения и т. д.



Рис. 4.9

**Температурный параметр должен изменяться при изменении температуры непрерывно и монотонно, т.е. он не должен иметь одинаковых значений при разных температурах.**

Чаще всего для измерения температур используют свойство жидкости изменять объем при нагревании (или охлаждении). Прибор, с помощью которого измеряется температура, называется ***термометром.***

Обыкновенный жидкостный термометр (рис. 4.9) состоит из небольшого стеклянного резервуара, к которому присоединена стеклянная трубка с узким внутренним каналом. Резервуар и часть трубки наполнены ртутью. Температуру среды, в которую погружен термометр, определяют по положению верхнего уровня ртути в трубке. Деления на шкале условились наносить следующим образом. Цифру О ставят в том месте шкалы, где устанавливается уровень столбика жидкости, когда термометр опущен в тающий снег (лед), цифру 100 — в том месте, где устанавливается уровень столбика жидкости, когда термометр погружен в пары воды, кипящей при нормальном давлении ($10^5$ Па). Расстояние между этими отметками делят на 100 равных частей, называемых градусами. Такой способ деления шкалы введен А. Цельсием. Градус по шкале Цельсия обозначают °С.

Ртутные термометры применяются для измерения температуры в области от —30 до +800 °С. Наряду с жидкостными ртутными и спиртовыми применяются электрические (термоэлементы или термометры сопротивления), газовые термометры и т.п. Показания термометров, использующих различные термометрические тела, обычно несколько различаются. Для достижения большей точности вводят также ряд других постоянных температурных точек, например температуры затвердевания различных чистых веществ (олова, свинца, золота, меди). Но точное определение температуры не должно зависеть от вещества, заполняющего термометр. С этой целью применяют термодинамическую шкалу температур.

## 4.10. Газовые законы

**Изотермический процесс. Закон Бойля - Мариотта.** Всякое изменение состояния газа называется ***термодинамическим процессом.***

**В любом термодинамическом процессе изменяются параметры, определяющие состояние газа.**

Нет ни одного процесса, при котором изменялся бы только один параметр. Изменение одного параметра ведет к изменению остальных. Процесс, при котором один из параметров остается постоянным, а два других изменяются, называют ***изопроцессом.***

Процесс, протекающий в газе, при котором температура остается постоянной, называется ***изотермическим*** («изос» — равный; «термос» — теплый).

Почти одновременно в XVII в. французским ученым Э. Мариоттом и английским ученым Р. Бойлем была установлена зависимость давления газа от его объема при постоянной температуре.

***Закон Бойля — Мариотта:*** **давление газа данной массы** *(m* = const) **при постоянной температуре изменяется обратно пропорционально его объему.**

Этот закон можно сформулировать иначе:

**п Произведение давления газа на объем для данной массы газа при постоянной температуре есть величина постоянная:**

$$pV = \text{const}. \tag{4.18}$$

Графически этот закон в координатах $p\,V$ изображается линией, называемой ***изотермой*** (рис. 4.10). Для одной и той же массы газа разные изотермы соответствуют процессам, происходящим при различных температурах.

**Изобарный процесс. Закон Гей-Люссака.** Процесс, протекающий в газе, при котором давление остается постоянным, называется ***изобарным*** («барос» — тяжелый).

Зависимость объема газа от его температуры при постоянном давлении была установлена французским физиком и химиком Л. Гей-Люссаком (1802).

Опыты, проведенные им, показали, что увеличение объема газа пропорционально приращению температуры.

***Закон Гей-Люссака:*** **объем газа данной массы при постоянном давлении возрастает линейно с увеличением температуры:**

$$V = V_0(1 + \alpha t), \tag{4.19}$$

где $V$— объем газа при температуре $t$, °С; $V_0$ — его объем при О °С; $\alpha$ — ***температурный коэффициент объемного расширения*** (для всех газов $\alpha$ = 1/273 °С).

Следовательно,

$$V = V_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right). \tag{4.20}$$

Графическая зависимость объема от температуры изображается прямой линией — ***изобарой*** (рис. 4.11). При очень низких температурах (близких к —273 °С) закон Гей-Люссака не выполняется, поэтому сплошная линия на графике заменена пунктиром.

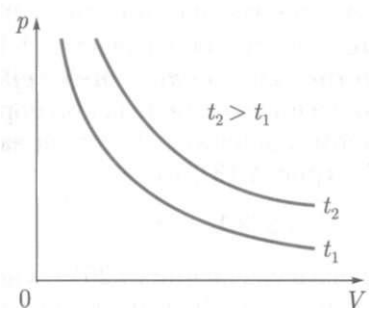



Рис. 4.10

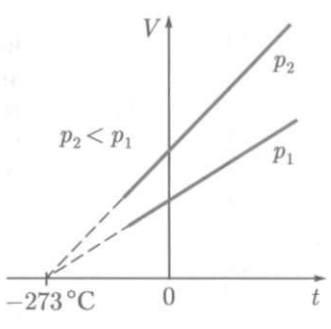



Рис. 4.11

## 4.11. Абсолютный нуль температуры. Термодинамическая шкала температуры

**Закон Шарля.** Процесс, протекающий в газе, при котором объем остается постоянным, называется ***изохорным*** («хорема» — вместимость).

Исследования зависимости давления данной массы газа от температуры при неизменном объеме были впервые проведены в 1787 г. французским физиком Ж. Шарлем.

***Закон Шарля*: давление газа данной массы при постоянном объеме возрастает линейно с увеличением температуры:**

$$p = p_0(1 + \gamma t), \qquad (4.21)$$

где $p$ — давление газа при температуре $t$, °С; $p_0$ — его давление при О °С; $\gamma$ — ***температурный коэффициент давления.*** Его значение не зависит от природы газа; для всех газов $\gamma = 1/273\ °C^{-1}$. Таким образом,

$$p = p_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right). \qquad (4.22)$$

Графическая зависимость давления от температуры изображается прямой линией — ***изохорой*** (рис. 4.12).

Абсолютный **нуль** температуры. Если изохору (см. рис. 4.12) продолжить в область отрицательных температур, то в точке пересечения с осью абсцисс имеем

$$p = p_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right) = 0.$$

Отсюда $t = -273$ °С (точнее, —273,16 °С), что соответствует нулю по термодинамической шкале. Эту температуру называют ***нулем Кельвина*** (или ***абсолютным нулем).***

Термодинамическая шкала температур была предложена английским ученым У. Кельвином. За начало отсчета на этой шкале принята температура нуль Кельвина (О К). Нуль Кельвина — это предельная температура, при которой давление идеального газа равно нулю. Температура ниже О К невозможна; О К — это самая низкая температура в природе. Существование ее предсказал М.В.Ломоносов.

За единицу температуры по термодинамической шкале принят ***келъвин*** (К); 1 К соответствует 1 °С.

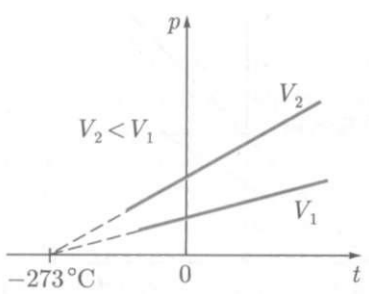


Рис. 4.12

Температура, отсчитанная по термодинамической шкале температур, обозначается $T$. Ее называют *термодинамической температурой.* Так как точка плавления льда при нормальном атмосферном давлении, принятая за О °С, равна 273,16 К[1] (рис. 4.13), то

$$T = 273{,}16 + t. \qquad (4.23)$$

Заменим теперь в уравнении (4.20) температуру, отсчитанную по шкале Цельсия, термодинамической температурой:

$$V = V_0\left(1+\frac{1}{273{,}16}t\right) = V_0\left(\frac{273{,}16+t}{273{,}16}\right) = V_0\frac{T}{273{,}16}.$$

Обозначив через $V_1$ и $V_2$ объемы газа при температурах $T_1$ и $T_2$, запишем

$$V_1 = V_0\frac{T_1}{273{,}16},\quad V_2 = V_0\frac{T_2}{273{,}16}. \qquad (4.24)$$



Рис. 4.13

Разделив почленно эти равенства, получим для изобарного процесса

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},\quad \text{или}\quad \frac{V}{T} = \text{const}. \qquad (4.25)$$

Аналогично получим соотношение между параметрами, характеризующими изохорный процесс:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},\quad \text{или}\quad \frac{p}{T} = \text{const}. \qquad (4.26)$$

В такой записи законов Гей-Люссака (4.25) и Шарля (4.26) наиболее полно раскрывается их физическое содержание.

**Для данной массы газа его объем при изобарном или давление при изохорном процессах пропорциональны термодинамической температуре.**

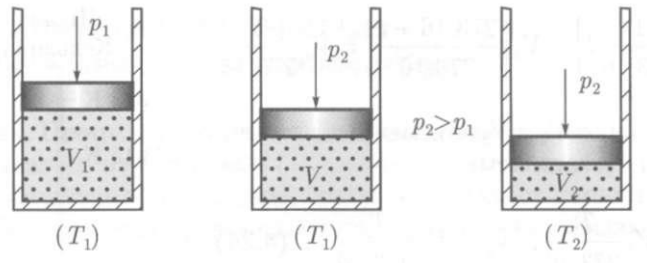
Газовые законы выполняются с высокой степенью точности для газов при небольших давлениях и не очень низких температурах.

## 4.12. Уравнение состояния идеального газа. Молярная газовая постоянная

Уравнение Клапейрона. Рассматривая изопроцессы, мы полагали, что один из трех параметров состояния оставался постоянным. На практике чаще приходится сталкиваться со случаями, когда одновременно изменяются все три параметра состояния.

Предположим, что начальное состояние газа при $m$ = const характеризуется параметрами $V_1$, $p_1$, $T_1$, а конечное — соответственно $V_2$, $p_2$, $T_2$ (рис. 4.14). Пусть переход из начального состояния в конечное происходит последовательно. Вначале изменим давление $p_1$ на $p_2$, а температуру $T_1$ оставим неизменной. Объем, который займет газ после этого перехода, обозначим $V$, тогда, по закону Бойля - Мариотта, $p_1V_1 = p_2V$, откуда

$$V = \frac{p_1V_1}{p_2}. \qquad (4.27)$$




Теперь при неизменном давлении $p_2$ уменьшим температуру с $T_1$ до $T_2$, при этом объем изменится от значения $V$ до $V_2$; следовательно, по закону Шарля, $V_2/V = T_2/T_1$, откуда

$$V = \frac{V_2 T_1}{T_2}. \tag{4.28}$$

В уравнениях (4.27) и (4.28) равны левые части; следовательно, равны и правые, тогда

$$\frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{T_1 V_2}{T_2}, \text{ или } \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \tag{4.29}$$

т. е. можно записать, что

$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \tag{4.30}$$

Выражение (4.30) называется *УРАВНЕНИЕМ КЛАПЕЙРОНА:*

**произведение давления газа данной массы на его объем пропорционально термодинамической температуре.**

**Уравнение Клапейрона - Менделеева.** Значение постоянной в уравнении (4.30) зависит от массы и молекулярной массы газа, а также от выбора единиц давления, объема и температуры. Вычислим эту постоянную для вещества, взятого в количестве 1 моль. Как следует из закона Авогадро, 1 моль любого газа при одинаковых значениях температуры и давления занимает одинаковый объем. При $T$ = 273 К ($t$ — 0 °С) и $p$ = 1,013 • $10^5$ Па 1 моль любого газа занимает объем $V_0$ = 22,4-10~$^3$ м$^3$. Подставив эти данные в уравнение (4.30), получим значение входящей в него константы, причем для 1 моль любого газа это значение одинаково. Оно получило название *МОЛЯРНОЙ (УНИВЕРСАЛЬНОЙ) ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ* (обозначается ***К).*** Найдем числовое значение ***R*** в СИ:

$$R = \frac{pV_0}{T} = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{273 \text{ К}} = 8{,}31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

Уравнение (4.30) для одного моля газа теперь можно записать так:

$$pV_0 = RT. \tag{4.31}$$

Из уравнения (4.31) легко получить уравнение для любой массы газа. Газ массой $m$ займет объем $V = V_0(m/M)$, где $M$ — масса 1 моль; т/М — число молей газа. Умножив обе части уравнения (4.31) на $m/M$, получим

$$\frac{m}{M} V_0 p = \frac{m}{M} RT.$$

Но $\frac{m}{M} V_0 = V$; следовательно,

$$pV = \frac{m}{M} RT. \qquad (4.32)$$

Это и есть уравнение Клапейрона - Менделеева для любой массы газа.

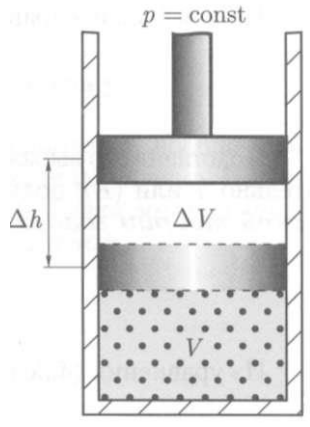


Рис. 4.15

**Молярная газовая постоянная.** Установим теперь физический смысл молярной газовой постоянной.

Предположим, что в цилиндре (рис. 4.15) под поршнем при температуре Г находится 1 моль газа, объем которого $V$. Нагреем его изобарно ($p$ = const) на 1 К, при этом поршень поднимается на высоту $\Delta h$, а объем газа увеличится на Д$V$. Запишем уравнение (4.31) для нагретого газа

$$p(V + \Delta V) = R(T + 1)$$

и вычтем из этого равенства уравнение $pV = RT$, соответствующее состоянию газа до нагревания. Получим

$$p\Delta V = R. \qquad (4.33)$$

Подставим в (4.33) значение $\Delta V = S\Delta h$, где $S$ — площадь основания цилиндра:

$$pS\Delta h = R. \qquad (4.34)$$

Но $pS$ — *FecTb* сила, а $FAh = A$ — работа по перемещению поршня, совершаемая этой силой против внешних сил при расширении газа. Таким образом, $R = A$, т. е.

**молярная газовая постоянная определяется работой, совершаемой 1 моль газа при изобарном нагревании его на 1 К.**

## 4.13. Температура — мера средней кинетической энергии хаотического движения молекул

**Термодинамическая температура.** Перейдем теперь к важнейшим следствиям, вытекающим из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов.

Возьмем 1 моль газа, который занимает объем $V$. Концентрация молекул газа $n_0 = N_A/V$, и уравнение (4.17) можно записать в виде

$$p = \frac{2}{3} \frac{N_A}{V} \langle E \rangle. \qquad (4.35)$$

Но для 1 моль справедливо уравнение состояния $pV = RT$, откуда

$$p = \frac{RT}{V}.$$

Подставив это выражение для давления в уравнение (4.35) и решив его относительно Г или *(Е),* получим *первое положение молекулярно-кинетической теории газов:*

$$T = \frac{2}{3}\left(\frac{N_A}{R}\right)\langle E\rangle. \qquad (4.36)$$

Из уравнения (4.36) следует, что

**термодинамическая температура пропорциональна средней кинетической энергии хаотического движения молекул газа.**

**Постоянная Больцмана.** Таким образом, чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура. Из уравнения (4.36), поскольку $\langle E\rangle = \frac{3}{2}\left(\frac{R}{N_A}\right)T$

го газа, следует *второе положение молекулярно-кинетической теории газов:*

**средние кинетические энергии молекул разных газов, находящихся при одинаковой температуре, равны между собой.**

Из равенства средних кинетических энергий газовых молекул следует, что при перемешивании различных газов, имеющих одинаковые температуры, не происходит преимущественной передачи энергии от молекул одного газа молекулам другого.

Величина $R/N_A = k$ в уравнении (4.36) получила название ***постоянной Больцмана*** и представляет собой газовую постоянную, отнесенную к одной молекуле:

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8{,}31\ \text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}}{6{,}02\cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}} = 1{,}38\cdot 10^{-23}\ \text{Дж/К}.$$

Следовательно, выражение (4.36) можно представить в виде

$$\langle E\rangle = \frac{3}{2}kT. \qquad (4.37)$$

**Зависимость давления газа от его концентрации и температуры.** Подставляя (4.37) в (4.34), найдем выражение для давления газа:

$$p = n_0 kT. \qquad (4.38)$$

**Давление газа пропорционально произведению числа молекул в единице объема на его термодинамическую температуру.**

Анализ уравнения (4.37) показывает, что при $T = 0$ К кинетическая энергия поступательного движения молекул $E = 0$, а следовательно, и $v_{кв} = 0$.

Таким образом,

при $T = 0$ К отсутствует поступательное движение молекул.

Однако это не означает, что при $T = 0$ К прекращается движение вообще. Сохраняются вращательное и колебательное движения атомов и молекул. По современным представлениям, при $T = 0$ К ***у атомов и еще более мелких частиц остается некоторая энергия, называемая нулевой.***

Представим теперь формулу (4.37) в таком виде:

$$\frac{m\langle v_{\text{кв}}\rangle^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

откуда средняя квадратическая скорость

$$\langle v_{\text{кв}}\rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \qquad (4.39)$$

Отсюда следует ***третье положение молекулярно-кинетической теории газов:***

средняя квадратическая скорость молекул пропорциональна корню квадратному **из** термодинамической температуры.

Таким образом, зная температуру газа, можно найти среднюю квадратическую скорость движения молекул. На основании выражения (4.37) можно установить определение температуры:

термодинамическая температура с точностью до постоянного множителя $^3/_2k$ равна средней кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального **газа.**

Используя зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры (см. (4.38)), можно получить уравнение Клапейрона-Менделеева.

Обозначая через $n$ общее число молекул в объеме $V$ газа и принимая во внимание, что $n_0 = n/V$, уравнение (4.38) представим в виде

$$pV = nkT. \qquad (4.40)$$

Так как $n$ для данной массы газа непосредственно не измеряется, то необходимо придать уравнению (4.40) более удобный вид. Для этого воспользуемся понятием моля.

Общее число молекул в $\nu$ молях равно $n = \nu N_{\text{A}}$.

Поэтому

$$pV = \nu RT. \qquad (4.41)$$

Равенство (4.41) называют ***уравнением Клапейрона - Менделеева.***

При $T = \text{const}$ получим уравнение Бойля - Мариотта, а при $p = \text{const}$ — закон Гей-Люссака.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Основные положения молекулярно-кинетической теории газов:*

**o** все тела состоят из мельчайших частиц — атомов, молекул. Строение любого вещества дискретно;

**o** атомы и молекулы вещества всегда находятся в непрерывном хаотическом движении, которое называется тепловым движением;

**o** между частицами любого вещества существуют силы взаимодействия — притяжения и отталкивания. Природа этих сил электромагнитная.

• Макроскопические тела состоят из огромного числа молекул, массы которых малы, поэтому массу молекул и их количество выражают в относительных единицах (относительная молекулярная или атомная масса). Количество вещества выражают в молях.

• *Количество вещества* — это отношение числа $N$ молекул (атомов) в данном макроскопическом теле к числу $N_A$ ($6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$) атомов в 0,012 кг углерода:

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}.$$

• *Броуновское движение* — это тепловое движение взвешенных в жидкости (или газе) частичек.

• Агрегатное состояние вещества определяется соотношением между средней кинетической и средней потенциальной энергией взаимодействия молекул: у *газов* средняя кинетическая энергия много больше абсолютного значения средней потенциальной энергии взаимодействия молекул, у *жидкостей* они примерно равны, а у *твердых тел* абсолютное значение средней потенциальной энергии взаимодействия молекул много больше их средней кинетической энергии.

• Потенциальная энергия взаимодействия при притяжении отрицательна.

• *Идеальный газ* — модель реального газа, состоящего из молекул, размеры и взаимодействие между которыми пренебрежимо малы. Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа значительно больше средней потенциальной энергии их взаимодействия.

• Молекулярно-кинетическая теория рассматривает давление газа на стенки сосуда, в котором он находится, как результат ударов молекул о его стенки.

• *Давление* газа определяется как $^2/_3$ от средней кинетической энергии поступательного движения всех молекул, которые содержатся в единичном объеме газа:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle E \rangle.$$

• *Температура* является мерой средней кинетической энергии хаотического (теплового) движения молекул:

$$T = \frac{2}{3} \frac{N_A}{R} \langle E \rangle.$$

• В физике наибольшее распространение получила абсолютная шкала температур (шкала Кельвина). Один кельвин равен одному градусу по шкале Цельсия.

• Термодинамические параметры, характеризующие идеальный газ, связаны между собой *уравнением Клапейрона — Менделеева*

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

Это уравнение содержит в качестве частных случаев газовые законы:

- закон Бойля – Мариотта (при $T = \text{const}$ $pV = \text{const}$);
- закон Гей-Люссака (при $p = \text{const}$ $\frac{V}{T} = \text{const}$);
- закон Шарля (при $V = \text{const}$ $\frac{p}{T} = \text{const}$).

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории. **2.** Что такое молекула? **3.** Что такое атом? **4.** Что такое относительная молекулярная масса? **5.** Что называется количеством вещества? Единица измерения. **6.** Каков физический смысл постоянной Авогадро? **7.** В чем измеряется молярная масса? **8.** Чем обусловлено броуновское движение? **9.** Что такое диффузия? **10.** Каков характер зависимости сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами? **11.** Изобразите зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними. **12.** Какие агрегатные состояния вещества существуют? **13.** Какими скоростями характеризуют движение молекул газа? **14.** Какой газ называют идеальным? **15.** Назовите параметры состояния газа. **16.** Что такое давление газа? Чем оно обусловлено? **17.** Какими приборами измеряют давление газа? **18.** Дайте определение вакуума. **19.** Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов. **20.** Что называется термодинамическим процессом? изопроцессом? **21.** Сформулируйте законы Бойля - Мариотта, Гей-Люссака, Шарля. **22.** Какая температура называется термодинамической? **23.** Какой физический смысл имеют молярная газовая постоянная и постоянная Больцмана? **24.** Какова связь между кинетической энергией поступательного движения молекул газа и его термодинамической температурой? **25.** Выведите уравнение Клапейрона - Менделеева из основного уравнения молекулярно-кинетической теории.

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** Определить среднюю квадратическую скорость молекул газа, плотность которого при давлении $p$ = 50 кПа составляет $\rho = 4{,}1 \cdot 10^{-2}$ кг/м$^3$.

**Дано:** $p = 5 \cdot 10^4$ Па; $\rho = 4{,}1 \cdot 10^{-2}$ кг/м$^3$.

**Найти:** $\langle v_{кв} \rangle$.

**Решение.** По основному уравнению молекулярно-кинетической теории для давления имеем

$$p = \frac{1}{3} m \langle v_{кв} \rangle^2 n_0,$$

где $n_0$ — число молекул в единице объема; $m$ — масса молекулы.
Произведение $mn_0 = \rho$ — это плотность газа. Тогда

$$p = \frac{1}{3} \rho \langle v_{кв} \rangle^2; \quad \langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}.$$

**Вычисления:**

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3 \cdot 5 \cdot 10^4 \text{ Па}}{4{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3}} = 1\,913 \text{ м/с}.$$

**Ответ:** $\langle v_{кв} \rangle$ = 1 913 м/с.

• **Задача** 2. Сколько молей и молекул водорода содержится в баллоне вместимостью 50 м$^3$ под давлением 767 мм рт. ст. при температуре 18 °С? Какова плотность газа?

**Дано:** $V$= 50 м$^3$; $p$ = 767-1,33 • 10$^2$ Па = 1,02 • 10$^5$ Па; $T$= (273 + 18) К = 291 К; $M = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

**Найти:** $\nu$, $n$, $\rho$.

**Решение.** Из уравнения Клапейрона - Менделеева

$$pV = \frac{m}{M}RT, \qquad (1)$$

где $\nu = m/M$ — число молей, содержащихся в объеме $V$, имеем

$$\nu = \frac{pV}{RT}. \qquad (2)$$

Число $n$ молекул, содержащихся в данном объеме, находим используя постоянную Авогадро:

$$n = \nu N_A.$$

Плотность газа $\rho = m/V$ ,тогда

$$\rho = \frac{pM}{RT}.$$

**Вычисления:**

$$\nu = \frac{1{,}02 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 50 \text{ м}^3}{8{,}31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 291 \text{ К}} = 2\,109 \text{ моль} \approx 2{,}1 \cdot 10^3 \text{ моль};$$

$$n = 2{,}1 \cdot 10^3 \text{ моль} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 1{,}26 \cdot 10^{27};$$

$$\rho = \frac{1{,}02 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}}{8{,}31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 291 \text{ К}} = 8{,}44 \cdot 10^{-2} \text{ кг}/\text{м}^3.$$

**Ответ:** $\nu = 2{,}1 \cdot 10^3$ моль; $n = 1{,}26 \cdot 10^{27}$; $\rho = 8{,}44 \cdot 10^{-2}$ кг/м$^3$.

• **Задача 3.** Какова должна быть наименьшая вместимость баллона, чтобы он вмещал $m$ = 6,4 кг кислорода при $t$ - **20 ° С ,** если его стенки выдерживают давление $p$ = **16** МПа?

**Дано:** $m$ = 6,4 кг; $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; T= (273 + 20) К = 293 К; $p = 16 \cdot 10^6$ Па.
Найти: $V$.

**Решение.** Из условия задачи следует, что при помещении в баллон **6,4** кг кислорода давление не должно превышать $p = 16 \cdot 10^6$ Па. По уравнению Клапейрона - Менделеева,

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

откуда

$$V = \frac{m}{M}\frac{RT}{p}.$$

**Вычисления:**

$$V = \frac{6{,}4 \text{ кг} \cdot 8{,}31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 293 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль} \cdot 16 \cdot 10^6 \text{ Па}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

**Ответ:** $V = 3 \cdot 10^{-2}$ м$^3$.

### *Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Определить массу одной молекулы воды.

**2.** Определить массу атома железа и молекулы углекислого газа.

3. Сколько молекул газа находится в сосуде вместимостью 0,15 $м^3$ при нормальных условиях?

**4.** Сколько молей и сколько молекул газа находится в сосуде вместимостью 250 $см^3$, если давление газа 566 мм рт. ст., а температура 10 °С?

5. Какова молярная масса газа, если он при температуре 27 °С и давлении 2 Па имеет плотность, равную 2,6 $кг/м^3$?

**6.** Определить температуру газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы равна $6{,}9 \cdot 10^{-21}$ Дж.

7. Средняя кинетическая энергия поступательного движения отдельных молекул газа равна $5 \cdot 10^{-21}$ Дж, число молекул в 1 $см^3$ составляет $3 \cdot 10^{19}$. Определить давление газа.

**8.** Вычислить постоянную Лошмидта, т. е. число молекул, содержащихся в 1 $м^3$ газа при нормальных условиях.

9. Наиболее вероятная скорость молекул кислорода при давлении 240 мм рт. ст. составляет 160 м/с. Чему равно число молекул в 100 $см^3$?

**10.** Баллон вместимостью 8 л содержит 2 кг газа при давлении $5 \cdot 10^5$ Па. Определить среднюю квадратическую, среднюю арифметическую и наиболее вероятную скорости молекул газа.

**Ключевые слова:** *атом, молекула, молекулярная масса, количество вещества, моль, молярная масса, диффузия, газ, жидкость, твердое тело, плазма, вакуум, температура, газовые законы, уравнение Клапейрона - Менделеева.*

## Глава 5
# ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 5.1. Основные понятия и определения

**Историческая справка.** Исторически начало развития термодинамики связано с изучением коэффициента полезного действия тепловых машин. Развитие техники и повсеместное распространение тепловых машин в первой половине XIX в. настоятельно требовали развития теории тепловых процессов. Однако физики того времени не могли дать стройной теории тепловых процессов на основе молекулярных представлений, поэтому развитие теории пошло по своеобразному пути. В 1824 г. французский физик и инженер С.Карно в работе «Размышление о движущей силе огня» сформулировал принцип, согласно которому производительность тепловой машины зависит не от рабочего вещества, а от разности температур нагревателя и холодильника. В дальнейшем термодинамика получила развитие в работах Б. Клапейрона, Дж. Джоуля, Р. Клаузиуса, Ю. Майера, У. Томсона и др.

Термодинамика относится к феноменологическим теориям физики, которые имеют следующие общие черты: 1) они не рассматривают атомную структуру материи; 2) используют величины, которые определяются только для макроскопической системы; 3) построение теории основывается на известных опытных

данных; 4) свойства вещества выражаются в форме характеристических параметров (плотность, вязкость и т.д.).

Термодинамика изучает тепловые свойства макроскопических систем, не обращаясь к микроскопическому строению тел, составляющих систему. Она строится на базе нескольких основных принципов — начал термодинамики, которые представляют собой обобщение известных многочисленных опытных данных. Теоретическим изучением свойств вещества занимается статистическая физика, которая дала обоснование законов термодинамики и определила границу их применения.

**Основные определения.** При изучении основ термодинамики необходимо знать следующие определения.

Физическая система, состоящая из большого числа частиц — атомов или молекул, которые совершают тепловое движение и, взаимодействуя между собой, обмениваются энергиями, называется ***термодинамической системой.***

Состояние термодинамической системы определяется ***макроскопическими параметрами,*** например удельным объемом, давлением, температурой.

***Термодинамика рассматривает только равновесные состояния,*** т. е. состояния, в которых параметры термодинамической системы не меняются со временем.

***Термодинамическим процессом*** называется переход системы из начального состояния в конечное через последовательность промежуточных состояний. Процессы бывают обратимыми и необратимыми.

***Обратимым процессом*** называется такой процесс, при котором возможен обратный переход системы из конечного состояния в начальное через те же промежуточные состояния, чтобы в окружающих телах не произошло никаких изменений. Обратимый процесс является физической абстракцией. Примером процесса, приближающегося к обратимому, является колебание тяжелого маятника на длинном подвесе. В этом случае кинетическая энергия практически полностью превращается в потенциальную, и наоборот. Колебания происходят долго без заметного уменьшения амплитуды ввиду малости сопротивления среды и сил трения.

Любой процесс, сопровождаемый трением или теплопередачей от нагретого тела к холодному, называется ***необратимым процессом.*** Примером необратимого процесса является расширение газа, даже идеального, в пустоту. Расширяясь, газ не преодолевает сопротивления среды, не совершает работы, но для того чтобы вновь собрать все молекулы газа в прежний объем, т. е. привести газ в начальное состояние, необходимо затратить работу. Таким образом, все реальные процессы являются необратимыми.

## 5.2. Внутренняя энергия

**Внутренняя энергия системы.** Термодинамическая система как совокупность множества атомов и молекул обладает внутренней энергией ***U. Внутренняя энергия*** — это сумма энергий молекулярных взаимодействий и энергии теплового движения молекул.

**Внутренняя энергия системы зависит только от ее состояния и является однозначной функцией состояния.**

Изменение состояния системы характеризуется параметрами состояния *p, V, T*. Одному и тому же состоянию системы соответствует определенное значение внутренней энергии *U*. При нагревании газа увеличивается скорость движения молекул и атомов, что приводит к увеличению внутренней энергии; следовательно, внутренняя энергия зависит от температуры. При изменении давления или удельного объема меняются межмолекулярные расстояния, т. е. потенциальная энергия взаимодействия атомов или молекул тоже изменяется, а значит, изменяется и внутренняя энергия.

Началом отсчета внутренней энергии считается такое состояние системы, при котором внутренняя энергия равна нулю. Обычно считают, что внутренняя энергия равна нулю при *T* = О К. При переходе системы из одного состояния в другое практический интерес представляет изменение внутренней энергии Д *U,* поэтому выбор начала отсчета внутренней энергии не имеет значения.

Так как внутренняя энергия системы зависит от характера взаимодействия всех частиц в системе, то для строгого ее определения необходимо учитывать также энергию электронов, движущихся на электронных оболочках атомов ионов, и внутриядерную энергию. Поэтому часто для удобства, употребляя понятие внутренней энергии, имеют в виду не всю внутреннюю энергию данной системы, а только ту ее часть, которая существенна для рассмотрения данного явления.

Например, частицы тела находятся в движении, т. е. обладают кинетической энергией и между ними действуют силы притяжения и отталкивания — частицы обладают и потенциальной энергией. Подсчитать энергию хаотического движения огромного количества частиц, а тем более учесть потенциальную энергию каждой из них невозможно. Таким образом, энергии всех частиц слагаются в общую сумму, которая определяет внутреннюю энергию тела. Ясно, что измерить можно лишь изменение внутренней энергии, а не всю энергию тела.

Нельзя считать, что энергией может обладать какое-нибудь одно тело или одна частица без связи с другими телами и с другими частицами. Нельзя говорить о потенциальной энергии камня безотносительно к Земле, неверно также полагать, что летящий мяч или снаряд обладает кинетической энергией сам по себе, а не по отношению к какому-нибудь телу.

**Понятие энергии относится всегда к системе тел.**

При всяком изменении формы или объема тела изменяется внутренняя энергия тела. Если при этом не изменяется температура (кинетическая энергия частиц), то изменяется потенциальная энергия частиц тела. В большинстве случаев одновременно изменяются и кинетическая, и потенциальная энергии частиц тела.

**Внутренняя энергия идеального газа.** Газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул, называется ***одноатомным.*** К одноатомным газам относятся инертные газы — гелий, неон, аргон. В случае идеальных газов пренебрегают силами взаимодействия молекул, т. е. их потенциальная энергия полагается равной нулю, поэтому внутренняя энергия идеального газа представляет собой кинетическую энергию теплового движения молекул.

В подразд. 4.13 было показано, что средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы (одноатомной) равна $\langle E \rangle = {}^3/_2 kT$. Определим внут-

реннюю энергию идеального одноатомного газа массой то. Для этого среднюю энергию одного атома надо умножить на число атомов. В 1 моль содержится $N_A$ атомов, в газе массой то содержится $\nu = m/M$ моль, поэтому внутренняя энергия идеального одноатомного газа

$$U = \frac{m}{M} N_A \frac{3}{2} kT, \text{ или } U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (5.1)$$

так как $k N_A = R$.

**Внутренняя энергия идеального газа пропорциональна массе газа и его термодинамической температуре.**

**Степени свободы молекулы.*** Молекула одноатомного газа принимается за материальную точку, так как масса атома сосредоточена в основном в ядре, размеры которого малы. Положение одноатомной молекулы в пространстве однозначно задается тремя координатами. Говорят, что одноатомный газ имеет три степени свободы $(i = 3)$. Эта молекула движется только поступательно. Вследствие того что молекула находится в хаотическом движении, все направления ее движения являются равноправными, т. е. средняя кинетическая энергия хаотического теплового движения молекулы равномерно распределена между тремя степенями свободы.

**На каждую степень свободы поступательного движения одноатомной молекулы приходится одинаковая кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$.**

Молекула двухатомного газа представляет собой ***два атома, жестко связанных между собой.*** Эти молекулы не только движутся поступательно, но и вращаются.

Такая молекула кроме трех степеней свободы поступательного движения имеет две степени свободы вращательного движения, т. е. $i = 5$. Если газ многоатомный, то $i = 6$.

Внутренняя энергия многоатомного газа представляет собой кинетическую энергию всех движений частиц. Все степени свободы многоатомной молекулы являются равноправными, поэтому они вносят одинаковый вклад в ее среднюю кинетическую энергию:

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT.$$

Внутренняя энергия многоатомного идеального газа массы то равна

$$U = \frac{m}{M} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT.$$

## 5.3. Работа и теплота как формы передачи энергии

**Способы изменения внутренней энергии.** Изменить внутреннюю энергию тела можно разными способами. Рассмотрим два способа изменения внутренней энергии тела.

*Механический способ.* В цилиндре с подвижным поршнем находится идеальный газ (рис. 5.1). Пусть на поршень действует внешняя сила, которая быстро сжимает газ и совершает работу по преодолению сил сопротивления газа. Рассмотрим произвольно выбранную молекулу газа, движущуюся навстречу поршню со скоростью $v$. Если поршень движется со скоростью $u$, то $v + u$ — скорость молекулы относительно поршня. После упругого удара молекулы о поршень скорость молекулы составит —$(v + u)$ относительно поршня и $-(v + 2u)$ относительно цилиндра. Следовательно, после удара о поршень скорость молекулы, а значит, и ее кинетическая энергия возрастают, что приводит к увеличению внутренней энергии газа.

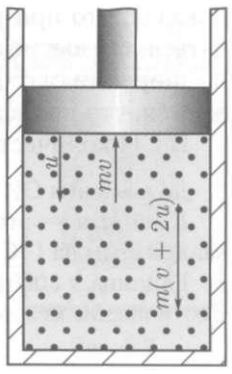


Рис. **5**.1

**При сжатии газа его внутренняя энергия увеличивается за счет совершения поршнем механической работы. При расширении газа его внутренняя энергия уменьшается, превращаясь в механическую энергию движущегося поршня.**

*Теплообмен.* Приведем в соприкосновение два тела с разными температурами. Пусть температура первого тела выше, чем второго. В результате обмена энергиями температура первого тела уменьшается, а второго — увеличивается. В рассматриваемом примере кинетическая энергия хаотического движения молекул первого тела переходит в кинетическую энергию хаотического движения молекул второго тела.

Процесс передачи внутренней энергии без совершения механической работы называется ***теплообменом.*** Мерой энергии, получаемой или отдаваемой телом в процессе теплообмена, служит физическая величина, называемая ***количеством теплоты.***

**Теплота и работа являются не видом энергии, а формой ее передачи, они существуют лишь в процессе передачи энергии.**

**Передача энергии в реальных условиях.** Две формы передачи энергии являются качественно неравноценными. При передаче энергии телу путем теплообмена увеличивается энергия хаотического движения атомов или молекул, что приводит к изменению внутренней энергии тела.

Если над телом совершается работа, то это приводит к увеличению любого вида энергии данного тела, в том числе и внутренней.

В реальных условиях оба способа передачи энергии системе в форме работы и форме теплоты обычно сопутствуют друг другу.

Как известно, сжатый газ, расширяясь, охлаждается. В 1807 г. физик Ж. Гей-Люссак, изучавший свойства идеальных газов, поставил опыт. В его эксперименте идеальный газ расширялся в вакуум, т. е. в сосуд, из которого предварительно был откачан воздух. Никакого понижения температуры не произошло. Гей-Люссак не сумел объяснить, почему это так. Объяснил результат опыта Гей-Люссака немецкий врач Р. Майер в работе «Органическое движение в связи с обменом веществ» (1845). Рассматривая различные энергетические превращения, Майер

показал, что при расширении идеального газа в пустоту газ не должен охлаждаться, так как не производит никакой работы против внешних сил. Если же при расширении газ совершает работу против внешних сил, то его температура понижается, что происходит, например, в тепловых двигателях.

В СИ количество теплоты, как и работа, выражается в *джоулях* (Дж).

До введения СИ количество теплоты выражали в калориях.

*Калория* — это количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г дистиллированной воды на 1 °С, от 19,5 до 20,5 °С.

Единица, в 1 000 раз большая калории, называется *килокалорией* (1 ккал = 1 000 кал). Соотношение между единицами: 1 кал = 4,19 Дж.

## 5.4. Теплоемкость. Удельная теплоемкость. Уравнение теплового баланса

**Теплоемкость.** ***Теплоемкостью тела*** называют отношение количества теплоты *Q,* необходимого для повышения его температуры от $T_1$ до $T_2$, к разности этих температур $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \qquad (5.2)$$

Теплоемкость, таким образом, характеризует то количество теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы нагреть его на 1 К (при охлаждении на 1 К тело выделяет то же количество теплоты, что и поглощает при нагревании).

Нагревая тела с одинаковыми массами, но состоящие из различных веществ, можно обнаружить, что для повышения их температуры на 1 К требуются различные количества теплоты; следовательно,

**теплоемкость тела зависит от его природы.**

*Теплоемкость тела пропорциональна его массе.* Поэтому характеристикой тепловых свойств вещества является его ***удельная теплоемкость*** *c* — величина, равная отношению теплоемкости тела к его массе:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}. \qquad (5.3)$$

В СИ удельная теплоемкость вещества выражается в *джоулях на килограмм-кельвин* [Дж/(кг·К)].

Зная теплоемкость вещества, можно определить количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой *m* от температуры $T_1$ до температуры $T_2$:

$$Q = cm\Delta T = cm(T_2 - T_1). \qquad (5.4)$$

Для измерения и сравнения теплоемкостей различных тел пользуются ***калориметром*** — прибором, в котором происходит теплообмен между телами, изолированными от воздействия окружающей среды. Простейший калориметр представляет собой металлический стакан с крышкой. Его ставят на пробки, по-

мещают в сосуд большей вместимости, так что между стенками двух сосудов остается некоторый промежуток. Сверху оба сосуда закрывают крышкой (рис. **5.2).**

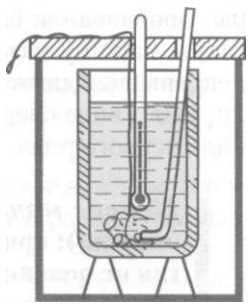


Рис. 5.2

**Уравнение теплового** баланса. Измерение теплоемкостей твердых и жидких тел обычно производится с помощью калориметра, наполненного водой или другой жидкостью. Твердое тело известной массы $m_1$, нагретое до известной температуры, быстро переносится из нагревателя в калориметр и отдает ему некоторое количество теплоты, охлаждаясь само и нагревая вещество калориметра до тех пор, пока температуры тела и калориметра не станут равны одному общему значению ***T.*** Зная начальные температуры, массы всех тел и удельные теплоемкости жидкости $c_3$ и материала калориметра $c_2$, можно вычислить неизвестную теплоемкость $c_x$ твердого тела исходя из ***уравнения теплового баланса,*** по которому количество теплоты $Q_1$, отданное телом, равно количеству теплоты, полученному калориметром ($Q_2$ — сосудом, $Q_3$ — жидкостью):

$$Q_1 = Q_2 + Q_3. \tag{5.5}$$

Из **(5.4)** следует, что

$$Q_1 = c_x m_1(T_1 - T), \quad Q_2 = c_2 m_2(T - T_2), \quad Q_3 = c_3 m_3(T - T_2),$$

где $m_2$ и $m_3$ — соответственно массы калориметра и жидкости; ***T,*** — их начальная температура.

На основании уравнения теплового баланса **(5.5)** имеем

$$c_x m_1(T_1 - T) = c_2 m_2(T - T_2) + c_3 m_3(T - T_2),$$

откуда находим неизвестную теплоемкость:

$$c_x = \frac{c_2 m_2(T - T_2) + c_3 m_3(T - T_2)}{m_1(T_1 - T)}.$$

**Историческая справка.** Впервые *калориметрический метод (метод смешением)* был разработан коллегой и другом М. В.Ломоносова, профессором экспериментальной физики Г. Рихманом, который 14 декабря 1744 г. в П
жидкостей, которая потом перешла в учебники физики под названием «задачи Рихмана». Современные калориметры позволяют производить очень т

## 5.5. Первое начало термодинамики

**Первое начало термодинамики.** Основу термодинамики составляют два закона (или начала). Исторически в формулировке первого начала термодинамики важную роль сыграли неудачные попытки человека построить машину, кото-

рая производила бы работу, не потребляя эквивалентного количества энергии; такую машину назвали ***вечным двигателем*** (от лат. ***perpetuum mobile*** — непрерывное движение) ***первого рода.*** Первое начало термодинамики формулируют в виде следующего утверждения: невозможно построить перпетуум мобиле первого рода.

> ***Первое начало термодинамики*** **(закон сохранения и превращения энергии): при разнообразных процессах, протекающих в природе, энергия не возникает из ничего и не уничтожается, но превращается лишь из одних видов в другие.**

Для того чтобы записать первое начало термодинамики в математической форме, рассмотрим, как происходит изменение внутренней энергии системы.

В общем случае внутренняя энергия тела может возрастать как в результате механической работы внешних сил, так и вследствие теплообмена.

При обмене энергией с окружающими телами внутренняя энергия тела в зависимости от обстоятельств может как возрастать, так и уменьшаться: знак $Q$ указывает направление теплообмена. Если при теплообмене окружающие тела нагреваются, т. е. отнимают энергию у рассматриваемого тела, то $Q < 0$. Если при изменении внутренней энергии $i\Delta U$ тела совершается работа $A$ над окружающими телами, то эта работа считается положительной $(+A)$, если же окружающие тела совершают работу над рассматриваемым телом, то эта работа отрицательна $(-A)$

Так как в общем случае внутренняя энергия тела меняется как при сообщении телу количества теплоты, так и при совершении над ним работы, то, учитывая правила знаков, закон сохранения энергии применительно к происходящему процессу можно записать в виде

$$\Delta U = Q - A. \tag{5.6}$$

> **Изменение внутренней энергии тела равно разности сообщенного телу количества теплоты и произведенной над ним механической работы.**

Тогда формулу (5.6) можно переписать в виде

$$Q = \Delta U + A. \tag{5.7}$$

> **Количество теплоты, сообщенное телу, идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение телом работы над внешними телами.**

Так формулируется первое начало термодинамики — закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам.

> **Если в замкнутой системе, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, происходит теплообмен, то никакой работы внутри системы не совершается.**

Так как система замкнута, то изменение внутренней энергии системы равно нулю, но происходит изменение внутренней энергии тел системы. Согласно первому началу термодинамики, изменение внутренней энергии тел системы равно количеству теплоты, отданной или полученной этими телами до наступления

теплового равновесия внутри системы, т. е. состояния, при котором температура перестает изменяться.

Поэтому уравнение теплового баланса для замкнутой системы имеет вид

$$Q_1 + Q_2 + ... + Q_n = 0, \tag{5.8}$$

где $Q_1, Q_2, ..., Q_n$ — количество теплоты, полученное или отданное каждым телом.

Рассмотрим применения первого начала термодинамики к различным изопроцессам, происходящим в идеальных газах.

**Изохорный процесс.** Объем газа остается постоянным, меняются его давление и температура. Поскольку объем газа не меняется, газ не совершает никакой работы против внешних сил: $A = 0$, т. е. при изохорном нагревании вся сообщенная газу теплота полностью расходуется на увеличение его внутренней энергии: $Q = \Delta U$.

В соответствии с выражением (5.3) удельная теплоемкость газа при постоянном объеме

$$c_V = \frac{\Delta U}{m\Delta T},$$

откуда

$$\Delta U = mc_V\Delta T.$$

**Изменение внутренней энергии идеального газа при изохорном процессе пропорционально изменению его температуры.**

**Изобарный процесс.** Давление остается постоянным, изменяются его объем и температура. При изобарном нагревании газ расширяется, часть сообщенной ему теплоты идет на увеличение внутренней энергии газа, остальная — на работу газа против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A.$$

Вычислим работу, совершаемую газом при изобарном расширении. Пусть в цилиндре под поршнем находится газ, занимающий объем $V$ под давлением $p$. Площадь поршня $S$. Сила, с которой газ давит на поршень, $F = pS$. При расширении газа поршень поднимется на высоту $\Delta h$, при этом газ совершит работу

$$A = F\Delta h = pS\Delta h.$$

Но $S\Delta h = \Delta V$ — увеличение объема газа. Следовательно,

$$A = p\Delta V. \tag{5.9}$$

**Работа при изобарном расширении газа равна произведению давления газа на увеличение его объема.**

Графически на диаграмме $p\,V$ (рис. 53, *а)* работа изобарного расширения газа изображается площадью прямоугольника *abed*.

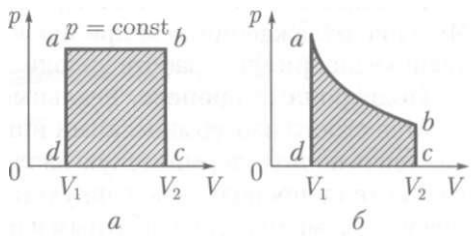



Рис. 53

Изотермический процесс. Температура газа неизменна, изменяются объем и давление газа. Поскольку температура газа не изменяется, не изменяется и его внутренняя энергия, т. е. $\Delta U = 0$. Первое начало термодинамики для этого процесса записывается в виде

$$Q = A.$$

При изотермическом нагревании вся теплота, сообщенная газу, расходуется на работу газа против внешних сил.

Графически на диаграмме *pV* (рис. **5.3,** *б)* работа изотермического расширения газа выражается площадью фигуры *abed.*

## 5.6. Адиабатный процесс

Адиабатный процесс. ***Адиабатным*** (от греч. ***adiabatos*** — непроходимый) называется процесс, происходящий без теплообмена с окружающими телами.

Осуществить процесс, близкий к адиабатному, можно в том случае, если газ находится внутри оболочки с очень хорошими теплоизоляционными свойствами. Приближением к такой оболочке может служить *сосуд Дьюара.* Это сосуд с двойными посеребренными стенками, из пространства между которыми выкачан воздух.

Адиабатными можно считать быстро протекающие процессы. При быстром сжатии газа затрачивается работа, приводящая к увеличению внутренней энергии и повышению температуры. Тела, температура которых повышена, должны некоторое количество теплоты передать окружающей среде, но процесс теплопередачи требует некоторого времени, поэтому при быстром сжатии (или расширении) теплота не успевает распространиться из данного объема, т. е. $Q$ — 0, и процесс можно рассматривать как адиабатный. Примером такого процесса может служить взрыв горючей смеси при работе двигателя внутреннего сгорания.

$$\Delta U + A = 0 \quad \text{или} \quad A = -\Delta U. \qquad (5.10)$$

При адиабатном процессе работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа.

При адиабатном расширении газ совершает работу, его внутренняя энергия и, следовательно, температура понижаются. При адиабатном сжатии работа газа отрицательна, его внутренняя энергия и, следовательно, температура возрастают. Явление охлаждения газа при адиабатном расширении широко используется в технике, например в работе холодильных установок.

Политропный процесс. Реальные процессы, протекающие в природе, не являются строго изотермическими или адиабатными, так как невозможно ни осуществить полную термическую изоляцию, ни создать адиабатную оболочку, имеющую теплопроводность, равную нулю. Реальные процессы, являющиеся промежуточными между адиабатным и изотермическим процессами, называются ***политропными.***

## 5.7. Принцип действия тепловой машины. КПД теплового двигателя

**Историческая справка.** Тепловые двигатели появились в начале XVIII в. в период интенсивного развития металлургической и текстильной промышленности. В России паровой двигатель был создан И. И. Ползуновым (1765). В 1784 г. английский изобретатель Дж. Уатт получил патент на универсальный паровой двигатель. В годы жизни французского физика С. Карно (1796- 1832) наилучшие паровые машины имели КПД 5 %. Это навело ученого на мысль исследовать причины несовершенства тепловых машин и найти пути повышения их КПД. В 1824 г. С. Карно издал работу «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Эта работа вошла в сокровищницу мировой науки и поставила ее автора в ряды основоположников термодинамики. В ней был предложен цикл идеальной тепловой машины.

**Тепловой двигатель.** Тепловой двигатель представляет собой устройство, превращающее внутреннюю энергию топлива в механическую. Энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, путем теплообмена передается газу. Газ, расширяясь, совершает работу против внешних сил, приводя в движение механизм. Схема теплового двигателя показана на рис. **5.4,** ***а.***

Любой тепловой двигатель состоит из трех основных частей: рабочего тела, нагревателя и холодильника. Рабочее тело (газ или пар) при расширении совершает работу, получая от нагревателя некоторое количество теплоты $Q_н$. Температура нагревателя $T_1$ остается постоянной за счет сгорания топлива. При сжатии рабочее тело передает некоторое количество теплоты $Q_х$ холодильнику, имеющему температуру $T_2 < T_1$. Тепловой двигатель должен работать циклически. Если тело из начального состояния *A* переводится в конечное состояние *B,* а затем через другие промежуточные состояния возвращается в начальное состояние *A,* то говорят, что совершается ***круговой процесс,*** или цикл (рис. **5.4,** ***б).***

**После окончания цикла тело возвращается в свое первоначальное состояние, его внутренняя энергия принимает начальное значение.**

Поэтому работа цикла может совершаться только за счет внешних источников, подводящих теплоту к рабочему телу. Реальные тепловые двигатели работают по разомкнутому циклу, т. е. после расширения газ выбрасывается, а в машину вводится и сжимается новая порция газа.

**Цикл Карно.** Различают ***прямой*** (цикл тепловой машины) и ***обратный*** (цикл холодильной машины) ***циклы.***

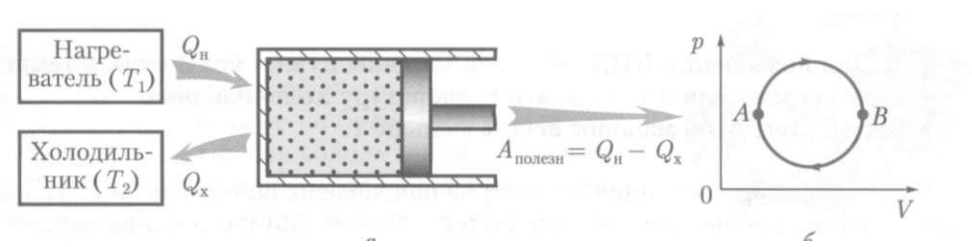



Рис. 5.4

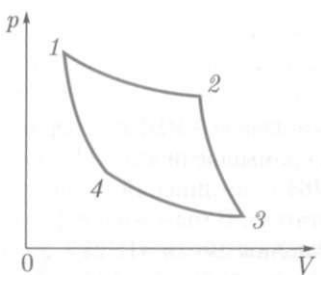


Рис. 5.5

Рабочий цикл Карно состоит из двух равновесных изотермических и двух равновесных адиабатных процессов (рис. 5.5).

***Равновесным*** называют процесс, в котором газ проходит ряд следующих друг за другом равновесных состояний. Параметры двух таких соседних состояний отличаются на бесконечно малую величину. В идеальной машине, работающей по циклу Карно, отсутствуют всякие потери на теплопроводность, трение, лучеиспускание и т. д. В качестве рабочего вещества выбирается идеальный газ.

На участке *1 — 2* (изотерма) идеальный газ совершает работу по изотермическому расширению за счет теплоты, полученной от нагревателя. Внутренняя энергия газа не изменяется, так как $T = \text{const}$. При адиабатном расширении (участок *2— 3)* газ совершает работу за счет изменения внутренней энергии, так как при этом процессе газ теплоты не получает. При изотермическом сжатии (участок *3— 4)* выделяющаяся теплота полностью передается холодильнику, внутренняя энергия не меняется. При адиабатном сжатии (участок *4—1)* работа идет на повышение внутренней энергии газа, теплоты идеальный газ не получает. Итак, идеальный газ возвращается в свое первоначальное состояние и, следовательно, к первоначальному значению его внутренней энергии. От нагревателя идеальный газ получил количество теплоты $Q_н$, холодильнику отдал $Q_х$; следовательно, согласно первому началу термодинамики, в работу превращено количество теплоты, равное $Q_н - Q_х$. Величина

$$\eta = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н} \qquad (5.11)$$

называется коэффициентом полезного действия (КПД) тепловой машины.

КПД цикла Карно можно выразить через температуры нагревателя $T_н$ и холодильника $T_х$:

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}. \qquad (5.12)$$

Коэффициент полезного действия определяется лишь температурами нагревателя и холодильника и не зависит от рода рабочего вещества.

Из уравнения (5.12) следуют выводы:

**1.** Для повышения КПД тепловой машины нужно увеличивать температуру нагревателя и уменьшать температуру холодильника.
2. КПД тепловой машины всегда меньше 1.

В настоящее время усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателя за счет уменьшения трения частей машины, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д. Реальные возможности для повышения КПД здесь еще остаются большими. Так, для паровой турбины начальные и конечные тем-

пературы пара приблизительно таковы: $T_1$ = 800 К, $T_2$ = 300 К. При этих температурах максимальное значение КПД

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\,\% \approx 62\,\%$$

Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь $\approx$ 40 %.

Повышение КПД тепловых двигателей, приближение его к максимально возможному — важнейшая техническая задача.

## 5.8. Второе начало термодинамики

Второе **начало** термодинамики. Первое начало термодинамики устанавливает количественное соотношение между количеством теплоты, работой и изменением внутренней энергии тела, но оно не определяет направления течения процессов. С точки зрения первого начала термодинамики, одинаково возможен переход энергии в форме теплоты как от более нагретого к менее нагретому телу, так и наоборот.

Второе начало термодинамики определяет направление процессов, происходящих в природе и связанных с превращением энергии.

**Превращение теплоты в работу возможно только при наличии нагревателя и холодильника; во всех тепловых машинах полезно используется только часть энергии, передаваемая от нагревателя к холодильнику.**

Иначе говоря, ни один тепловой двигатель, включая двигатель внутреннего сгорания, не может дать КПД, равный единице. Существует несколько формулировок второго начала термодинамики.

***Второе начало термодинамики:*** **1.** «Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины определяется только температурами теплоотдатчика и теплоприемника» (С. Карно).

2. «В природе невозможен процесс, единственным результатом которого был бы переход теплоты полностью **в** работу» (М.Планк).

**3.** «Теплота не может сама собой переходить от тела с более низкой температурой к телу с более высокой температурой» (Р. Клаузиус).



М. Планк

Второе начало отрицает возможность использования запасов внутренней энергии какого-либо источника без перевода ее на более низкий температурный уровень, т. е. без холодильника. Например, практически неограниченные запасы внутренней энергии океанов не могут быть полностью использованы, поскольку, как только температура океана станет ниже температуры окружающей среды, про-

изойдет процесс, в котором должен осуществляться переход теплоты от более холодного к более горячему телу, а такой процесс самопроизвольно протекать не может. Таким образом, второе начало термодинамики утверждает невозможность построения вечного двигателя второго рода, т. е. двигателя, работающего за счет охлаждения какого-либо одного тела.

Первое и второе начала термодинамики, с одной стороны, показывают инженерам и техникам, какие проекты являются просто нереальными, фантастическими, а с другой — указывают им реальный путь усовершенствования тепловых машин.

**Термодинамическая шкала температур.*** Открытие второго закона термодинамики позволило построить термодинамическую шкалу температур, не зависящую от термометрического тела и температурного параметра.

Измерив работу $A$ и израсходованное количество теплоты $Q$, можно вычислить $\eta = A/Q$. Из (5.11) и (5.12) следует:

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н} = 1 - \frac{T_х}{T_н}, \quad \eta = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н} = 1 - \frac{Q_х}{Q_н}.$$

Отсюда получаем

$$\frac{Q_х}{Q_н} = \frac{T_х}{T_н}. \tag{5.13}$$

Следовательно, отношение количества теплоты $Q_х$, отдаваемое холодильнику, к количеству теплоты $Q_н$, полученному от нагревателя, равно отношению соответствующих температур. Это положение было взято Кельвином за основу при построении термодинамической шкалы температур (см. подразд. 4.11).

В СИ за основную единицу температуры принимается ***кельвин*** (К).

***Кельвин*** — это 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды. Между температурами, измеренными по термодинамической шкале и по шкале Цельсия, существует простая связь, выраженная формулой (4.23).

Так как выражение (5.13) было получено при рассмотрении цикла Карно, КПД которого не зависит от рабочего вещества, то это определение связано не со свойствами какого бы то ни было вещества, как это имеет место для любой эмпирической температурной шкалы. Термодинамическое определение температуры не имеет той ограниченности, которая свойственна молекулярно-кинетическому определению.

## 5.9. Холодильная машина. Тепловой двигатель

**Холодильные машины.*** Все тепловые машины работают по так называемому прямому циклу, т. е. осуществляют такой замкнутый процесс, при котором теплота превращается в работу. Однако машину можно заставить работать и по обратному циклу, когда в результате совершенной работы от системы отнимается некоторое количество теплоты. В этом случае теплота будет переходить от менее нагретого тела к более нагретому, а машина превратится в холодильную машину.

Примером самой распространенной холодильной машины в настоящее время является домашний холодильник. Рассмотрим принцип его работы. Агрегат,

с помощью которого создается низкая температура в холодильной камере и самом холодильнике (рис. 5.6), состоит из компрессора *A,* конденсатора *B,* крана *K* и испарителя *C,* исполненного в виде трубок в стенках холодильной камеры.

Охлаждающая система холодильника заполняется жидкостью, которая легко испаряется (фреон, аммиак, сернистый ангидрид и др.) и называется ***хладоагентом.***

Хладоагент посредством компрессора, работающего от электродвигателя, сжимается в конденсаторе, представляющем собой змеевик из трубок небольшого сечения. При сжатии хладоагент переходит в жидкое состояние, охлаждается, отдавая теплоту в окружающую среду (трубки смонтированы на задней стенке холодильника), и устремляется в трубки испарителя, окружающие холодильную камеру. Процесс испарения происходит потому, что трубки испарителя имеют диаметр, больший диаметра трубок конденсатора, и давление газа в них резко падает. Кроме того, и сам конденсатор создает в испарителе более низкое давление. Процесс испарения, как будет показано далее, сопровождается поглощением теплоты от стенок змеевика-испарителя, воздуха и продуктов, помещенных в холодильную камеру. Температура в холодильной камере и, следовательно, во всем холодильнике понижается. Газообразный хладоагент поступает вновь в компрессор, и процесс многократно повторяется.

**Тепловые двигатели.** Примерами тепловых двигателей могут служить паровые машины, паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели.

В паровых машинах и паровых турбинах нагревателем служит паровой котел, рабочим телом — пар, холодильником — атмосфера или устройства для охлаждения отработанного пара — конденсаторы. В двигателях внутреннего сгорания нагревателем и рабочим телом служит топливо, а холодильником — атмосфера. В качестве топлива обычно используются бензин, спирт, керосин и дизельное топливо. С помощью специальных устройств (например, карбюраторов в бензиновых двигателях) топливо и воздух перемешиваются и в виде смеси подаются в цилиндр, где и происходит сгорание этой смеси. Продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. Схема работы теплового двигателя приведена на рис. 5.7. Ра-

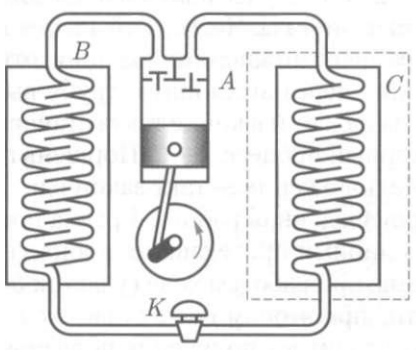



Рис. 5.6




Рис. 5.7

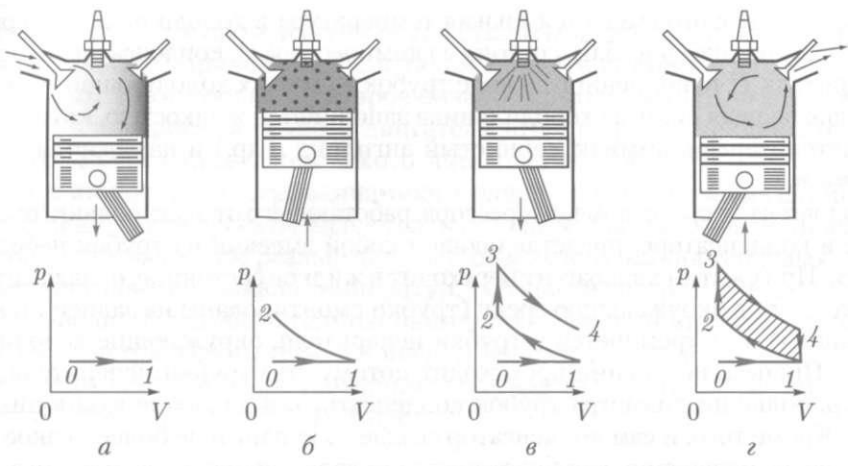



Рис. 5.8

бочее тело двигателя получает от нагревателя при температуре $T_1$ количество теплоты $Q_1$, совершает работу $A$ и передает часть теплоты $Q_2$ холодильнику, имеющему температуру $T_2$.

Карбюраторный двигатель.* Рассмотрим четырехтактный цикл карбюраторного двигателя и получим рабочую диаграмму этого цикла (рис. **5.8).**

При движении поршня вниз (рис. **5.8,** *а)* за счет работы внешних сил открывается впускной клапан и рабочая смесь подается в цилиндр. Процесс изобарный, и давление равно атмосферному. Когда поршень достигает крайнего нижнего положения, выпускной клапан закрывается. Первый такт (всасывание) закончен: на графике процесс показан прямой *0— 1.* Второй такт (сжатие) (рис. **5.8,** *б)* идет также под действием внешней силы. Оба клапана закрыты, и газ адиабатно нагревается. На графике это соответствует линии ***1-2.*** Третий такт — вспышка и рабочий ход (рис. **5.8,** *в).* При достижении поршнем крайнего верхнего положения искра запальной свечи воспламеняет смесь, давление газа резко возрастает. На графике это соответствует изохорному процессу ***2 — 3.*** Поршень затем перемещается вниз при закрытых клапанах, что имеет место при адиабатном расширении. Кривая *3 — 4* соответствует такту, называемому рабочим ходом.

Как видно из графика рис. **5.8,** *в,* в этом такте давление газа падает, объем возрастает, температура уменьшается. Работа в этом случае положительна и производится за счет уменьшения внутренней энергии газа. Четвертый такт — выхлоп (рис. **5.8,** *г).* Когда поршень достигает крайнего нижнего положения, открывается выпускной клапан и продукты сгорания через выхлопную трубу выбрасываются в окружающую среду. Давление газа падает и в конце такта становится равным атмосферному. На графике это изохорный процесс *4 — 1-* Поршень перемещается за счет энергии маховика в верхнее положение — такт закончен.

В рассмотренном замкнутом процессе произведенная работа $A$ равна площади заштрихованной фигуры, ограниченной линиями протекавших процессов.

Анализ графика показывает, что расширение при рабочем ходе (участок ***3—4)*** происходит при большем давлении, чем сжатие при втором такте (участок *1 — 2).* Это обстоятельство в конечном итоге и обусловливает получение полезной работы двигателем.

Работа при изохорных процессах *(3— 2 и 4 - 1)* равна нулю *(V*= const), а положительная работа определяется лишь разностью работ при адиабатном расширении и сжатии.

На практике КПД двигателя внутреннего сгорания достигает 20 - 30 %.

Как можно повысить КПД этого двигателя? Опыт и расчеты показывают, что для этого нужно добиться большей степени сжатия смеси. Однако в двигателях карбюраторного типа очень сильно сжимать горючую смесь нельзя, так как она, сильно нагреваясь, будет преждевременно самовоспламеняться.

**Дизель.** Немецкий инженер **Р.** Дизель изобрел двигатель, названный его именем, работающий по такому циклу, который позволяет избежать указанных выше затруднений и значительно повысить КПД.

Степень сжатия в дизелях достигает большой величины, вследствие чего температура воздуха в конце сжатия поднимается до температуры, достаточной для воспламенения топлива.

Топливо сгорает здесь не сразу, как в карбюраторных двигателях, а постепенно, в продолжение некоторой части хода поршня. Процесс горения топлива вследствие этого происходит при увеличивающемся объеме рабочего пространства, поэтому давление газов во время работы остается постоянным.

Таким образом, сгорание смеси происходит при постоянном давлении в отличие от карбюраторных двигателей (при постоянном объеме).

Дизель оказался более экономичным двигателем, чем карбюраторный, его КПД достигает 40 %. Он может развивать значительную мощность (десятки тысяч лошадиных сил) и работать на дешевых сортах жидкого топлива.

Дизели большой мощности широко применяют как в стационарных установках, так и на водном, железнодорожном и воздушном транспорте, а дизели малой мощности в последнее время успешно используются на автомобилях, тракторах и небольших судах.

**Реактивный двигатель.** На рис. 5.9 приведена схема прямоточного воздушно-реактивного двигателя, используемого в авиации. Его работа протекает следующим образом. При полете самолета встречный поток воздуха проходит через напорное сопло и захватывает горючее, разбрызгиваемое форсунками. Образовавшаяся рабочая смесь поступает далее в камеру сгорания, где воспламеняется с помощью запальных свечей.

Газы, получающиеся в результате сгорания рабочей смеси, с огромной скоростью выбрасываются через выходное отверстие — сопло. Вследствие резкого увеличения давления при сгорании смеси скорость газов при выходе из сопла намного больше скорости входящего в двигатель воздуха. По закону сохранения количества движения (импульса) благодаря этой разности скоростей и создается реактивная тяга.




Рис. 5.9

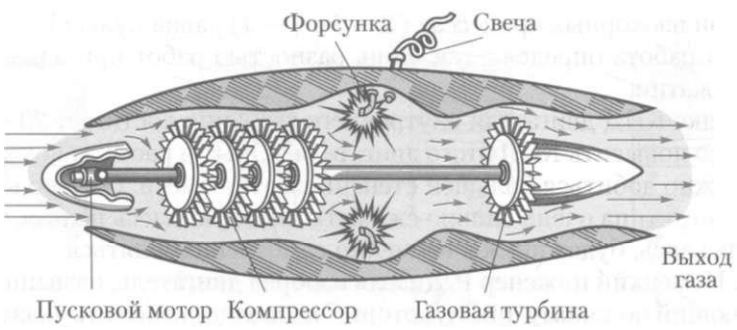



Рис. **5**.10

В настоящее время в авиации широко применяются турбовинтовые двигатели (рис. 5.10). В этом двигателе проходящие через турбину газы отдают ей большую часть своей энергии, поэтому газовая турбина развивает мощность, значительно превышающую ту, которая потребляется компрессором. Избыток мощности турбины расходуется на приведение во вращение воздушного винта, являющегося основным источником тяги двигателя. Кроме того, в турбовинтовых двигателях получается некоторая дополнительная тяга от реактивного действия выходящих из сопла отработавших газов.

В современных тепловых машинах и колеблется примерно от 40 (у двигателей внутреннего сгорания) до 60 % (у реактивных двигателей).

Конструкторская мысль ученых идет как по пути совершенствования существующих двигателей (создания новых материалов, уменьшения трения и потерь топлива при неполном сгорании), так и по линии создания двигателей, конструкция которых принципиально отличается от существующих (МГД-генераторы, атомные, ядерные и т.д.). Важно иметь в виду, что увеличение количества двигателей внутреннего сгорания вызывает большую озабоченность людей в плане защиты природы и окружающей среды. Создание новых двигателей, продукты сгорания которых не загрязняли бы окружающую среду, — важная проблема современности.

**Охрана природы.** Природа для человека не только источник продуктов питания и сырья для промышленности. Человек — сам часть природы — нуждается в благоприятной среде жизни с чистой водой и воздухом. Воздух — это физическая смесь газов, образующих земную атмосферу. Он содержит во взвешенном состоянии большее или меньшее количество пыли, дыма, частиц соли и других естественных примесей. Как правило, концентрация в воздухе естественных примесей не достигает таких значений, при которых они могли бы оказывать отрицательное воздействие на организм человека. Существенно более вредным является загрязнение атмосферного воздуха промышленными выбросами.

Повсеместное применение тепловых двигателей отрицательно влияет на окружающую среду. Подсчитано, что в настоящее время ежегодно сжигается приблизительно 2 млрд т различных видов каменного угля и около 1 млрд т нефти. Это приводит к постепенному повышению средней температуры на Земле, что может создать угрозу таяния ледников и повышение уровня Мирового океана. Кроме того, в атмосферу выбрасывается не менее 120 млн т золы и до 60 млн т ядовитого сернистого ангидрида. Свыше 200 млн автомобилей во всем мире не-

прерывно отравляют атмосферный воздух оксидами углерода и азота, углеводородами и др. И это лишь часть вредных примесей, попадающих в атмосферу. С увеличением мощностей тепловых и атомных электростанций резко возрастает потребность в воде, для этих целей в нашей стране используется около 35 % воды, расходуемой во всех отраслях народного хозяйства.

В настоящее время в ряде стран применяются прямые и косвенные методы защиты воздушного и водяного бассейнов от загрязнения. Прямые методы — это очистка и улавливание дымовых и вентиляционных газов; переход на использование топлив, мало загрязняющих атмосферу, например природного газа, бессернистой нефти; создание небензиновых автомобильных двигателей; очистка воды с помощью фильтрообменных смол и повторное ее использование.

Применение косвенных методов обеспечивает значительное снижение концентраций вредных веществ в самом нижнем слое атмосферы. Эти методы связаны с увеличением высоты источников выбросов и использованием физических закономерностей рассеивания примесей в воздухе, с рациональным учетом метеорологических условий при проектировании и эксплуатации различных предприятий.

Для экономии площадей и водных ресурсов целесообразно сооружать целые комплексы электростанций с замкнутым циклом водоснабжения.

Запрещен ввод в эксплуатацию предприятий и теплоэлектростанций, выбрасывающих в атмосферный воздух золу, копоть, пыль, вредные газы без обеспечения их очистки. Вредные производства, как правило, должны выноситься за черту города. В больших масштабах ведется озеленение улиц, разбиваются скверы, парки, сады.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Все макроскопические тела обладают внутренней энергией, которая является однозначной функцией температуры и объема. Внутренняя энергия одноатомного идеального газа зависит от температуры:

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT.$$

На каждую степень свободы «поступательного движения одноатомной молекулы приходится одинаковая кинетическая энергия, равная $^1/_2 kT.$

• *Первое начало термодинамики* — это закон сохранения и превращения энергии применительно к тепловым процессам. Согласно ему,

$$Q = \Delta U + A.$$

• В термодинамике работа, совершаемая системой против внешних сил, равна $A = p\Delta V.$

• При нагревании и охлаждении количество теплоты равно

$$Q = cm\Delta T.$$

• Обмен теплотой в изолированной системе без совершения работы характеризуется уравнением теплового баланса

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n = 0.$$

• Применение первого начала термодинамики к различным изопроцессам, происходящим в идеальном газе:

о при изохорном процессе изменение внутренней энергии идеального газа пропорционально изменению его температуры (работа равна нулю):

$$Q = \Delta U;$$

о при изобарном процессе передаваемая системе теплота идет на изменение внутренней энергии и совершение работы;

о при изотермическом процессе внутренняя энергия идеального газа не меняется и вся теплота расходуется на работу газа против внешних сил:

$$Q = A;$$

о при адиабатном процессе работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа: $\Delta Q = 0;\ A = -\Delta U$.

• *Второе начало термодинамики* определяет направления процессов, происходящих в природе. Оно отрицает возможность использования запасов внутренней энергии какого-либо источника без перевода ее на более низкий температурный уровень, т. е. без холодильника.

• Во всех тепловых машинах полезно используется лишь часть энергии, передаваемая от нагревателя к холодильнику. Максимально возможное значение коэффициента полезного действия

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

Важнейшей задачей науки и техники является повышение КПД тепловых двигателей и приближение его к максимально возможному.

Отношение $\frac{Q_х}{Q_н} = \frac{T_х}{T_н}$ положено в основу метода измерения температур (термодинамическая шкала температур).

• Повсеместное применение тепловых двигателей отрицательно влияет на окружающую среду. Это ставит ряд серьезных проблем перед обществом. Наряду с важнейшей задачей повышения КПД тепловых двигателей требуется проводить мероприятия по охране окружающей среды.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Какие методы исследования свойств макроскопических систем применяются в молекулярной физике? В чем состоит различие этих методов? **2.** Что называют термодинамической системой? 3. Что называют термодинамическим процессом? **4.** Дайте определение обратимого и необратимого процессов. **5.** Дайте определение внутренней энергии системы. **6.** От чего зависит внутренняя энергия идеального газа? **7.** Какие формы передачи энергии вам известны? Расскажите о них. 8. Какова разница между теплоемкостью тела и удельной теплоемкостью? **9.** В чем смысл уравнения теплового баланса и какое отношение оно имеет к закону сохранения энергии? **10.** Сформулируйте первое начало термодинамики. **11.** Дайте определение адиабатного процесса. **12.** От чего зависит КПД тепловой машины? 13. Сформулируйте второе начало термодинамики. **14.** Что такое термодинамическая шкала температур? **15.** Приведите примеры известных вам тепловых двигателей. **16.** Наносит ли ущерб природе работа тепловых двигателей?

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** Газ, занимавший объем 20 л при нормальных условиях, был изобарно нагрет до 80 °С. Определить работу расширения газа.

**Дано:** $V$ = 20 л = 2 • 10"$^2$ м$^3$; $T_1$ = 273 К; $T_2$ = (273 + 80) К = 353 К; $p_1$ = = 1,01 -10$^5$ Па.

**Найти:** $A$.

**Решение.** Работа расширения газа при изобарном процессе определяется по формуле (5.9): $A = p\Delta V$. Из уравнения состояния газа следует

$$A = \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Из уравнения Клапейрона - Менделеева

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1$$

находим число молей газа:

$$\frac{m}{M} = \frac{p_1 V_1}{R T_1},$$

откуда

$$A = \frac{p_1 V_1 \Delta T}{T_1}.$$

**Вычисления:**

$$A = \frac{1{,}01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot 80 \text{ К}}{273 \text{ К}} \approx 592 \text{ Дж}.$$

**Ответ:** $A$ = 592 Дж.

• **Задача 2.** В калориметре смешиваются три химически не взаимодействующие жидкости массой $m_1$ = 1кг, $m_2$ =10 кг, $m_3$ = 5 кг, имеющие соответственно температуры 6, -40,60 °С и удельные теплоемкости 2 000,4 000 и 2 000 Дж/(кг • К). Определить температуру $\Theta$ смеси и количество теплоты, необходимое для последующего нагревания смеси до $t$ — 6 °С.

**Дано:** $m_1$ =1кг; $m_2$ = 10 кг; $ш$ = 5 кг; $T_1$ = (273 + 6) К = 279 К; $T_2$ =(273-40)К = = 233 К; $T_3$ = (273 + 60) К = 333 К; $c_1$ = 2000 Дж/(кг • К); $c_2$ = 4000 Дж/(кг • К); $c_3$ = 2000 Дж/(кг-К); ***T*** = (273 + 6) К = 279 К.

**Найти:** $\Theta$, $Q$.

**Решение.** Из уравнения теплового баланса следует, что алгебраическая сумма полученных и отданных жидкостями количеств теплоты равна нулю:

$$m_1 c_1(\Theta - T_1) + m_2 c_2(\Theta - T_2) + m_3 c_3(\Theta - T_3) = 0.$$

Решая это уравнение относительно $\Theta$, имеем

$$\Theta = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + m_3 c_3 T_3}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3}.$$

Чтобы смесь нагреть до температуры $T$, необходимо количество теплоты

$$Q = c_1 m_1(T - \Theta) + c_2 m_2(T - \Theta) + c_3 m_3(T - \Theta) = \\ = (c_1 m_1 + c_2 m_2 + c_3 m_3)(T - \Theta).$$

**Вычисления:**

$$\Theta = \frac{1\ \text{кг}\cdot 2\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot 279\ \text{К} + 10\ \text{кг}\cdot 4\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot 233\ \text{К} + 5\ \text{кг}\cdot 2\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot 333\ \text{К}}{1\ \text{кг}\cdot 2\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} + 10\ \text{кг}\cdot 4\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} + 5\ \text{кг}\cdot 2\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}} = 254\ \text{К}$$

$$Q = \left[2\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot 1\ \text{кг} + 4\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot 10\ \text{кг} + 2\,000\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot 5\ \text{кг}\right](279-254)\text{К} =$$
$$= 1{,}3\cdot 10^6\ \text{Дж} = 1{,}3\ \text{МДж}.$$

**Ответ:** $\Theta$ = 254 К; $Q$ =1,3МДж.

• **Задача** 3. Температура нагревателя идеальной тепловой машины 500 К, температура холодильника 400 К. Определить КПД цикла Карно и полезную мощность машины, если нагреватель передает ей 1675 Дж теплоты в секунду.

**Дано:** $T_н = 500$ К; $T_х = 400$ К; $Q = 1\,675$ Дж; $t = 1$ с.

**Найти:** $\eta$, $N$.

**Решение.** КПД машины определяется по формуле (5.12):

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н} = \frac{500\ \text{К} - 400\ \text{К}}{500\ \text{К}} = 0{,}2.$$

В полезную работу превращаются

$$A = \eta Q = 0{,}2\cdot 1\,675\ \text{Дж} = 335\ \text{Дж}.$$

Полезная мощность машины

$$N = \frac{A}{t}.$$

**Вычисления:**

$$N = \frac{335\ \text{Дж}}{1\ \text{с}} = 335\ \text{Вт}.$$

**Ответ:** $\eta = 0{,}2$; $N = 335$ Вт.

## ? *Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Тело массой 10 кг упало с высоты 20 м. На сколько увеличится внутренняя энергия в момент удара о землю, если на его нагревание идет 30 % кинетической энергии тела?

2. При изотермическом расширении идеальным газом совершена работа $A$ = 20 Дж. Какое количество теплоты сообщено газу?

3. Какую температуру будет иметь вода, если смешать 400 л воды при 20 °С и 100 л воды при 70 °С?

**4.** Вместимость системы охлаждения автомобиля 6 л. В радиатор влили 2 л теплой воды при 40 °С, а затем дополнили систему горячей водой при 85 °С. Определить реальную температуру смеси, учитывая, что она на 14 % ниже расчетной?

**5.** В аквариум налито 25 л воды при 17 °С. Сколько горячей воды при 72 °С нужно долить в аквариум, чтобы в нем установилась температура 22 °С?

**6.** Для ванны нужно приготовить 320 л воды при 36 °С. В газовой колонке температура воды 78 °С, из водопровода течет вода при 8 °С. Сколько горячей и холодной воды нужно взять для приготовления ванны?

7. Почему, поднимаясь в верхние слои атмосферы, воздух охлаждается?

8. Почему при выпуске газа из баллона вентиль покрывается росой или даже инеем?

**9.** Определить работу идеальной тепловой машины за один цикл, если в течение цикла машина получает от нагревателя 2 095 Дж теплоты. Температура нагревателя 400 К, температура холодильника 300 К.

10. Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно, 207 °С, а температура холодильника 117 °С. Какой должна быть температура нагревателя (при неизменной температуре холодильника), чтобы КПД машины увеличился в три раза?



**Ключевые слова:** *термодинамическая система, внутренняя энергия, работа, теплота, теплоемкость, удельная теплоемкость.*

## Глава 6

# СВОЙСТВА ПАРОВ

## 6.1. Испарение и конденсация

**Испарение.** Изучив свойства идеальных газов, перейдем к рассмотрению свойств реальных газов и жидкостей, в частности их взаимных превращений друг в друга. Здесь следует иметь в виду, что молекулы газов и жидкостей хотя и малы по размерам, но имеют конечные размеры и определенную форму и между ними существуют довольно значительные силы взаимодействия. В этом состоит главное отличие реальных газов и жидкостей от идеальных, как упрощенной модели реальных объектов.

При изучении идеальных газов отмечалось, что многие его свойства не зависят от природы газа. Однако чем ниже температура и больше давление, тем заметнее зависимость свойств газа от его природы. Газ в таких условиях называют паром, тем самым указывая, что он образовался из определенной жидкости.

Явление перехода вещества в пар называется ***парообразованием.***

В природе парообразование происходит в виде испарения и кипения.

Парообразование с открытой поверхности жидкости называется ***испарением.***

Испаряются не только жидкости, но и твердые тела.

Испарение твердых тел называется ***сублимацией,*** или ***возгонкой.***

Рассмотрим процесс испарения жидкостей. Так же как диффузия, испарение происходит вследствие непрерывного хаотического движения молекул жидкости. Всякая молекула, движущаяся из глубины жидкости к ее поверхности, испытывает в поверхностном слое действие силы, препятствующей вырыванию молекулы с поверхности жидкости. Чтобы пройти сквозь поверхностный слой, молекула должна обладать достаточной кинетической энергией для совершения работы выхода с поверхности жидкости. Скорости молекул жидкости, как и молекул газа, различны. Жидкость покидают наиболее «быстрые» молекулы, вследствие чего средняя кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается, что ведет к понижению температуры жидкости. Для поддержания постоянной температуры жидкости ей необходимо сообщать энергию извне, например в виде теплоты. Количество теп-

лоты $Q$, необходимое для превращения в пар **1** кг жидкости при постоянной температуре, называется ***удельной теплотой парообразования:***

$$r = \frac{Q}{m}. \qquad (6.1)$$

В СИ удельная теплота парообразования выражается в ***джоулях на килограмм*** (Дж/кг).

После того как молекула жидкости переместилась от границы поверхностного слоя на расстояние, большее радиуса действия молекулярных сил жидкости, она становится молекулой пара. Молекулярные силы действуют на сравнительно коротких расстояниях (порядка 10 нм).

**Конденсация.** В результате хаотического движения над поверхностью жидкости молекула пара, попадая в сферу действия молекулярных сил, вновь возвращается в жидкость. Этот процесс называют ***конденсацией.*** При конденсации пара некоторой массы выделяется столько энергии, сколько затрачивается при испарении жидкости такой же массы. Испарение жидкости происходит при любой температуре и тем быстрее, чем выше температура[1], больше площадь свободной поверхности испаряющейся жидкости и быстрее удаляются образовавшиеся над жидкостью пары.

Если жидкость находится в открытом сосуде, то молекул испаряется больше, чем конденсируется, и масса жидкости уменьшается.

Следует обратить внимание, что процесс парообразования связан с увеличением внутренней энергии вещества, а процесс конденсации — с уменьшением ее. Следовательно,

**конденсация и парообразование происходят только в процессе обмена энергией между окружающей средой и веществом.**

## 6.2. Насыщенный пар и его свойства

**Насыщенный пар.** Пусть жидкость находится в замкнутом сосуде, из которого откачан воздух. Вначале число молекул, испарившихся из жидкости, растет, но чем больше число молекул пара, тем больше молекул конденсируется. В том случае, когда число молекул пара все же увеличивается, пар, находящийся над жидкостью, называют ненасыщенным. Если за одно и то же время число испаряющихся и конденсирующихся молекул пара одинаково, то число молекул пара над жидкостью будет оставаться постоянным. Такое состояние называют ***динамическим равновесием пара и жидкости.*** Пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, называют ***насыщенным.***

Ненасыщенный пар подчиняется газовым законам. Чем дальше состояние пара от насыщения, тем лучше он подчиняется законам Бойля - Мариотта, Гей-Люссака. С увеличением числа молекул пара над поверхностью жидкости при неизменной температуре его давление увеличивается. Оно достигает максимального значения,

[1] **При повышении температуры большинство жидкостей расширяется, что приводит к увеличению расстояния между молекулами жидкости, а следовательно, к уменьшению сил молекулярного взаимодействия и уменьшению энергии, затрачиваемой молекулой при испарении.**

когда пар становится насыщенным. Давление насыщенного пара определяется концентрацией (число молекул в единице объема V) молекул пара и температурой.

**Свойства насыщенного пара.** Рассмотрим, как зависит давление насыщенного пара при неизменной температуре от его объема. Увеличим вместимость сосуда, в котором находятся жидкость и ее насыщенный пар, тогда концентрация молекул пара и его плотность уменьшатся. Молекулы пара будут реже попадать в жидкость. Динамическое равновесие нарушится. При постоянной температуре число испаряющихся молекул не изменится, т. е. испарение будет преобладать над конденсацией. Это будет происходить до тех пор, пока вновь не установится динамическое равновесие. Таким образом, концентрация молекул, а следовательно, и

**давление насыщенного пара над свободной поверхностью жидкости при постоянной температуре не зависит от объема.**

Если вся жидкость испарилась, а объем сосуда продолжает увеличиваться, то концентрация молекул пара уменьшается, а следовательно, уменьшается давление пара, пар становится ненасыщенным.

Если, наоборот, сжимать ненасыщенный пар, то в конце концов все вещество может перейти в жидкое состояние, дальнейшее сжатие жидкости вследствие ее малой сжимаемости потребует резкого увеличения давления.

**Давление насыщенного пара не зависит от его объема, но зависит от температуры.**

При увеличении температуры из жидкости станет испаряться большее число молекул. Динамическое равновесие нарушится. Концентрация молекул пара будет расти до тех пор, пока снова не установится динамическое равновесие. В этом случае концентрация, а значит, и давление будут большими. Итак, с возрастанием температуры давление насыщенных паров увеличивается.

Состояние насыщенного пара приближенно описывается уравнением состояния идеального газа. Давление насыщенного пара

$$p_{\text{н}} = nkT. \qquad (6.2)$$

Если сосуд, в котором находится насыщенный пар, предварительно был тщательно очищен от центров конденсации, т. е. пылинок, то можно получить пересыщенный пар, т. е. пар, давление которого выше, чем это соответствует давлению насыщенного пара при данной температуре.

## 6.3. Абсолютная и относительная влажность воздуха. Точка росы

**Абсолютная и относительная влажность воздуха.** В природе много открытых водоемов, с поверхности которых идет непрерывное испарение воды. Поэтому в состав атмосферы входят и пары воды. Количество водяных паров в воздухе характеризует его ***абсолютную*** *ВЛАЖНОСТЬ* — величину, показывающую, какая масса паров воды находится в 1 м$^3$ воздуха.

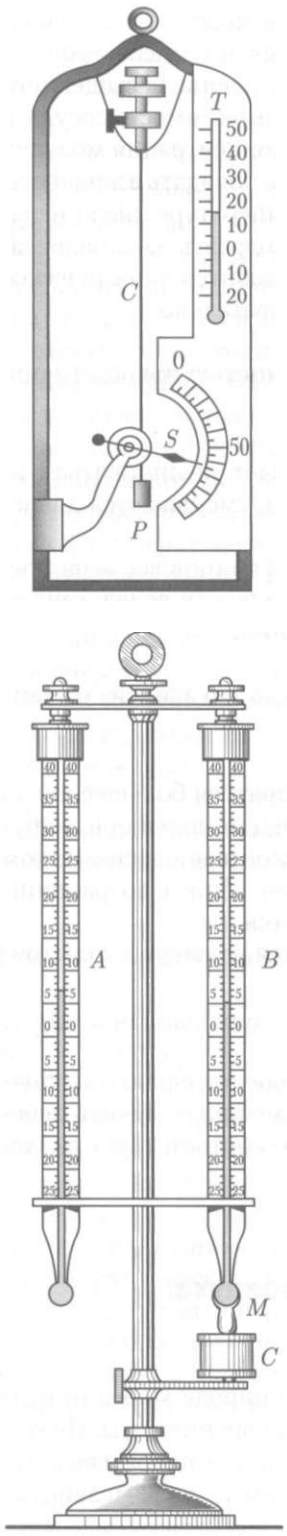



Рис. 6.1

Кроме абсолютной влажности необходимо знать и степень насыщения воздуха паром, которая характеризуется его *ОТНОСИТЕЛЬНОЙ* ***влажностью*** — величиной, равной отношению абсолютной влажности $D$ к количеству Ц) водяного пара в 1 м$^3$, насыщающего воздух при данной температуре, и выраженной в процентах:

$$f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\ \%. \qquad (6.3)$$

Если воздух не содержит паров воды, то его абсолютная и относительная влажность равна нулю (но такого в природе не бывает).

**Точка росы.** Абсолютную влажность воздуха можно определить по точке росы. ***Точка росы*** — это температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным. Значения $D_0$ для разных температур даются в справочных таблицах. Таким образом, зная точку росы и температуру воздуха и взяв из таблиц значения $D$ и $D_0$, можно определить $f$.

**Гигрометр.** Приборы для определения влажности воздуха называются ***гигрометрами.*** Работа простейшего гигрометра основана на том, что обезжиренный человеческий волос удлиняется при увеличении влажности воздуха.

Если такой волос **С** (рис. 6.1) пропустить через легкий блок, прикрепив один конец его к металлической раме, а к другому подвесить груз Р, то при изменении длины волоса указатель *S,* прикрепленный к блоку, будет двигаться.

Проградуировав предварительно прибор *Т,* можно по нему непосредственно определять относительную влажность.

Волосяной гигрометр применяют в тех случаях, когда в определении влажности воздуха не требуется большой точности.

**Психрометр.** Более точно влажность воздуха определяют с помощью ***психрометра*** (рис. 6.2). Он состоит из двух термометров *An B,* резервуар одного из них обернут марлей *М,* опущенной в сосуд с водой *С.* Вода, поднимаясь по капиллярам марли, смачивает резервуар термометра. Если воздух не насыщен водяным паром, то вода с марли испаряется, охлаждая термометр, поэтому термометр с влажным резервуаром покажет более низкую тем-

Рис. 6.2

пературу, чем термометр с сухим резервуаром. Чем суше воздух, тем больше разность показаний сухого и мокрого термометров. По этой разности из психрометрических таблиц определяют относительную влажность воздуха. Если воздух насыщен водяным паром, то показания термометров будут одинаковыми, относительная влажность составит 100 %, что возможно, например, во время дождя, тумана и т. п.

## 6.4. Кипение. Перегретый пар

**Кипение.** В процессе испарения наиболее быстрые молекулы жидкости покидают поверхность жидкости, преодолев силы молекулярного взаимодействия и превращаясь в молекулы пара (см. 6.**1).**

Частным случаем испарения является ***кипение.*** Это процесс интенсивного парообразования не только со свободной поверхности, но и по объему жидкости.

Нагреем жидкость, находящуюся в открытом сосуде. Всякая жидкость содержит некоторое количество растворенных газов. С увеличением температуры растворимость газа уменьшается. Газ выделяется из жидкости, оседая в виде мелких пузырьков на внутренних стенках сосуда. По мере повышения температуры размеры пузырьков увеличиваются и пузырьки всплывают.

Попадая в верхние, менее нагретые слои жидкости, они уменьшаются в размерах из-за конденсации водяных паров внутри них (рис. 6.3, *а).*

Когда температура жидкости выравняется, объем пузырьков при подъеме будет возрастать. Происходит это потому, что давление насыщенного пара внутри пузырька остается постоянным: $p_н = nkT$, а гидростатическое давление $\rho g h$ уменьшается. При постоянной температуре давление насыщенных паров от объема не зависит, все пространство внутри пузырька при его росте заполнено насыщенным паром. Когда пузырек достигнет поверхности жидкости, то давление насыщенного пара в нем практически равно атмосферному давлению на поверхности жидкости. Насыщенный пар, заполняющий пузырек, выбрасывается в атмосферу (рис. 6.3, ***б) .*** Происходит кипение.

**Кипение жидкости происходит при одинаковой температуре всей жидкости, когда давление насыщенного пара этой жидкости равно внешнему давлению.**

Каждая жидкость при нормальных условиях кипит при определенной температуре, при которой давление насыщенных паров этой жидкости равно внешнему давлению на ее поверхность. Эту температуру называют ***температурой кипения.***

Подводимая к жидкости в процессе кипения теплота расходуется на увеличение потенциальной энергии молекул, на работу против внешнего давления при образовании и движении пузырьков пара, на компенсацию потерь теплоты, связанных с процессом испарения жидкости в окружающую среду.

Из приведенных рассуждений ясно, что температура кипения жидкости зависит от

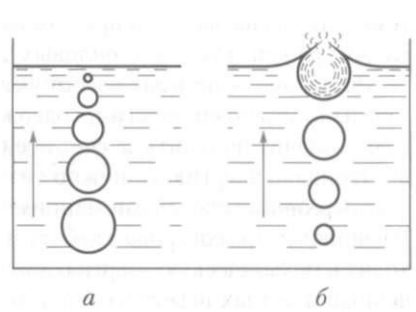


Рис. **6.3**

внешнего давления. Чем ниже внешнее давление, тем ниже температура кипения жидкости. Этим объясняется хорошо известный факт, что на больших высотах, где атмосферное давление пониженное, жидкости кипят при температурах более низких, чем на уровне моря. Наоборот, в котлах паровых машин, где давление достигает порядка 15 атм ($15 \cdot 10^5$ Па), температура кипения воды близка к 200 °С (473 К).

Когда говорят о температуре кипения жидкости, не указывая давления, имеют в виду температуру кипения при нормальном давлении (760 мм рт. ст. = $= 1{,}02 \cdot 10^5$ Па).

**Уравнение теплового баланса при парообразовании и конденсации.** Количество теплоты, необходимой для превращения жидкости в пар, нагретой до температуры кипения, определяется по формуле

$$Q = rm, \tag{6.4}$$

где $r$ — удельная теплота парообразования; $m$ — масса жидкости, превращенной в пар.

Из закона сохранения энергии следует, что при конденсации пара в жидкость выделяется количество теплоты, определяемое по формуле (6.4).

Удельная теплота парообразования для данной жидкости уменьшается с повышением температуры. Определяется удельная теплота парообразования опытным путем. Обычно ее находят по теплоте конденсации. Для этого пар вещества, удельную теплоту парообразования которого определяют, впускают в холодную жидкость того же вещества, находящуюся в калориметре. Зная температуру кипения $T_к$, массу жидкости $m_1$ и ее температуру до впускания пара ($T_,$) и после ($Г_,$), составляют уравнение теплового баланса. Пренебрегая количеством теплоты, идущего в окружающее пространство, получим

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

где $Q = rm$ — количество теплоты, выделяющееся при конденсации пара; $Q_1 = c_1 m Q_2 = c_1 m_1 (T_2 - T_1)$ество теплоты, отданное жидкостью, образовавшейся из пара; — количество теплоты, полученное жидкостью, находящейся в калориметре; $Q_3 = c_2 m_2 (T_2 - T_1)$ — количество теплоты, полученное калориметром; $c_1$, $c_2$ — удельные теплоемкости жидкости и вещества калориметра. Отсюда определим удельную теплоту парообразования:

$$r = \frac{c_1 m_1 (T_2 - T_1) + c_2 m_2 (T_2 - T_1) - c_1 m (T_к - T_2)}{m}.$$

**Перегретый пар и его использование в технике**. Пар, имеющий температуру выше температуры насыщения при том же давлении, является ***п е р е г р е т ы м.*** Перегретый пар служит рабочим телом в тепловых двигателях, турбинах и т. д.

Развитие техники зависит от умения как можно более полно использовать громадные запасы внутренней энергии, содержащейся в топливе. Использовать внутреннюю энергию — значит получить за счет нее полезную работу, а это, в свою очередь, означает, что внутреннюю энергию ее нужно сначала превратить в механическую. Это можно осуществить разными способами, например перевести энергию топлива в энергию газа или пара. Расширяясь, газ совершает работу и при этом охлаждается. Его внутренняя энергия переходит в механическую энергию движущегося поршня или вращающейся турбины. Полученный в котлах перегретый пар (сухой) направляют в паровые турбины. Температура перегретого пара настолько велика, что КПД таких турбин превышает 45 %. После совер-

шения работы в турбине пар имеет еще высокую температуру и обладает большим запасом энергии и его используют в отопительных системах.

Энергию водяного пара широко применяют для работы паровых турбин теплоэлектростанций, паровых машин, для нужд производства и бытовых целей.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Конденсация и парообразование происходят только в процессе обмена энергией между окружающей средой и веществом.

• Между жидкостью и паром над ней может существовать динамическое равновесие, т. е. число молекул, покидающих жидкость, равно числу молекул, возвращающихся в нее из пара за одно и то же время.

• Пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, называется *насыщенным.* Давление насыщенного пара определяется только температурой и не зависит от объема.

• В состав атмосферы Земли входят водяные пары. Величина, показывающая количество водяных паров в 1 м³ воздуха, называется *абсолютной влажностью.* Степень насыщения воздуха паром показывает *относительная влажность.*

• Жидкость кипит при температуре, когда давление насыщенного пара этой жидкости равно внешнему давлению.

• Температура кипения повышается с увеличением внешнего давления.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Что называется испарением? конденсацией? 2. От каких условий зависит скорость испарения жидкости? 3. Как объяснить испарение с точки зрения молекулярно-кинетической теории? 4. Приведите примеры насыщенных и ненасыщенных паров. 5. Объясните независимость давления насыщенного пара при постоянной температуре от объема. 6. Что такое абсолютная влажность воздуха? относительная влажность воздуха? 7. Объясните термин «точка росы». 8. Какой процесс называют кипением? Какова зависимость температуры кипения от давления. 9. Что такое перегретый пар? Его получение и использование в технике.

## Примеры решения задач

• **Задача 1**. Котел вместимостью 5 м³ заполнили водой, масса которой $m_1$ = 20 кг, и нагрели ее до температуры $t$ = 180 °С. Найти давление и массу водяных паров в котле. Плотность насыщенных паров воды при этой температуре ρ = 5,05 кг/м³.

**Дано:** $V = 5$ м³; $m_1 = 20$ кг; $T = (273 + 180)$ К $= 453$ К; $\rho = 5{,}05$ кг/м³; $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

**Найти:** $m_2, p$.

**Решение.** Масса пара, необходимая для насыщения котла вместимостью $V$ при температуре $T$,

$$m = pV; \quad m = 5{,}05 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \text{ м}^3 = 25{,}25 \text{ кг}.$$

Получили, что $m > m_1$, т.е. вся вода в котле превратится в пар; следовательно, $m = m_2$ и этот пар будет ненасыщенным.

Давление ненасыщенного пара определяется из уравнения состояния

$$pV = \frac{m_1}{M} RT,$$

откуда

$$p = \frac{m_1 RT}{MV}.$$

**Вычисления:**

$$p = \frac{20 \text{ кг} \cdot 8{,}31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 453 \text{ К}}{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль} \cdot 5 \text{ м}^3} \approx 8{,}4 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 840 \text{ кПа}.$$

**Ответ:** $m_2 = 25{,}25$ кг; $p = 840$ кПа.

● **Задача 2.** Абсолютная влажность воздуха при температуре $t_1 = 60$ °С равна $D_1 = \rho_1 = 0{,}05$ кг/м$^3$. Найти абсолютную влажность $D_2(\rho_2)$ при понижении температуры до $t_2 = 10$ °С. Давление насыщенных паров при температуре $t_2$ равно 1 226 Па.

**Дано:** $T_1 = (273 + 60)$ К $= 333$ К; $\rho_1 = 0{,}05$ кг/м$^3$; $T_2 = (273 + 10)$ К $= 283$ К; $p_2 = 1\,226$ Па; $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

**Найти:** $\rho_2$.

**Решение.** Определим плотность насыщенных паров при температуре $T_2$, исходя из уравнения состояния:

$$p_2 V = \frac{m}{M} RT_2.$$

Так как $m/V = \rho$, то уравнение состояния примет вид

$$p_2 = \frac{\rho_2 RT_2}{M}.$$

откуда

$$\rho_2 = \frac{p_2 M}{RT_2}.$$

**Вычисления:**

$$\rho_2 = \frac{1\,226 \text{ Па} \cdot 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}}{8{,}31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 283 \text{ К}} = 9{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Плотность насыщенных паров при температуре $T_2$ меньше, чем $\rho_1$, т. е. $\rho < \rho_1$. Следовательно, при охлаждении до температуры $T_2$ часть паров сконденсируется и абсолютная влажность воздуха будет определяться плотностью насыщенных паров, т. е.

$$\rho_2 = \rho.$$

**Ответ:** $\rho_2 = 9{,}4 \cdot 10^{-3}$ кг/м$^3$.

● **Задача 3.** В сосуд, содержащий 3 л воды при 20 °С, опустили кусок железа массой 3 кг, нагретый до 540 °С. При этом температура воды поднялась до 55 °С и часть ее испарилась. Найти массу воды, обратившейся в пар.

**Дано:** $V_1 = 3$ л $= 3 \cdot 10^{-3}$ м$^3$; $T_1 = (20 + 273)$ К $= 293$ К; $m = 3$ кг; $T = (540 + 273)$К $= 813$ К; $\Theta = (55 + 273)$К $= 328$ К; $T_2 = (100 + 273)$ К $= 373$ К; $c = 0{,}46 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $c_1 = 4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $r = 22{,}6 \cdot 10^5$ Дж/кг; $\rho_1 = 10^3$ кг/м$^3$.

**Найти:** $m_2$.

**Решение.** Уравнение теплового баланса

$$cm(T - \Theta) = c_1 m_1(\Theta - T_1) + rm_2 + c_1 m_2(T_2 - \Theta),$$

откуда

$$m_2 = \frac{cm(T-\Theta) - c_1 m_1(\Theta - T_1)}{r + c_1(T_2 - \Theta)},$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$.

**Вычисления:**

$$m_2 = \frac{0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 3 \text{ кг}(813-328)\text{К}}{22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг} + 4,19 \cdot 10^3 \text{Дж}/\text{кг} \cdot (373-328)\text{К}} - \frac{4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{м}^3 (328-293)\text{К}}{22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг} + 4,19 \cdot 10^3 \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})} = 0,01 \text{ кг}.$$

**Ответ:** $m_2 = 0,01$ кг.

*Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Давление водяного пара при 27 °С равно 1 330 Па. Каким будет давление пара, если его температура изменится до 127 °С, а объем от 2 до 4 л? (от 3 до 4 л)? Каким будет давление пара, если объем уменьшится от 2 до 0,5 л, а температура снизится до 7 °С? Каким будет этот пар?

2. При 17 °С насыщенный водяной пар отделен от жидкости и после этого нагрет при неизменном объеме до 27 °С. Каким станет его давление?

3. Определить количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть до кипения 3 кг воды, имеющей температуру 20 °С, и обратить в пар 200 г воды.

4. Какое количество стоградусного водяного пара требуется для нагревания 10 кг воды от 10 до 60 °С?

**5.** Может ли вода находиться в жидком состоянии при температуре 300 °С?

6. При какой температуре выпадает роса, если абсолютная влажность воздуха составляет $7 \cdot 10^{-3}$ кг/м$^3$?

**7.** С какой высоты должна падать капля дождя, температура которой 20 °С, чтобы при ударе о Землю она полностью испарилась? Сопротивление воздуха не учитывать.

**8.** Температура воздуха 2 °С. Относительная влажность 60 %. Выпадет ли ночью иней, если температура почвы снизится до —3 °С?

9. В подвале при 8 °С относительная влажность воздуха равна 100 %. На сколько надо повысить температуру воздуха в подвале, чтобы влажность уменьшилась до 60 %?

**Ключевые слова:** *испарение, конденсация, насыщенный пар, абсолютная влажность, относительная влажность, кипение.*

## Глава 7

# СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

## 7.1. Характеристика жидкого состояния вещества

**Определение жидкости.** ***Жидкость*** — это агрегатное состояние вещества, промежуточное между газообразным и твердым. Однако жидкости вследствие различного характера теплового движения молекул существенно отличаются от

газов и твердых тел. Ответ на вопрос, к чему ближе свойства жидкостей (к газу или твердому телу), зависит от того, при каких температурах и давлениях проводят это сравнение. Если силы молекулярного взаимодействия в газах начинают проявляться при низких температурах и больших давлениях, то в жидкостях эти силы играют основную роль. Молекулярное давление в жидкостях очень велико. Обратим внимание, что молекулярное давление — это не давление в том смысле, как оно понималось в газовых законах, а условное обозначение величины, учитывающей действие молекулярных сил. Удельный объем жидкостей в тысячи раз меньше удельного объема газа; следовательно, молекулярное давление в жидкостях в миллионы раз больше, чем в газах. Расчет молекулярного давления для воды дает значение около 1100 МПа. Молекулярное давление может быть вычислено по той работе, которую совершают молекулы, проходя через поверхностный слой жидкости. Если жидкость находится в состоянии равновесия, то молекулы жидкости колеблются около некоторого положения равновесия. В этом случае силы притяжения уравновешены силами отталкивания.

**Свойства жидкости.** Из-за большого молекулярного давления жидкость практически несжимаема. Действительно, находясь под огромным молекулярным давлением, жидкость практически не реагирует на изменения внешнего давления.

Жидкость обладает свойством ***текучести,*** приобретает форму сосуда, в котором она находится.

Рассмотрим отдельную молекулу, находящуюся внутри большого объема жидкости (рис. 7.1). На эту молекулу действуют соседние молекулы, находящиеся на расстоянии $r_0 \approx 1$ нм ***(радиус молекулярного взаимодействия).*** Если радиусом молекулярного взаимодействия ограничить сферу, в центре которой находится рассматриваемая молекула, то в этой области расположатся все молекулы, воздействию которых подвергается данная молекула. Так как плотность жидкости одинакова по всему объему, то равнодействующая молекулярных сил, действующих на рассматриваемую молекулу, равна нулю. Молекулы жидкости притягиваются друг к другу, но так как результирующая сил притяжения равна нулю, то никаких перемещений молекул под действием этих сил не происходит.

При сдвиге слоев друг относительно друга в жидкости возникают силы внутреннего трения, зависящие от коэффициента внутреннего трения ***(динамической вязкости).***

Чем больше динамическая вязкость, тем более вязкой является жидкость. Например, вода — более вязкое вещество, чем ацетон, но менее вязкое, чем глицерин. У большинства газов динамическая вязкость в 100-200 раз меньше, чем у воды. Вязкость жидкостей зависит от температуры и давления. С повышением температуры вязкость жидкостей быстро уменьшается, возрастание давления ведет к увеличению вязкости жидкости.

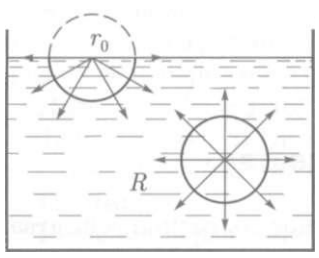



Рис. 7.1

Многочисленные данные свидетельствуют о том, что по структуре жидкость ближе к твердым телам, чем к газам. В жидкостях между молекулами существует ***ближний порядок,*** т.е. можно указать положение молекул, ближайших к первой. Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что структура жидкости подобна структуре твердого тела, из которого она получается, только эта структура выражена слабее.

Советский физик Я. И. Френкель разработал теорию, согласно которой молекула жидкости в течение некото-

рого времени колеблется около своих положений равновесия, как бы находясь в узле кристаллической решетки. Время «оседлой жизни» молекулы жидкости очень мало $(\sim 10^{-10} - 10^{-12}\ \text{с})$, после чего молекула жидкости переходит в новое положение равновесия (новый узел). В простейших случаях пробег молекулы жидкости совпадает с ***постоянной решетки*** — расстоянием между двумя соседними узлами решетки. Молекула, находящаяся в узле решетки, совершает тепловые колебания с амплитудой меньшей, чем постоянная решетки. Это позволяет считать, что жидкость имеет квазикристаллическое (как бы кристаллическое) строение.

## 7.2. Поверхностный слой жидкости. Энергия поверхностного слоя

Происхождение **сил** поверхностного **натяжения.** На поверхности раздела жидкости и ее ненасыщенного пара возникает сила, обусловленная молекулярным взаимодействием граничащих сред.

Каждая молекула, расположенная внутри объема жидкости, равномерно окружена соседними молекулами и взаимодействует с ними, а равнодействующая этих сил равна нулю (см. рис. 7.1). Однако в поверхностном слое, толщину которого будем считать равной радиусу молекулярного взаимодействия $(\sim 1\ \text{нм})$, вследствие неоднородности окружения на молекулу действует сила $R$, не скомпенсированная силами со стороны других молекул жидкости. На такую молекулу действуют силы, составляющие которых в вертикальной и горизонтальной плоскостях различны. Силы в вертикальной плоскости стремятся втянуть молекулу внутрь жидкости. Испытывая одностороннее действие, направленное внутрь жидкости, молекулы поверхностного слоя сжимают жидкость, производя на нее давление, называемое ***молекулярным давлением.***

Силы, действующие в горизонтальной плоскости, стягивают поверхность жидкости. Они называются ***силами поверхностного натяжения***[1]**.** Например, если в раствор спирта в воде влить прованское масло (плотность раствора равна плотности масла), то, находясь в безразличном равновесии, масло принимает форму шара. Известно, что из всех возможных тел, имеющих одинаковый объем, наименьшей поверхностью обладает шар. В реальных условиях на жидкость действует сила тяжести; следовательно, в данном случае ее действие скомпенсировано: жидкость приняла форму шара, хотя обычно сила тяжести препятствует этому.

Если на поверхность воды поместить мелкие кусочки камфоры, то они будут быстро перемещаться по поверхности воды, совершая беспорядочные движения. Камфора, растворяясь в воде, изменяет поверхностное натяжение воды, а так как растворение происходит неравномерно, то кусок камфоры перемещается в сторону, в которой в данный момент поверхностное натяжение больше.

Поверхностное **натяжение.** ***Поверхностное натяжение*** — физическая величина, равная отношению силы $F$ поверхностного натяжения, приложенной к границе поверхностного слоя жидкости и направленной по касательной к поверхности, к длине $l$ этой границы:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \qquad (7.1)$$

[1] **Под действием этой силы поверхностный слой находится в состоянии постоянного натяжения. Силы поверхностного натяжения заставляют свободную поверхность сокращаться.**

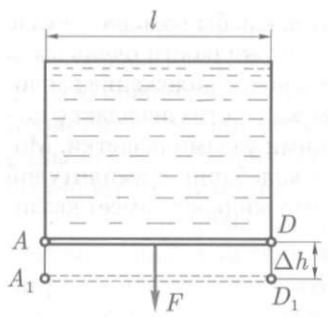



Рис. 7.2

Единица поверхностного натяжения — ***ньютон на метр*** (Н/м).

**Поверхностное натяжение различно для разных жидкостей и зависит от температуры.**

Обычно поверхностное натяжение уменьшается с возрастанием температуры и при критической температуре, когда плотность жидкости и пара одинаковы, поверхностное натяжение жидкости равно нулю.

На образование поверхности жидкости требуется затратить определенную работу, которая служит мерой свободной энергии поверхности.

Проведем такой опыт. На проволочную рамку (рис. 7.2) наденем проволочную легкую перекладину, которая может свободно перемещаться. Начальное положение перекладины $A_1D_1$. Погрузив рамку с сосуд с мыльным раствором, затянем ее мыльной пленкой. Стремясь сократить свою поверхность, мыльная пленка поднимет перекладину вверх и она займет новое положение *AD*. Сила поверхностного натяжения, направленная вертикально вверх, численно равна коэффициенту поверхностного натяжения, умноженному на $2l$, где $l$ — ширина рамки (силы поверхностного натяжения действуют с обеих сторон пленки). Чтобы уравновесить силу поверхностного натяжения, к рамке нужно приложить равную ей и направленную противоположно силу *F*. За счет уменьшения свободной энергии совершается работа $\Delta A = F\Delta h$. Из (7.1) следует, что $F = \alpha \cdot 2l$, тогда $\Delta A = \alpha \cdot 2l\Delta h$. Но $2l\Delta h = \Delta S$ — изменение площади поверхности пленки, поэтому $\Delta A = \alpha\Delta S$, откуда

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S}, \qquad (7.2)$$

***т.е. поверхностное натяжение равно отношению работы, которую нужно затратить при постоянной температуре, чтобы создать поверхность жидкости площадью $\Delta S$, к площади этой поверхности.***

Свободная энергия поверхности жидкости может переходить в другие формы энергии или за счет нее может совершаться работа по перемещению жидкости. Поверхностное натяжение различных жидкостей при 20° С (293 К) приведено в табл. П.7 (см. прил.).

## 7.3. Явления на границе жидкости с твердым телом. Капиллярные явления

**Смачивание.** При соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела возможны два случая: жидкость смачивает твердое тело и не смачивает его. Если, например, капли ртути поместить на поверхность чистого железа и на чистое стекло, то на поверхности железа они будут растекаться (рис. 7.3, ***а)***, а на поверхности стекла иметь форму, близкую к шарообразной (рис. 7.3, ***б)***. Для выясне-

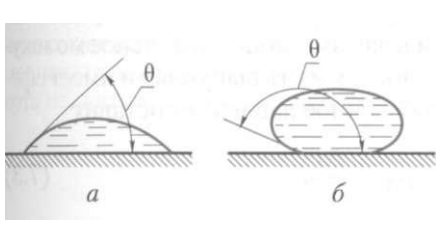



Рис. 7.3

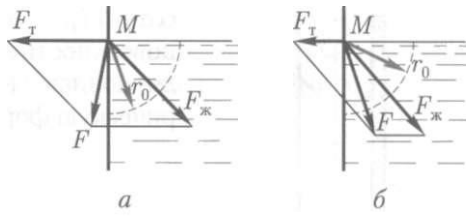



Рис. 7.4

ния причин этих явлении рассмотрим отдельную молекулу, находящуюся на поверхности жидкости и соприкасающуюся с погруженным в жидкость твердым телом. Опишем вокруг молекулы М (рис. **7.4)** сферу действия молекулярных сил радиусом $r_0$. Сила $F_ж$ воздействия всех молекул жидкости, входящих в сферу молекулярного действия, направлена по биссектрисе прямого угла, образованного стенкой и поверхностью жидкости, внутри жидкости. Кроме того, со стороны твердого тела на молекулу *М* действуют молекулярные силы $F_т$, которые направлены перпендикулярно поверхности твердого тела. Равнодействующую ***F*** этих двух сил находят по правилу параллелограмма. В зависимости от соотношения $F_ж$ и $F_т$ равнодействующая направлена в сторону твердого тела (рис. **7.4,** ***а)*** или жидкости (рис. **7.4,** ***б)*.**

**Если силы взаимодействия молекул твердого тела и молекул жидкости больше сил взаимодействия между молекулами жидкости, то жидкость смачивает твердое тело (ртуть — железо).** В **противном случае жидкость не смачивает твердого тела (ртуть — стекло).**

Искривленная поверхность жидкости в узких цилиндрических трубках или около стенок сосуда называется ***мениском.*** Поверхность смачивающей жидкости вблизи твердого тела поднимается, и мениск — вогнутый (рис. **7.5,** ***а)*.** У несмачивающей жидкости ее поверхность вблизи твердого тела несколько опускается, и мениск — выпуклый (рис. **7.5,** ***б)*.**

Определить, смачивающей или несмачивающей по отношению к твердому телу является жидкость, можно по краевому углу $\theta$ (угол между поверхностью твердого тела и касательной к поверхности жидкости в точке *М;* рис. **7.4** и **7.5).**

Для жидкости, смачивающей поверхность твердого тела, краевой угол $\theta$ острый $(\theta < \pi/2)$; чем лучше смачивание, тем меньше $\theta$. При полном смачивании $\theta = 0$. Для несмачивающих жидкостей краевой угол изменяется в пределах $\pi/2 < \theta < \pi$; при полном несмачивании $\theta = \pi$.

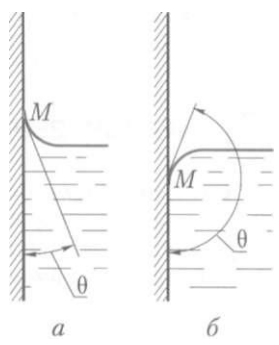



Рис. 7.5

**У смачивающей жидкости мениск вогнутый, у несмачивающей — выпуклый.**

**Капиллярные явления.** Особенно хорошо наблюдается искривление мениска жидкости в тонких трубках, называемых ***капиллярами.*** Если в сосуд с жидкостью опустить капилляр, стенки которого смачиваются жидкостью, то жидкость поднимается по капилляру на некоторую вы-

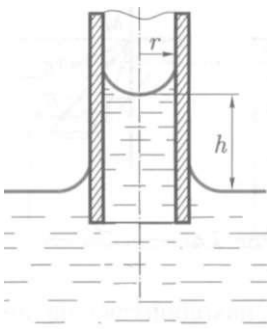


Рис. 7.6

соту $h$ (рис. 7.6). Это объясняется тем, что искривление поверхности жидкости вызывает дополнительное молекулярное давление. Если поверхность выпуклая и имеет сферическую форму, то добавочное давление составит

$$p_{Л} = \frac{2\alpha}{r}, \tag{7.3}$$

где r — радиус кривизны поверхности.

Давление $p_{Л}$ алгебраически складывается с атмосферным. В случае выпуклого мениска (r > 0) суммарное давление больше атмосферного и жидкость опускается по капилляру. Если мениск вогнутый (r < 0), то суммарное давление меньше атмосферного и жидкость поднимается по капилляру. Жидкость поднимается (или опускается) до тех пор, пока гидростатическое давление $p = \rho g h$ столба жидкости высотой $h$ не компенсирует добавочное (лапласово) давление $p_{Л}$. (Лаплас установил зависимость этого давления от формы мениска.) В этом случае

$$\frac{2\alpha}{r} = \rho g h, \tag{7.4}$$

где $\rho$ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Из (7.4) можно определить

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r}. \tag{7.5}$$

Явление капиллярности в быту, природе и технике. Явление капиллярности играет огромную роль в самых разнообразных процессах, происходящих в природе. Например, проникновение влаги из почвы в растения, в стебли и листья обусловлено капиллярностью. Клетки растения образуют капиллярные каналы, и, как видно из формулы (7.5), чем меньше радиус капилляра, тем выше по нему поднимается жидкость. Процесс кровообращения тоже связан с капиллярностью. Кровеносные сосуды являются капиллярами.

Особенно большое значение имеет капиллярность почвы. По мельчайшим сосудам влага из глубины перемещается к поверхности почвы. Если хотят уменьшить испарение влаги, то почву рыхлят, разрушая капилляры. В целях увеличения притока влаги из глубины почву укатывают, увеличивая количество капиллярных каналов. В технике капиллярные явления имеют большое значение в процессах сушки, в строительстве.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Поверхностное натяжение* — термодинамическая характеристика поверхности раздела жидкости и ее насыщенного пара, равная отношению работы, которую нужно затратить при постоянной температуре, чтобы создать поверхность жидкости площадью *AS,* к площади этой поверхности:

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S}.$$

• *Капиллярные явления* обусловлены поверхностным натяжением на границе раздела различных сред. Жидкости, смачивающие поверхность капилляров, имеют вогнутый мениск, а жидкости, не смачивающие поверхность капилляров, — выпуклый мениск. Высота поднятия (опускания) жидкости по капилляру

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r}.$$

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Объясните, исходя из молекулярно-кинетической теории строения вещества, упругость, текучесть и вязкость жидкости. 2. От чего зависит поверхностное натяжение? 3. Как направлена сила поверхностного натяжения жидкости? **4.** Как определить изменение потенциальной энергии поверхностного слоя жидкости при увеличении или уменьшении ее поверхности? 5. Какие явления можно наблюдать на границе жидкости с твердым телом? 6. Почему уровень однородной жидкости в различных капиллярных трубках сообщающихся сосудов различный? 7. Выведите формулу, по которой определяется высота поднятия (опускания) жидкости по капилляру.

## Примеры решения задач

**t Задача 1.** Две пластины погружены в спирт. На какую высоту поднимется уровень спирта, если расстояние между пластинами уменьшить с 1 до 0,5 мм? Смачивание пластины считать полным.

**Дано:** $\alpha = 0{,}022$ Н/м; $\rho = 0{,}8 \cdot 10^3$ кг/м$^3$; $r_1 = 1$ мм $= 10^{-3}$ м; $r_2 = 0{,}5$ мм $= 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.
**Найти:** $\Delta h$.

Решение. Между пластинами образуется мениск, имеющий цилиндрическую поверхность. В этом случае

$$h_1 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1};\quad h_2 = \frac{2\alpha}{\rho g r_2};\quad \Delta h = h_2 - h_1 = \frac{2\alpha}{\rho g}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right),$$

где $r_1$ и $r_2$ — расстояние между пластинами.

**Вычисления:**

$$\Delta h = \frac{2 \cdot 0{,}022\ \text{Н/м}}{0{,}8 \cdot 10^3\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2}\left(\frac{1}{0{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{м}} - \frac{1}{10^{-3}\ \text{м}}\right) =$$

$$= 5{,}6 \cdot 10^{-3}\ \text{м} = 5{,}6\ \text{мм}.$$

**Ответ:** $\Delta h = 5{,}6$ мм.

• **Задача 2.** Определить радиус пузырька воздуха, находящегося непосредственно под поверхностью воды, если плотность воздуха в пузырьке 260 кг/м$^3$, поверхностное натяжение $72 \cdot 10^{-3}$ Н/м, атмосферное давление $1 \cdot 10^5$ Па, температура 290 К.

**Дано:** $\alpha = 72 \cdot 10^{-3}$ Н/м; $\rho = 260$ кг/м$^3$; $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Н/м$^2$; $T = 290$ К.
**Найти:** r

**Решение.** Согласно (7.3),

$$p = p_0 + p_л,$$

где $p_л = \dfrac{2\alpha}{r}$.

Тогда

$$p = p_0 + \frac{2\alpha}{r}. \qquad (1)$$

Из уравнения Клапейрона – Менделеева $pV = \dfrac{m}{M}RT$ получим

$$\rho = \frac{pM}{RT}. \qquad (2)$$

Подставляя (1) в (2), имеем

$$\rho = \frac{\left(p_0 + \dfrac{2\alpha}{r}\right)M}{RT},$$

откуда

$$r = \frac{2\alpha M}{\rho RT - Mp_0}.$$

**Вычисления:**

$$r = \frac{2 \cdot 72 \cdot 10^{-3}\ \text{Н/м} \cdot 29 \cdot 10^{-3}\ \text{кг/моль}}{260\ \text{кг/м}^3 \cdot 8{,}3\ \text{Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 290\ \text{К} - 29 \cdot 10^{-3}\ \text{кг/моль} \cdot 10^5\ \text{Н/м}^2} \approx$$

$$\approx 6{,}7 \cdot 10^{-9}\ \text{м} \approx 6{,}7\ \text{нм}.$$

**Ответ:** $r \approx 6{,}7$ нм.

## *Задачи для самостоятельного решения*

1. Определить изменение свободной энергии мыльного пузыря, если при его раздувании диаметр возрастает от $3 \cdot 10^{-2}$ до $30 \cdot 10^{-2}$ м. Поверхностное натяжение $30 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

2. С помощью пипетки отмерено 40 капель воды. Найти поверхностное натяжение воды, если масса отсчитанных капель 1,84 г, а диаметр шейки пипетки 2 мм.

3. Поверхностное натяжение керосина $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ Н/м. Какую работу совершат силы поверхностного натяжения при уменьшении поверхностного слоя керосина на 25 см$^2$?

**4.** Найти добавочное давление, создаваемое поверхностью воздушного пузырька диаметром 1 мм, находящегося под водой.

5. В одной и той же капиллярной трубке вода поднимается на 50 мм, а керосин — на 26 мм. Определить поверхностное натяжение керосина. Поверхностное натяжение воды 0,072 Н/м.

6. В сосуд с жидкостью опущена капиллярная трубка с внутренним диаметром 3 мм. Найти поверхностное натяжение жидкости, если вес жидкости в капилляре равен 0,2 Н. Смачивание считать полным.

**7.** На какую высоту поднимется вода между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками, если расстояние между ними равно 1 мм? Поверхностное натяжение воды 0,072 Н/м.

**Ключевые слова:** *поверхностное натяжение, смачивание, капилляры.*

Глава 8

# СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

## 8.1. Характеристика твердого состояния вещества

**Анизотропия кристаллов.** Разнообразные твердые тела, встречающиеся в природе, можно разделить на две группы, отличающиеся по своим свойствам. Первую группу составляют ***кристаллические тела,*** вторую — ***аморфные тела.***

Отличительной чертой кристаллического состояния вещества является ***анизотропия*** — зависимость ряда физических свойств, таких, как скорость распространения света, теплопроводность, модуль упругости и др., от направления. Тела, свойства которых одинаковы по всем направлениям, называются ***изотропными.*** Изотропными являются газы, большинство жидкостей и аморфные тела.

Причиной анизотропии кристаллов является упорядоченное расположение атомов, образующих ***пространственную решетку.*** Чтобы представить пространственную решетку, нужно мысленно соединить близлежащие точки, в которых расположены центры атомов кристалла. Эти точки называются ***узлами кристаллической решетки.*** В узлах решетки могут располагаться как одиночные атомы (рис. 8**.1),** так и группа атомов или ионы (рис. 8.2).

Чтобы объяснить анизотропию, проанализируем строение кристалла. Рассмотрим в качестве примера строение кристалла графита, изображенного на рис. 8.3. Атомы углерода в этом кристалле располагаются в плоскостях, которые находятся друг от друга на некотором определенном расстоянии. Расстояние между атомами, расположенными в одной плоскости, меньше расстояния между плоскостями; значит, и силы взаимодействия между атомами, лежащими в одной плоскости, больше сил взаимодействия между атомами различных плоскостей. Поэтому кристалл графита легче всего разрушить в направлении, параллельном атомным плоскостям.

**Монокристаллы и поликристаллы.** Большинство твердых материалов являются ***поликристаллическими;*** они состоят из множества беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен — кристаллитов — мелких монокристаллов. Каждый из мелких монокристаллов анизотропен, но так как кристаллики ориентированы хаотически, то в целом поликристаллическое тело является изотропным. Если монокристаллы каким-нибудь способом ориентированы в определен-

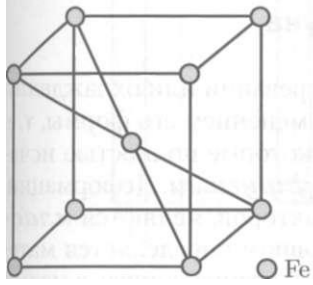



Рис. 8.1

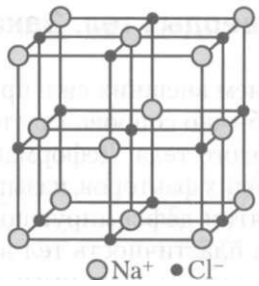



Рис. 8.2

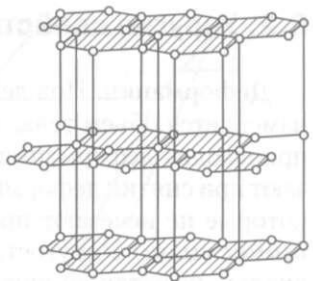


Рис. 8.3

ном направлении, например прокаткой, то поликристаллическое тело становится анизотропным.

Крупные одиночные кристаллы называются ***монокристаллами.*** Крупные кристаллы в природе встречаются очень редко. Потребность промышленности, науки и техники в кристаллах велика, они находят широкое применение в радиотехнике, оптике и других отраслях народного хозяйства. Например, кристаллы рубина используются в квантовых генераторах света — лазерах. С помощью кристаллов сегнетовой соли получают ультразвуковые колебания. В настоящее время искусственно изготовляются монокристаллы многих веществ: кварца, алмаза, корунда, рубина и др. Чтобы вырастить кристаллы, нужны особые условия. Например, для получения алмаза требуются давление $10^4$ МПа и температура 2 000 °С.

Атомам одного и того же химического элемента могут соответствовать различные по свойствам кристаллические структуры. Углероду присущи слоистая структура графита и пространственная структура алмаза, свойства которых совершенно различны. Из молекул воды может состоять лед пяти различных кристаллических структур.

Свойство вещества одного состава образовывать различные кристаллические структуры, обладающие разными физическими свойствами, называется ***полиморфизмом.***

Для кристаллических тел характерен ***дальний порядок,*** т. е. правильная повторяемость положений узлов кристаллической решетки на любых расстояниях в кристалле.

**Аморфные тела.** Кроме кристаллических тел существуют ***аморфные тела.*** Они, хотя и рассматриваются обычно как твердые, представляют собой переохлажденные жидкости.

Если рассматривать некоторый атом аморфного тела как центральный, то ближайшие к нему атомы будут располагаться в определенном порядке, но по мере удаления от «центрального» атома этот порядок нарушается и расположение атомов может быть различным, т. е. случайным. В аморфных телах в отличие от кристаллических существует лишь ближний порядок во взаимном расположении соседних атомов. К аморфным телам относятся стекло, пластмассы и т. д. Многие тела (сера, глицерин, сахар и т.п.) могут существовать как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии, или, как принято говорить, в стеклообразной форме. В природе аморфное состояние тел менее распространено, чем кристаллическое.

## 8.2. Упругие свойства твердых тел. Закон Гука

**Деформация.** Под действием внешних сил, при нагревании или охлаждении изменяется объем тела, что обычно сопровождается изменением его формы, т. е. происходит деформация твердого тела. Деформации, которые полностью исчезают при снятии деформирующих факторов, называют ***упругими.*** Деформации, которые не исчезают при снятии деформирующих факторов, являются ***пластическими.*** Упругость или пластичность тел в основном определяется материалом, из которого они изготовлены. Например, сталь и резина упруги, а медь и воск пластичны.

Перепишем закон Гука в виде $\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E}\sigma$, или

$$\sigma = E\varepsilon. \tag{8.4}$$

При упругой деформации тела напряжение пропорционально относительному удлинению.

С учетом **(8.1)** соотношение **(8.4)** примет вид

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta l}{l}. \tag{8.5}$$

Чем больше $E$, тем меньшую деформацию при прочих равных условиях испытывает изделие.

**I Деформация тел связана с изменением их внутренней энергии.**

Независимо от того, происходит ли деформация растяжения или сжатия, внутренняя энергия тела увеличивается, так как над ним внешними силами совершается работа. Рассмотрим, например, случай упругой деформации удлинения. По мере удлинения растягивающая сила должна увеличиться. В начале процесса она равна нулю, в конце равна $F$; ее среднее значение находим как среднее арифметическое:

$$F_{\text{ср}} = \frac{0+F}{2} = \frac{F}{2}.$$

Конечному значению силы $F$ соответствует удлинение $\Delta l$. Для того чтобы растянуть тело на $\Delta l$, следует совершить работу

$$A = F_{\text{ср}}\Delta l = \frac{F\Delta l}{2}.$$

Так как $F = \frac{ES\Delta l}{l}$, то

$$A = \frac{1}{2}\frac{ES}{l}\Delta l^2. \tag{8.6}$$

Из соотношения **(8.6)** следует, что работа, затраченная на деформацию тела, пропорциональна $\Delta l^2$.

## 8.3. Механические свойства твердых тел

**Прочность материала.** Для расчета различных конструкций необходимо знать прочность материала. ***Прочностью*** материала называется его способность выдерживать нагрузки без разрушения.

***Пределом прочности*** $\sigma_{\text{п}}$ называют значение нормального механического напряжения, которому соответствует наибольшая выдерживаемая телом нагруз-

ка; ***пределом упругости {пропорциональности)*** $\sigma_y$ — значение $\sigma$, до которого сохраняется пропорциональность между деформацией и приложенной силой, т.е. выполняется закон Гука (8.4).

**Пластичность материала.** Предел прочности многих материалов значительно больше предела упругости. Такие материалы называются ***вязкими.*** Они обладают и упругой, и пластической деформациями. К ним относятся медь, цинк, железо и др.

Материалы, у которых отсутствует область упругих деформаций, относятся к ***пластическим,*** например воск, глина, пластилин.

Способность изделия противостоять разрушению зависит не только от качества материала, но также и от формы изделия и вида воздействия. Например, стержень легче разрушить односторонним сжатием, чем растяжением.

**Хрупкость материала.** Кроме прочности в технике материалы различают по их ***твердости.*** Из двух материалов тот считается более твердым, который царапает другой. Резцы и сверла для резания металлов должны, очевидно, обладать большей твердостью, чем обрабатываемый материал. В современной технике для резцов и сверл употребляют сверхтвердые сплавы. Из природных материалов наибольшей твердостью отличается алмаз.

Большое значение на практике имеет свойство твердых тел, называемое ***хрупкостью.*** Изделие называют хрупким, если оно разрушается при небольших деформациях. Например, изделия из стекла, фарфора — хрупкие. Чугун, мрамор, янтарь обладают повышенной хрупкостью, а сталь, медь, свинец не являются хрупкими. У хрупких материалов предел упругости и предел прочности почти одинаковы. Пластичные свойства у хрупких материалов практически не проявляются.

## 8.4.* Тепловое расширение твердых тел и жидкостей

**Тепловое расширение.** Известно, что при повышении температуры линейные размеры твердых тел увеличиваются, а при понижении — уменьшаются. ***Тепловым расширением*** называется увеличение линейных размеров тела и его объема, происходящее при повышении температуры.

**При нагревании твердого тела увеличиваются средние расстояния между атомами.**

**Линейное расширение.** Линейное тепловое расширение характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения $\alpha$. Предположим, что твердое тело при начальной температуре $T_0$ имеет длину $l_0$. При нагревании тела до температуры $T$ его длина увеличится до $l$, т. е. на $\Delta l = l - l_0$. Относительное удлинение тела составит $\Delta l / l_0$. Величина, равная отношению относительного удлинения тела к изменению его температуры на $\Delta T = T - T_0$, называется ***температурным коэффициентом линейного расширения:***

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta l}{l_0}. \qquad (8.7)$$

Из формулы (8.7) определяется зависимость длины твердого тела от температуры:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T). \qquad (8.8)$$

Для большинства тел можно считать, что температурные коэффициенты линейного расширения практически не зависят от температуры. Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых материалов при 273 К приведены в табл. П.8 (см. прил.).

**Объемное расширение.** С возрастанием температуры изменяется и объем тела. В пределах не слишком большого температурного интервала объем увеличивается пропорционально температуре. Объемное расширение твердых тел характеризуется температурным ***коэффициентом объемного расширения*** $\beta$ - величиной, равной отношению относительного увеличения объема $\Delta V/V_0$ тела к изменению температуры $\Delta T$:

$$\beta = \frac{1}{\Delta T}\frac{\Delta V}{V_0}, \qquad (8.9)$$

где $\Delta V = V - V_0$, $V_0$ и $V$ — объемы тела при температурах $T_0$ и T соответственно. Из (8.9) получим

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T). \qquad (8.10)$$

Между температурными коэффициентами линейного и объемного расширения существует связь

$$\beta = 3\alpha, \qquad (8.11)$$

которая легко устанавливается из соотношения между длиной $l$ тела и его объемом ($V = l^3$)

**Тепловое расширение жидкостей.** При нагревании жидкости возрастает средняя кинетическая энергия хаотического движения ее молекул. Это приводит к увеличению расстояния между молекулами, а следовательно, и к увеличению объема. Тепловое расширение жидкостей, как и твердых тел, характеризуется ***температурным коэффициентом объемного расширения.***

Температурные коэффициенты объемного расширения некоторых жидкостей при 273 К приведены в табл. 8.1.

Объем жидкости при нагревании определяется по формуле (8.10). При увеличении объема тел уменьшается их плотность. Обозначив через $\rho$ и $\rho_0$ плотности при температурах $T$ и $T_0$ соответственно и учитывая, что $\rho = m/V$, получаем

$$\rho = \frac{\rho_0}{1+\beta\Delta T}. \qquad (8.12)$$

Таблица 8.1

| Вещество | $\beta$, $10^{-3}$ K$^{-1}$ | Вещество | $\beta$, $10^{-3}$ K$^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Ртуть | 0,18 | Спирт | 1,1 |
| Керосин | 1,0 | Эфир | 1,7 |

**Значение теплового расширения** тел **в природе и технике.** При конструировании приборов и машин необходимо учитывать тепловое расширение материалов, из которых они выполняются. Так, при изготовлении различных электрических вводов, где необходима спайка металла со стеклом, следует выбирать такие металлы, температурные коэффициенты линейного расширения которых были бы соизмеримы с температурными коэффициентами линейного расширения стекла. Если эти коэффициенты значительно отличаются, то при нагревании или охлаждении спая возникают сильные механические напряжения, которые могут вывести из строя прибор. Детали многих машин и механизмов, для которых тепловое расширение нежелательно, выполняют из особого сплава никеля с железом, называемого инваром ($\alpha = 1 \cdot 10^{-6}\ \text{К}^{-1}$). Инвар применяют в точных приборах, например для маятников часов, показания которых не должны зависеть от температуры. Из инвара делают эталоны длины, применяемые при особо точных измерениях, например геодезических.

Наименьший температурный коэффициент линейного расширения имеет кварц ($\alpha = 4 \cdot 10^{-7}\ \text{К}^{-1}$). В сосудах, изготовляемых из кварца, даже при значительном перепаде температур практически не возникают механические напряжения. Кварцевая посуда не лопается при очень резких изменениях температуры, например остается целой, если раскаленную докрасна посуду опустить в воду.

При строительстве линий газопроводов и трубопроводов на определенных расстояниях делают прогнутые участки из труб (компенсаторы). Эти участки предохраняют трубы от разрыва при изменении их длины в случае нагревания или охлаждения. При монтаже линий электропередачи провода между фермами не натягивают, а делают с заметным провисом; величина этого провиса зависит от температурного коэффициента линейного расширения материала, из которого изготовлены провода. Провода электрифицированных железных дорог находятся в натянутом состоянии с помощью систем блоков с грузами, но не закрепляются неподвижно, так как с изменением температуры их длина изменяется. Можно привести немало примеров при сварных работах, литье и т.д., когда учитывается линейное расширение.

Как указывалось в **8.4,** большинство жидкостей при нагревании расширяется, с этим явлением приходится считаться и в технике. Если жидкость нагревать в закрытом сосуде, то она может разорвать этот сосуд. Поэтому при заполнении различных емкостей их не закрывают герметично или же оставляют пространство, необходимое для увеличения объема жидкости.

## 8.5. Плавление и кристаллизация

**Плавление.** Вещество существует в твердом кристаллическом состоянии при определенных значениях давления и температуры. В этом состоянии вещество находится до тех пор, пока кинетической энергии атомов недостаточно, чтобы преодолеть силы взаимного притяжения. Эти силы удерживают атомы на некотором расстоянии друг относительно друга, не позволяя им перемещаться. При этом атом колеблется около положения своего равновесия. При нагревании твердого тела кинетическая энергия атомов (или молекул) возрастает. При этом амплитуды колебаний могут стать настолько большими, что уже будут сравнимы с периодом решетки, произойдет нарушение дальнего порядка, кристаллическая

пературе плавления и удельной теплоте плавления для одного и того же тела при одном и том же давлении. Когда кристаллизация закончится (точка *F),* тело начнет охлаждаться (участок *FG).*

Процесс кристаллизации происходит в двухфазной системе, вблизи центров кристаллизации. Такими центрами могут быть пылинки, мельчайшие примеси, неоднородности. Если жидкость чистая, т. е. в ней нет центров кристаллизации, то при ее быстром охлаждении можно получить переохлажденную жидкость (т. е. жидкость с температурой ниже температуры кристаллизации). Этот процесс на рис. 8.6 изображен линией *DE.* Состояние переохлаждения является неустойчивым; при сильном переохлаждении образуются центры кристаллизации и жидкость превращается в твердое тело.

**Жидкие кристаллы.** Это состояние, в котором обнаруживаются структурные свойства, промежуточные между свойствами твердого кристалла и жидкости. Жидкие кристаллы образуют вещества, молекулы которых имеют удлиненную палочкообразную форму. Образование жидких кристаллов происходит в узком интервале температур. При охлаждении жидкие кристаллы превращаются в твердые.

**Сублимация. Десублимация.*** У некоторых твердых тел, таких, например, как нафталин, иод, камфора, твердая углекислота (сухой лед), наблюдается переход сразу из твердого состояния в газообразное, т. е. происходит испарение. Переход тела из твердого состояния в газообразное минуя жидкое называют ***сублимацией,*** или возгонкой. Обратный процесс называют ***десублимацией.*** Все твердые тела сублимируют, но процесс сублимации у разных тел протекает с различной скоростью. При комнатной температуре скорость протекания этого процесса настолько мала, что сублимацию практически нельзя обнаружить.

Процесс сублимации протекает как при нагревании твердого тела, так и без подвода теплоты извне. Во втором случае происходит перераспределение внутренней энергии между твердым и газообразным состояниями. При сублимации тело охлаждается, так как его покидают наиболее быстрые молекулы, обладающие кинетической энергией, которая достаточна для преодоления молекулярного притяжения и отрыва молекул от поверхности твердого тела. Средняя кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается; следовательно, тело охлаждается. Для того чтобы температура сублимирующего тела оставалась постоянной, к нему извне нужно подводить теплоту.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Большинство твердых тел находится в *кристаллическом состоянии.* Кристаллы анизотропны, т. е. физические свойства кристаллов зависят от выбранного направления.

• *Аморфное состояние* — твердое состояние вещества. В отличие от кристаллов у аморфных тел нет строгого порядка в расположении атомов.

• В результате внешних воздействий происходит изменение конфигурации твердого тела, т. е. оно деформируется. Деформация называется *упругой,* если она исчезает после снятия нагрузки, и *пластической,* если она после снятия нагрузки не исчезает.

При малых деформациях в упругой среде выполняется *закон Гука*

$$\varepsilon = \alpha\sigma,$$

• В процессе нагревания тел происходит изменение его размеров, т.е. *тепловое расширение.*

• Переход вещества из кристаллического твердого состояния в жидкое называется *плавлением*. Наличие определенной температуры плавления — важный признак кристаллического строения твердых тел. Температура плавления зависит от внешнего давления. Плавление происходит с поглощением теплоты. Удельная теплота плавления:

$$\lambda = Q/m.$$

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** На какие две группы можно разделить твердые тела? Охарактеризуйте каждую из них. **2.** Какие тела называют анизотропными, какие — изотропными? **3.** Объясните понятие пространственной решетки. **4.** Какие типы кристаллических решеток вам известны? **5.** Какие виды деформаций вы знаете? **6.** Объясните причину возникновения упругих сил при деформации. **7.** Сформулируйте закон Гука. **8.** Изменяется ли внутренняя энергия деформированных тел? **9.** Дайте определение понятий упругости, прочности, пластичности. **10.** Объясните тепловое расширение тел с точки зрения молекулярно-кинетической теории. **11.** Объясните особенности теплового расширения воды. **12.** Какое значение имеет тепловое расширение тел в природе и технике? **13.** Объясните процесс плавления с точки зрения молекулярно-кинетической теории. **14.** Как зависит температура плавления от давления? **15.** Что называют удельной теплотой плавления? **16.** Как изменяются объем и плотность вещества при плавлении? **17.** Дайте определение понятия сублимации.

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** К проволоке из углеродистой стали подвешен груз массой 100 кг. Длина проволоки 1 м, диаметр 2 мм. Модуль Юнга для стали $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, предел прочности $\sigma_п$ = 330 МПа. На сколько увеличится длина проволоки? Превышает ли приложенное напряжение предел прочности?

**Дано:** $l = 1$ м; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $m$ = 100 кг; $\sigma_п = 3{,}3 \cdot 10^8$ Па.

**Найти:** $\Delta l$, $\sigma$.

**Решение.** Из формулы (8.5) находим

$$\Delta l = \frac{lF}{ES} = \frac{4lmg}{\pi d^2 E},$$

где $l$ — длина проволоки; $\Delta l$ — изменение длины; $F = mg$ — сила, действующая на проволоку; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ — площадь поперечного сечения проволоки.

Найдем приложенное нормальное напряжение [см. (8.1)]:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4mg}{\pi d^2}.$$

**Вычисления:**

$$\Delta l = \frac{4 \cdot 1 \text{ м} \cdot 100 \text{ кг} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2}{3{,}14 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}} = 1{,}57 \text{ мм};$$

$$\sigma = \frac{4 \cdot 100 \text{ кг} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2}{3{,}14 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 3{,}12 \cdot 10^8 \text{ Па} = 312 \text{ МПа}.$$

**Анализ:** полученное значение $\sigma$ не превышает предела прочности.
**Ответ:** $\Delta l = 1{,}57$ мм; $\sigma = 312$ МПа.

● **Задача 2.** Трубка из меди имеет длину 0,5 м при температуре 200 °С. Какова длина этой трубки при температуре 10 °С?
**Дано:** $l_1 = 0{,}5$ м; $t_1 = 200$ °С; $\alpha = 16{,}7 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$; $t_2 = 10$ °С.
**Найти:** $l_2$.
**Решение.** Так как в табл. П.8 (прил.) температурный коэффициент линейного расширения дан для веществ при температуре 0 °С, а длина $l_0$ трубки при температуре 0 °С неизвестна, то для определения длины $l_0$ трубки при 10 °С нужно записать два равенства ($\Delta t = \Delta T$):

$$\begin{cases} l_1 = l_0(1 + \alpha \Delta t_1); \\ l_2 = l_0(1 + \alpha \Delta t_2). \end{cases}$$

Решая совместно систему уравнений, получаем

$$l_2 = l_1 \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}.$$

**Вычисления:**

$$l_2 = 0{,}5 \text{ м} \frac{1 + 16{,}7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \cdot (273 + 10) \text{ К}}{1 + 16{,}7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \cdot (273 + 200) \text{ К}} = 0{,}5 \text{ м} \frac{1{,}004726}{1{,}007899} = 0{,}498 \text{ м}.$$

**Ответ:** $l_2 = 0{,}498$ м.

● **Задача 3.** Сообщающиеся сосуды заполнены жидкостью, имеющей температуру $t_1$. При нагревании жидкости в одном из сосудов до температуры $t_2$ уровень жидкости в нем установился на высоте $h_2$, а в другом сосуде — на высоте $h_1$. Найти температурный коэффициент объемного расширения жидкости.
**Дано:** $t_1$; $t_2$; $h_1$; $h_2$.
**Найти:** $\beta$.
**Решение.** Плотность жидкости обратно пропорциональна ее объему. Следовательно, если при температуре 0 °С плотность жидкости составляет $\rho_0$, то при температурах $t_1$ и $t_2$ [см. (8.12)] соответственно имеем ($\Delta t = \Delta T$)

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_1}, \quad \rho_2 = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_2}.$$

Отсюда

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1}.$$

Из условия гидростатического равновесия ($p_1 = p_2$ или $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$) получаем, что $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$. Таким образом,

$$\frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1} = \frac{h_2}{h_1}.$$

Отсюда

$$Q = Q_1 + Q_2 = cm(T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda m.$$

**Вычисления:**

$$Q = 880 \text{ Дж/(кг·К)} \cdot 200 \text{ кг } (993 - 293)\text{К} + 3{,}9 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг} \cdot 200 \text{ кг} \approx$$
$$\approx 19 \cdot 10^7 \text{ Дж} \approx 190 \text{ МДж}.$$

**Ответ:** $Q = 190$ МДж.

## *Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Медный стержень длиной 3 м и сечением 1,5 мм$^2$ растягивают. Чему равна работа растяжения, если относительное удлинение равно 0,001?

**2.** Какую наименьшую длину должна иметь свинцовая проволока, чтобы она разорвалась под действием собственного веса при ее вертикальном подвешивании за один конец? Предел прочности свинца 19,6 МПа.

**3.** Стальная струна диаметром 0,5 мм и длиной 80 см растягивается на 1 мм. Какая сила приложена к струне? Вычислить работу при растяжении струны.

**4.** Длина медной проволоки при нагревании от 0 до 100 °С увеличилась на 0,17 м. Определить температурный коэффициент линейного расширения меди, если первоначальная длина проволоки 100 м.

**5.** Медный стержень, взятый при температуре 10 °С, плотно вставлен между неподвижными плоскостями. Стержень нагревается до 80 °С. Определить напряжение, возникающее в нем.

**6.** Какую силу нужно приложить к стальной проволоке диаметром 2 мм, чтобы получить такое же удлинение, как при ее нагревании на 100 К? Для стали $\alpha = 1{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{К}^{-1}$, $E = 21{,}6\text{-}10^{10}$ Па.

7. Стальной стержень при температуре 0 °С имеет длину 0,2 м. При какой температуре его длина будет 0,213 м?

**8.** Какой объем имеет нефть при 0 °С, если при температуре 20 °С ее объем равен 65 м$^3$?

9. Почему сосуды для перевозки и хранения жидкого топлива, если они находятся в условиях изменяющейся температуры, нельзя заполнять до краев?

**10.** Нефть налита в цилиндрическую цистерну высотой 2 м. При температуре 0 °С нефть не доходит до краев цистерны на 0,1 м. Рассчитать, при какой температуре нефть начнет выливаться из цистерны.

**11.** Масса 1 л спирта при 0 °С равна 0,80 кг. Определить плотность спирта при температуре 15 °С.

**12.** Какое количество теплоты необходимо для превращения 5 кг льда, взятого при температуре —20 °С, в пар, температура которого 100 °С?

**13.** Сколько теплоты нужно затратить, чтобы расплавить при температуре плавления 20 кг свинца?

**14.** Чтобы охладить 5 л воды от 20 до 8 °С, в нее бросают лед при температуре 0 °С. Определить массу льда, расходуемого на охлаждение.

**15.** Смесь, состоящую из 5 кг льда и 15 кг воды при общей температуре 0 °С, нагревают до температуры 80 °С, пропуская через нее водяной пар при 100 °С. Определить необходимую для этого массу пара.

**16.** В сосуде находится смесь 0,5 л воды и 0,5 кг льда при 0 °С. Теплоемкость сосуда 1680 Дж/К. Какое количество водяного стоградусного пара было пропущено в воду, если весь лед растаял и температура воды установилась 30 °С?

**Ключевые слова:** *анизотропия, полиморфизм, деформация, закон Гука, прочность, расширение, плавление, кристаллизация.*

Глава 9

# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

## 9.1. Электрические заряды. Закон сохранения заряда

**Электрический заряд.** Все тела в природе состоят из мельчайших частиц, которые условно названы элементарными. Элементарные частицы характеризуются массой и электрическим зарядом. Сила электромагнитного взаимодействия частиц на много порядков превышает силу их гравитационного взаимодействия. Значение силы электромагнитного взаимодействия частиц определяется их электрическими зарядами.

По современным представлениям, *ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД* является физической величиной, характеризующей интенсивность электромагнитных взаимодействий.

**Два знака электрических зарядов.** В природе существуют частицы с электрическими зарядами противоположных знаков. Заряд электрона считают отрицательным, а заряд протона — элементарной частицы, которая входит в состав ядра атома, — положительным. Большинство тел *электрически нейтрально;* число электронов в них равно числу протонов. Нейтрален атом любого вещества. Если нарушить каким-то образом электрическую нейтральность тела, то оно становится ***наэлектризованным.*** Тело, имеющее избыток электронов, заряжено отрицательно. Тело, в котором электронов меньше, чем положительно заряженных частиц, заряжено положительно. Положительный заряд образуется, например, на стекле, потертом кожей, отрицательный — на янтаре, потертом шерстью.

**Элементарный заряд.** При электризации электрический заряд изменяется не непрерывным и произвольным образом, а только на строго определенное значение, равное или кратное минимальному количеству электричества, называемому элементарным электрическим зарядом.

**I Электрический заряд имеет дискретный характер и изменяется на целую I кратную величину (квантуется).**

Наименьшая по массе стабильная частица, обладающая элементарным электрическим отрицательным зарядом, называется *электроном.* Заряд электрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса электрона $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг ложителен и по модулю равен заряду электрона, его масса . Заряд состоящего из Дозаряженных частиц, кратен целым значениям заряда электрона;

$Q = \pm Ne$. Элементарный заряд впервые был измерен Р. Э. Милликеном в 1909 г. Существуют ли дробные заряды? Это предположение в сказанием существования ***кварков*** — частиц, из которых построено большинство тяжелых элементарных частиц, например протонов. Заряд кварков предполагали равным $\pm 1/3e, \pm 2/3e$. Поиски кварков проводились многими учеными различными методами, но все они дали отрицательный результат. Таким образом, в настоящее время экспериментально с большой точностью установлено, что

**дробных зарядов в свободном состоянии не существует.**

**Закон сохранения заряда.** Значение заряда, измеряемое в различных инициальных системах отсчета, всегда одинаково и не зависит от того, движется он или покоится.

> ***Закон сохранения электрического заряда:*** **суммарный заряд электрически изолированной системы не изменяется.**
> **Электрические заряды не создаются и не исчезают, а только передаются от одного тела к другому или перераспределяются внутри данного тела:**

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = \text{const}. \qquad (9.1)$$

Кроме протонов и электронов существует большое число других элементарных заряженных частиц. Все они участвуют в различных процессах взаимопревращений, но каковы бы ни были эти процессы, суммарный заряд частиц до взаимопревращения равен суммарному заряду после взаимопревращения.

Итак, заряд не является самостоятельной сущностью, не зависимой от материи, он — одно из свойств материи. Закон сохранения заряда имеет такое же фундаментальное значение в физике, как и другие законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса и т.д.).

## 9.2. Закон Кулона

**Основной закон электростатики.** Раздел электродинамики, в котором изучается взаимодействие неподвижных электрических зарядов, называют ***электростатикой.*** Такое взаимодействие осуществляется посредством ***электростатического поля.***

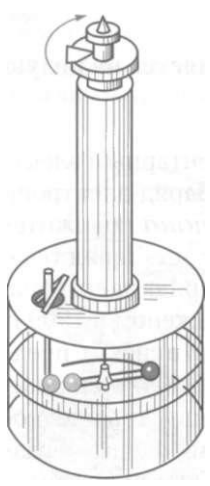


Рис. 9.1

Основной закон электростатики — закон взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов (электрически заряженных тел, размеры которых малы по сравнению с расстояниями между ними) - был экспериментально установлен французским физиком Ш.Кулоном (1736-1806) в 1785 г. и назван его именем[1].

**Опыт Кулона.** Для определения силы взаимодействия двух зарядов Кулон воспользовался ***крутильными*** *ВЕСАМИ* (рис. 9.1) — установкой, состоящей из стеклянной палочки, подвешенной на тонкой упругой проволоке и помещенной в стеклянный цилиндрический сосуд. На одном конце палочки находится маленький металлический шарик, а на другом - противовес. Верхний конец нити прикреплен к шкале с делениями. С помощью этой шкалы определяют угол закручивания нити. Через отверстие в крышке сосуда вводят другой такой же шарик. Если шарикам сообщен заряд, то они взаимодействуют между собой. О силе взаимодействия судят по углу закручивания нити. В общем случае силы взаимодействия зависят от формы и размеров наэлектризованных тел и характе-

[1] **Этот закон был установлен английским ученым Г. Кавендишем за 13 лет до открытия его Кулоном.**

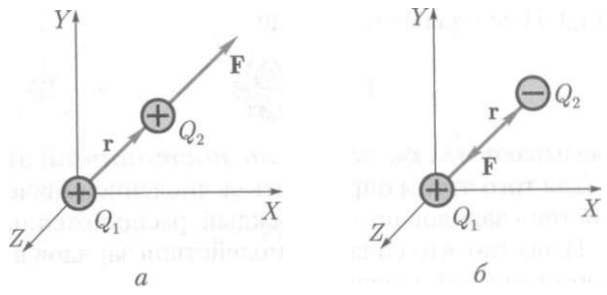



Рис. 9.2

ра распределения зарядов на них. В случае неподвижных точечных зарядов, т. е. зарядов, распределенных на телах, линейные размеры которых малы по сравнению с расстояниями между ними, справедлив закон Кулона.

**Формулировка закона Кулона.** Опытным путем Кулоном было установлено, что если заряд вносимого шарика увеличивать в $n$ раз, оставляя заряд шарика, закрепленного на стеклянной палочке, постоянным, то сила их взаимодействия увеличивается в $n$ раз. Если расстояние между шариками увеличивать в $n$ раз, то сила их взаимодействия уменьшится в $n^2$ раз.

*ЗАКОН КУЛОНА:* **сила электрического взаимодействия $F$ между двумя неподвижными точечными электрически заряженными телами $Q_1$ и $Q_2$ в вакууме пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния $r$ между ними:**

$$F = k\frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}, \tag{9.2}$$

где $k$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц физических величин.

При взаимодействии одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются. Силы Кулона направлены по прямой, соединяющей заряды.

Сила отталкивания **F,** действующая на заряд $Q_2$ со стороны одноименного заряда $Q_1$, совпадает по направлению с радиусом-вектором **r,** проведенным из $Q_1$ к этому заряду (рис. 9.2, ***а)***. Сила притяжения, действующая на заряд $Q_2$ со стороны разноименного заряда $Q_1$, имеет противоположное направление (рис. 9.2, ***б)***. Силы отталкивания принято считать положительными, силы притяжения — отрицательными.

Знак модуля в обозначении заряда в дальнейшем будем опускать.

В СИ заряд — производная величина, определяемая через основную величину — силу тока. Единица электрического заряда в СИ — ***кулон*** (Кл).

*КУЛОН* ***равен электрическому заряду, проходящему за*** 1с ***через поперечное сечение проводника при силе тока*** 1 А.

Коэффициент пропорциональности в законе Кулона (9.2) в СИ определяется по формуле

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}. \tag{9.3}$$

Закон Кулона в СИ записывается в виде

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \qquad (9.4)$$

Величину $\varepsilon_0$ называют ***электрической постоянной,*** это одна из физических констант. Для того чтобы определить ее численное значение, рассмотрим случай взаимодействия зарядов по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга. Известно, что сила взаимодействия зарядов в этом случае равна $9 \cdot 10^9$ Н. Из формулы (9.5) найдем

$$\varepsilon_0 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 F} = \frac{1\ \text{Кл}^2}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 1\ \text{м}^2 \cdot 9 \cdot 10^9\ \text{Н}} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2), \qquad (9.5)$$

т.е. $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

## 9.3. Электрическое поле. Напряженность электрического поля

**Электрическое поле.** Электрическое поле представляет собой особый вид материи, связанный с электрическими зарядами и передающий действия зарядов друг на друга.

Электрическое поле не возникает при взаимодействии зарядов. Любой заряд независимо от наличия других зарядов всегда имеет электрическое поле. Если заряд неподвижен, то электрическое поле называется ***электростатическим полем.***

**Электростатическое поле не меняется во времени и создается только электрическими зарядами.**

Изучая основы электродинамики, мы будем знакомиться и с переменным во времени электрическим полем, которое не связано с зарядами неразрывно. Многие свойства статических и переменных полей совпадают, но между ними есть и существенные различия. В дальнейшем поле будем называть электрическим, если данное свойство в равной мере присуще как статическим, так и переменным полям.

В современной физике электрическое поле рассматривается как особая форма материи, обладающая специфическими физическими свойствами. Главным из них является следующее: на электрические заряды, помещенные в это поле, действуют силы, пропорциональные этим зарядам. Электрическое поле можно обнаружить, если в пространство, окружающее заряд $Q$, внести другой заряд. Обычно для исследования свойств поля пользуются положительным зарядом, который называют ***пробным*** и обозначают $Q_{\text{пр}}$, При этом считают, что пробный заряд не искажает изучаемого поля, т.е. пренебрегают его собственным полем. На пробный заряд, помещенный в какую-либо точку поля, создаваемого зарядом $Q$, действует сила

$$F = \frac{QQ_{\text{пр}}}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \qquad (9.6)$$

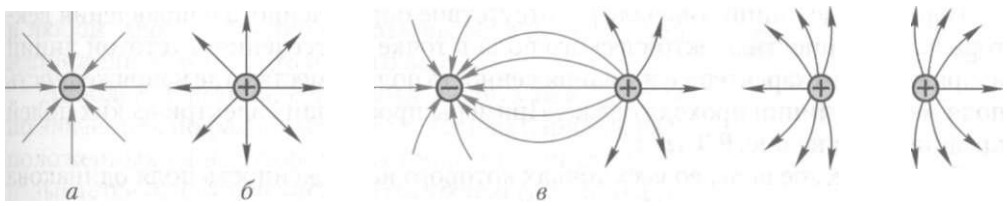



Рис. 9.3

**Напряженность электрического поля.** Если в одну и ту же точку поля вносить разные заряды $Q_1$, $Q_2$, $Q_3$, ..., то на них будут действовать разные силы $F_1$, $F_2$, $F_3$, ..., но отношение $F_1/Q_1 = F_2/Q_2 = F_3/Q_3$ для этой точки поля всегда будет постоянным. Для разных точек поля можно составить точно такие же отношения, т. е. этой величиной можно количественно характеризовать поле в различных точках. Отношение $\mathbf{F}/Q_{\text{пр}}$ называют ***напряженностью электрического поля:***

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q_{\text{пр}}} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\frac{\mathbf{r}}{r}, \qquad (9.7)$$

где $r$ — расстояние от заряда $Q$, создающего поле, до точки поля, в которой определяется напряженность.

В СИ напряженность электрического поля выражается в ***ньютонах на кулон*** (Н/Кл).

Напряженность — силовая характеристика поля, она численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Напряженность — величина векторная. За направление вектора напряженности **E** принимают направление силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля.

**Линии напряженности.** Электрическое поле графически удобно представлять силовыми линиями. ***Силовыми линиями,*** или ***линиями напряженности поля,*** называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности в данной точке поля.

**Линии напряженности электростатического поля никогда не могут быть замкнуты сами на себя. Они обязательно имеют начало и конец либо уходят в бесконечность.**

Это свидетельствует о наличии в природе двух родов электрических зарядов. Условились считать, что

**линии напряженности электрического поля направлены от положительного заряда к отрицательному, т.е. выходят из положительного заряда, а входят в отрицательный заряд.**

**Линии напряженности никогда не пересекаются.**

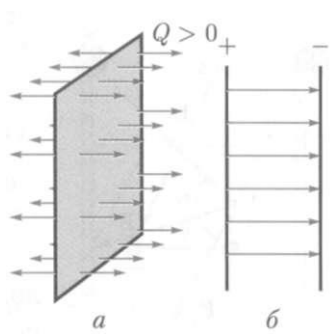



Рис. 9.4

Пересечение линий означало бы отсутствие определенного направления вектора напряженности электрического поля в точке пересечения. Густотой линий напряженности характеризуют напряженность поля. В местах, где напряженность поля меньше, линии проходят реже. Примеры простейших электрических полей представлены на рис. **9.3,** *а –г*.

Электрическое поле, во всех точках которого напряженность поля одинакова по модулю и направлению (E = const), называется ***однородным.***

Примером такого поля могут быть электрические поля равномерно заряженной плоскости (рис. **9.4,** *а)* и плоского конденсатора вдали от краев его обкладок (рис. **9.4,** *б*).

## 9.4. Принцип суперпозиции полей

**Принцип суперпозиции.** Результирующая сила, действующая на точечный заряд $Q$ со стороны двух других зарядов $Q_1$ и $Q_2$, равна геометрической сумме сил $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_2$ со стороны каждого из зарядов $Q_1$ и $Q_2$. Так как

$$\mathbf{F}_1 = Q\mathbf{E}_1 \quad \text{и} \quad \mathbf{F}_2 = Q\mathbf{E}_2,$$

где $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$ - напряженности полей, созданных зарядами $Q_1$ и $Q_2$, то

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{E}_1 + Q\mathbf{E}_2 = Q(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)$$

Из этого равенства следует, что геометрическую сумму $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$ надо рассматривать как результирующую напряженность поля в точке $A$, где расположен заряд $Q$ (рис. **9.5):**

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2.$$

В этом состоит ***принцип наложения,*** или ***суперпозиции, полей.***

Если поле создано двумя зарядами $Q_1$ и $Q_2$, то модуль вектора **E** определяется по теореме косинусов (см. рис. **9.5):**

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha}, \tag{9.8}$$

где $\alpha$ — угол между $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$.

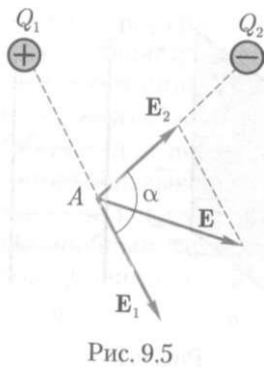


Рис. 9.5

В общем случае принцип суперпозиции формулируется так:

**если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают поля напряженностями $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3$ и т.д., то результирующая напряженность поля в этой точке равна**

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \ldots. \tag{9.9}$$

Из принципа суперпозиции полей следует, что при наложении полей они не оказывают никакого влияния друг на друга. Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряженности поля системы заряженных частиц

в любой точке достаточно знать выражение **(9.7)** для напряженности поля точечного заряда.

Диполь.* Система, состоящая из двух одинаковых по значению, но разноименных точечных зарядов, расположенных на некотором расстоянии $l$ друг от друга, называется ***электрическим диполем*** (рис. **9.6).** Отрезок прямой $l$, соединяющий оба заряда, называется осью диполя.

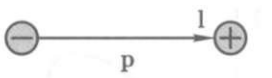


Рис. 9.6

Основной характеристикой диполя является его ***электрический (дипольный) момент*** — вектор, численно равный произведению заряда $Q$ на вектор 1 и направленный от отрицательного заряда к положительному:

$$\mathbf{p} = Q\mathbf{l}. \qquad (9.10)$$

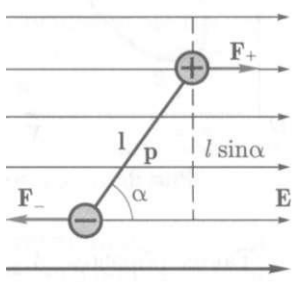


Рис. 9.7

Если диполь поместить в однородное электрическое поле напряженностью $E$ (рис. **9.7),** то на каждый из его зарядов действует сила: на положительный $\mathbf{F}_+ = +QE$, на отрицательный $\mathbf{F}_- = -QE$. Эти силы равны по модулю, но противоположны по направлению. Они образуют пару сил, плечо которой равно $l\sin\alpha$, и создают момент пары сил **M.** Вектор **M** направлен перпендикулярно векторам **p** и **E** (на рис. **9.7** — к нам). Модуль **M** определяется соотношением $M = QEl\sin\alpha$, где $\alpha$ — угол между векторами **p** и **E.**

В однородном поле момент пары сил стремится повернуть диполь так, чтобы векторы **p** и **E** были параллельны.

## **9.5.** Работа сил электростатического поля

На заряд, помещенный в стационарное (не изменяющееся во времени) электрическое поле, действует сила, вследствие чего возможно перемещение заряда. При перемещении заряда $Q$ в электростатическом поле под действием силы $F$ совершается работа

$$\Delta A = F\Delta s\cos\alpha = QE\Delta s\cos\alpha,$$

где $\Delta s$ — модуль вектора перемещения $\Delta\mathbf{s}$; $\alpha$ —угол между направлениями векторов E и $\Delta$s. Если поле однородно (E = const), то сила $F = QE$, действующая на заряд со стороны поля, также постоянна. В этом случае работа

$$A = QEs\cos\alpha. \qquad (9.11)$$

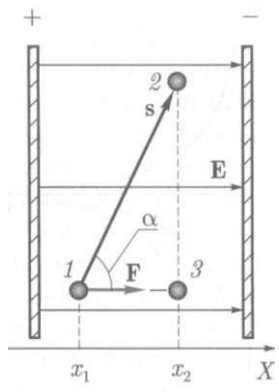


Рис. 9.8

Если поле неоднородно, как, например, поле точечного заряда, то напряженность поля в различных его точках различна. Чтобы вычислить работу в этом случае, выясним, зависит ли работа электрических сил при перемещении заряда из одной точки поля в другую от формы пути.

Пусть заряд $Q$ перемещается из точки *1* в точку *2* в однородном электростатическом поле напряженностью

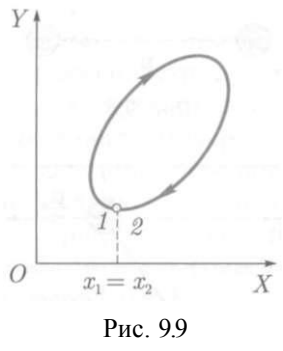



Рис. 9.9

*Е(рис.* 9.8). Из точки *1* в точку *2* заряд может попасть по различным траекториям, например *1—2* и *1 — 3—2.* Сравним работы сил поля в обоих случаях.

По формуле (9.11), работа сил поля на пути *1—2*

$$A_{12} = QE(x_2 - x_1),$$

так как $s\cos\alpha = x_2 - x_1$. Работа сил поля на пути *1 — 3—2* равна сумме работ $A_{13}$ и $A_{32}$, но $A_{32} = 0$. Так как векторы напряженности и перемещения взаимно-перпендикулярны и их скалярное произведение равно нулю, то

$$A_{132} = A_{13} + A_{32} = QE(x_2 - x_1).$$

Таким образом, $A_{12} = A_{132}$,

**Работа сил электростатического поля при перемещении заряда не зависит от формы пути, а зависит лишь от взаимного расположения начальной и конечной точек траектории.**

Этот вывод является свойством *потенциальных полей.* Из него следует (рис. 9.9) еще одно заключение.

**Работа, совершаемая в электростатическом поле по замкнутому контуру, равна нулю** $(x_1 = x_2)$.
**При перемещении зарядов изменяется их взаимное расположение, поэтому работа, совершаемая электрическими силами, в этом случае равна изменению потенциальной энергии перемещаемого заряда:**

$$A = -\Delta\Pi. \qquad (9.12)$$

Это утверждение справедливо как для однородного, так и для неоднородного поля.

Работа электрических сил отталкивания одноименных зарядов положительна, если заряды удаляются друг от друга, и отрицательна, если происходит сближение зарядов. Работа электрических сил притяжения разноименных зарядов положительна, если они сближаются, и отрицательна, если они удаляются друг от друга. Так как работа электрических сил всегда равна уменьшению потенциальной энергии, то потенциальная энергия отталкивания приближающихся друг к другу одноименных зарядов положительна и увеличивается (рис. 9.10, кривая *1).* Если же разноименные заряды удаляются друг от друга, то потенциальная энергия их притяжения отрицательна и стремится к нулю при $r \to \infty$ (рис. 9.10, кривая ***2).***

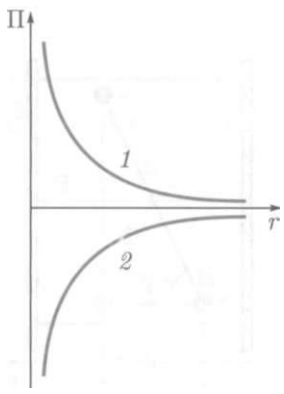



Рис. 9.10

Потенциальная энергия заряда в однородном поле связана с напряженностью поля соотношением

$$\Pi = -QEx, \qquad (9.13)$$

где $x$ — координата заряда, если считать, что П = 0 при $x = 0$.

## 9.6. Потенциал. Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности

Потенциал. Выберем в электростатическом поле какую-либо точку за начальную и будем вести от нее отсчет потенциальной энергии. Для перемещения заряда из начальной точки в данную точку поля при любой форме пути должна быть затрачена одна и та же работа $A$ (см. 9.5). Отсюда следует вывод.

**В** любой точке поля потенциальная энергия П заряда численно равна работе, которую необходимо затратить для перемещения заряда в эту точку.

Подобно тому как потенциальная энергия в поле сил тяготения пропорциональна массе тела, потенциальная энергия электростатического поля пропорциональна заряду:

$$\Pi = \varphi Q. \tag{9.14}$$

Величина

$$\varphi = \frac{\Pi}{Q} \tag{9.15}$$

называется ***электрическим потенциалом поля. Она характеризует потенциальную энергию, которой обладал бы положительный единичный заряд, помещенный в данную точку поля.***

Разность потенциалов. Для того чтобы вычислить полную потенциальную энергию заряда, надо найти работу сил поля по перемещению заряда из данной точки поля в точку, где поле отсутствует, например на бесконечно большое расстояние от зарядов, создающих поле.

В соответствии с (9.12) работа сил поля может быть вычислена через разность потенциалов начальной и конечной точек траектории:

$$A = -\Delta\Pi = -(\Pi_2 - \Pi_1) = Q(\varphi_1 - \varphi_2). \tag{9.16}$$

Величину $(\varphi_1 - \varphi_2)$ называют ***разностью потенциалов*** электростатического поля. Понятие разности потенциалов (или напряжения) применимо лишь к двум различным точкам поля.

В СИ разность потенциалов выражается в ***вольтах:*** 1 В = 1 Дж/Кл.

***Вольт — это разность потенциалов (электрическое напряжение), при которой перемещение заряда*** 1 Кл ***сопровождается работой*** 1 Дж.

Потенциал является энергетической характеристикой электростатического поля и как скалярная величина может принимать положительные или отрицательные значения. Следует обратить внимание, что физический смысл имеет разность потенциалов, так как через нее выражается работа сил поля по перемещению заряда. Говоря о потенциале в данной точке поля, всегда подразумевают разность потенциалов, имея в виду, что одна из точек выбрана заранее и находится в «бесконечности». Так как значение потенциальной энергии зависит от выбора нулевого уровня энергии, то значение потенциала может быть определено лишь по отношению к некоторому уровню, принятому за нулевой.

Выбор точки с нулевым потенциалом обычно определяется в зависимости от условий задачи. При решении задач целесообразно полагать равным нулю потенциал Земли, а не бесконечно удаленных точек электрического поля. Выбор нулевого уровня потенциала не влияет на значение разности потенциалов.

При решении задач часто необходимо знать потенциал электростатического поля точечного заряда $Q$ в точке, удаленной на расстояние $r$ от заряда:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (9.17)$$

Эта формула справедлива при условии, что потенциал стремится к нулю при $r \to \infty$.

Формулой (9.17) можно пользоваться и для определения потенциала поля шара радиусом $R$ и зарядом $Q$, равномерно распределенным по его поверхности $(r > R)$. Внутри шара имеется постоянный потенциал поля, равный

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}. \qquad (9.18)$$

**Эквипотенциальные поверхности.** Графически электрическое поле можно изображать не только с помощью линий напряженности, но и с помощью ***эквипотенциальных поверхностей*** — совокупностей точек, имеющих одинаковый потенциал. Пересекаясь с плоскостью чертежа, эквипотенциальные поверхности дают ***эквипотенциальные линии.***

На рис. 9.11 показаны эквипотенциальные линии поля точечного положительного заряда. Вокруг этого заряда можно провести бесконечное множество эквипотенциальных линий. Их чертят таким образом, чтобы разность потенциалов для двух любых соседних линий была одна и та же (например, 1 В). Такое изображение эквипотенциальных линий дает наглядное представление о том, как меняется разность потенциалов в данном поле.

На рис. 9.12 показан участок эквипотенциальной линии. В точке *1* помещен заряд $Q$. В однородном электрическом поле перенесем этот заряд $Q$ на расстояние $x$ из точки *1* в точку *2* вдоль линии равного потенциала $(\varphi = \text{const})$. В этом случае работа определяется по формуле $A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$. В то же время $A = Fx\cos\alpha = QEx\cos\alpha$; следовательно, $Q(\varphi_1 - \varphi_2) = QEx\cos\alpha$. Так как $\varphi = \text{const}$,

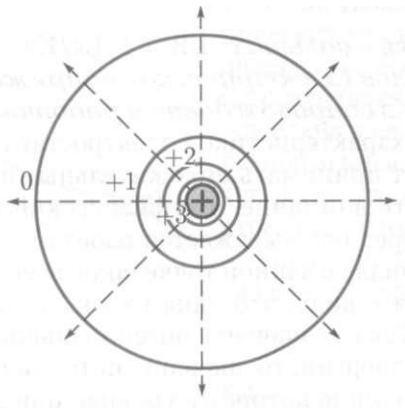



Рис. 9.11

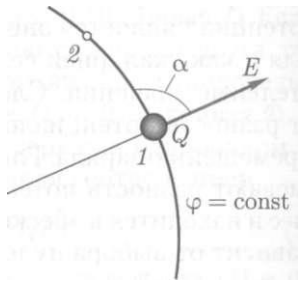



Рис. 9.12

тс $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ (левая часть уравнения равна нулю, а следовательно, и правая часть должна быть равна нулю). Так как $Q, x$ и $E$ не могут быть равны нулю, то $\cos\alpha = 0$, т. е. $\alpha$ = 90°, откуда следует вывод:

**вектор напряженности электрического поля Е всегда перпендикулярен поверхности равного потенциала.**

Отметим два важных свойства эквипотенциальных поверхностей:

**1) в каждой точке эквипотенциальной поверхности вектор напряженности поля перпендикулярен ей и направлен в сторону убывания потенциала;**
**2) работа по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю.**

Исходя из свойств эквипотенциальных поверхностей можно по известному расположению эквипотенциальных поверхностей в каждой точке поля определить направление вектора напряженности или по известному расположению линий напряженности построить эквипотенциальные поверхности.

Если электрическое поле образовано несколькими зарядами, то потенциал в какой-либо точке поля равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым зарядом:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \ldots \qquad (9.19)$$

## 9.7. Связь между напряженностью и разностью потенциалов электрического поля

Электрическое поле имеет две характеристики: силовую (напряженность **Е)** и энергетическую (потенциал $\varphi$). Напряженность и потенциал — различные характеристики одной и той же точки поля; следовательно, между ними должна существовать однозначная связь.

Если известно распределение потенциала, т.е. его значение в каждой точке поля, то можно найти и напряженность этого поля в каждой точке. Рассмотрим работу электрических сил в однородном поле при перемещении положительного заряда из точки *1* в точку *2* (рис. 9.13):

$$A = QE_x\Delta x, \qquad (9.20)$$

где $E_x$ — проекция вектора напряженности **Е** на ось *X*.

С другой стороны, эту работу можно выразить через разность потенциалов на концах отрезка $\Delta x$:

$$A = Q(\varphi_2 - \varphi_1) = -Q\Delta\varphi, \qquad (9.21)$$

где $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$.

Приравняв правые части формул (9.20) и (9.21), получим $QE_x\Delta x = -Q\Delta\varphi$, откуда

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}.$$

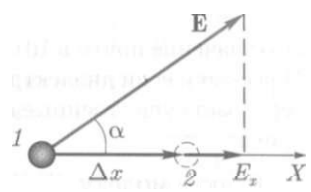


Рис. 9.13

Аналогично,

$$E_y = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta y},\ E_z = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta z}.$$

Следовательно, зная напряженность поля в каждой точке, можно вычислить разность потенциалов между любыми точками.

В случае однородного поля, например поля плоского конденсатора (см. рис. 9.4, ***б)*** модуль напряженности определяется по формуле

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \qquad (9.22)$$

где $d$ — расстояние; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Разность потенциалов (электрическое напряжение) в СИ выражается в *вольтах* (В); напряженность электрического поля, в соответствии с (9.22), — в *вольтах на метр* (В/м).

## 9.8. Диэлектрики в электрическом поле. Поляризация диэлектриков

**Диэлектрики.** ***Диэлектриками*** называют вещества, не проводящие электрического тока. Термин «диэлектрик» был введен М. Фарадеем для обозначения среды, в которой может в отличие от металлов длительное время существовать электрическое поле. Диэлектрики используют для изоляции электрических цепей, а также для сообщения электрическим установкам особых свойств, позволяющих более полно использовать объем и массу материалов, из которых они изготовлены. Диэлектриками могут быть вещества, находящиеся в любом из трех агрегатных состояний: газообразном (азот, водород), жидком (продукты нефтепереработки), твердом (янтарь, фарфор, кварц).

**В** идеальном диэлектрике **нет свободных зарядов.**

Внешние электроны атомов диэлектрика крепко связаны с ядрами. При внутриатомном расстоянии порядка $10^{-10}$ м даже элементарный электрический заряд создает поле напряженностью

$$E = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{Кл} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 10^{-20}\ \text{м}^2} \approx 10^{11}\ \text{В/м}.$$

Это значение почти в 10 000 раз больше, чем достигнутые в настоящее время ($10^7$ В/м). И все-таки если диэлектрик внести во внешнее электрическое поле, то диэлектрик претерпевает существенные изменения, что объясняется молекулярным строением диэлектрика.

Всякая молекула представляет собой систему с суммарным зарядом, равным нулю. Однако молекулы обладают электрическими свойствами и их в первом

приближении можно рассматривать как электрические диполи. Положительный заряд диполя равен суммарному заряду ядер и помещен в «центре тяжести» положительных зарядов; отрицательный заряд равен суммарному заряду электронов и помещен в «центре тяжести» отрицательных зарядов.

Выделяют три группы диэлектриков.

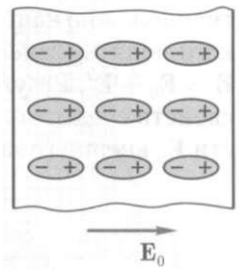


Рис. 9.14

**1. Нейтральные, неполярные, диэлектрики, имеют симметричное строение молекул.**

Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля в них совпадают; следовательно, такие молекулы не обладают собственным дипольным моментом. К неполярным диэлектрикам относятся бензол, парафин, полиэтилен, фторопласт, $H_2$, $0_2$, $N_2$ и др.

**2. Дипольные, полярные, диэлектрики имеют асимметричное строение молекул, что приводит к несовпадению центров тяжести положительных и отрицательных зарядов.**

Молекула представляет в этом случае жесткий диполь. Электрический момент такого диполя (дипольный момент) есть $\mathbf{p} = Ql$ (см. рис. 9.6). При отсутствии внешнего поля дипольные моменты молекул ориентированы хаотически и их суммарный дипольный момент равен нулю. К полярным диэлектрикам относятся фенол, нитробензол и др.

**3. Кристаллические, слабополярные, диэлектрики характеризуются ионной структурой.**

К ним относятся NaCl, KCl, CsCl и др.

**Поляризация.** При помещении диэлектриков во внешнее электрическое поле происходит процесс их поляризации. **Электрической поляризацией** называют особое состояние вещества, при котором электрический момент некоторого объема этого вещества не равен нулю.

В результате поляризации на гранях диэлектрика появляются заряды, не компенсированные соседними диполями. Это приводит к тому, что на одной его поверхности возникают положительные заряды, а на другой — отрицательные (рис. 9.14). Эти электрические заряды называют ***связанными.***

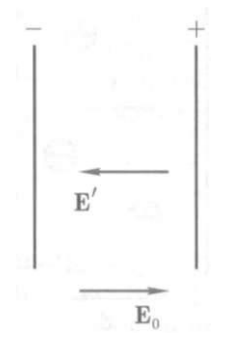


Рис. 9.15

**Связанные заряды принадлежат молекулам диэлектрика и не могут быть удалены с его поверхности.**

При возрастании напряженности внешнего поля ориентация электрических моментов диполей еще более упорядочивается.

Напряженность электрического поля $\mathbf{E}'$, создаваемого связанными зарядами внутри диэлектрика, направлена про-

тивоположно напряженности внешнего, поляризующего диэлектрик электрического поля $\mathbf{E}_0$ (рис. 9.15). Напряженность суммарного поля внутри диэлектрика $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'$. Результирующая напряженность **E** поля зависит от электрических свойств среды, она пропорциональна приложенной к диэлектрику напряженности $\mathbf{E}_0$ внешнего поля:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{\varepsilon}. \qquad (9.23)$$

***Диэлектрическая проницаемость*** $\varepsilon = \dfrac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{E}}$ среды показывает, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше, чем в диэлектрике. Это величина безразмерная. Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ приведена в табл. П.13 (см. прил.).

## 9.9. Проводники в электрическом поле

**Проводники в электрическом поле.** В зависимости от характера воздействия электрического поля тела подразделяют на проводники, диэлектрики и полупроводники. Свойства тел и поведение их в электрическом поле определяются строением и расположением атомов в телах. В состав атомов входят электрически заряженные частицы: положительные — протоны, отрицательные — электроны. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален, так как число протонов, входящих в состав ядра атома, равно числу электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих «электронные оболочки» атома. Электроны удерживаются в атоме силами электрического притяжения к ядру. Однако в металлах из-за особенностей их строения при внешнем воздействии электроны легко могут быть удалены за пределы «своего» атома и свободно перемещаться до тех пор, пока не будут захвачены каким-либо другим атомом. Электроны, потерявшие связь со своим атомом, называют ***свободными.*** Их движение имеет хаотический характер и зависит от температуры: чем выше температура, тем больше скорость движения свободных электронов. В металлических проводниках концентрация свободных электронов порядка $10^{28}$ м$^{-3}$, Движение таких электронов аналогично тепловому движению частиц газа, поэтому совокупность свободных электронов называют ***электронным газом.***

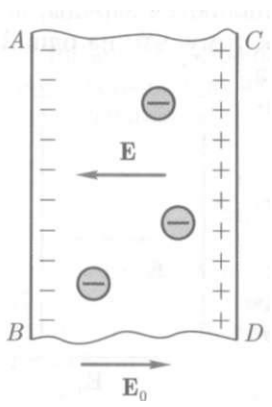


Рис. 9.16

Если металлический проводник помещен в электрическое поле, то на хаотическое движение электронов накладывается упорядоченное движение в направлении, противоположном напряженности поля. Такое движение электронов называют ***дрейфом.*** На рис. 9.16 представлен проводник, помещенный во внешнее однородное электрическое поле $\mathbf{E}_0$. Под действием поля электроны перемещаются в направлении поверхности *AB*. В результате на поверхности проводника *AB* возникает избыточный отрицательный свободный заряд, на поверхности проводника *CD* — избыточный положительный заряд.

Явление перераспределения зарядов внутри проводника под действием внешнего электрического поля называется ***электростатической индукцией.*** Заряды, появляющиеся на поверхности проводника, называются ***наведенными,*** или ***индуцированными.*** Перераспределение зарядов внутри проводника происходит до тех пор, пока напряженность внешнего поля не станет равной противоположно направленной напряженности **E** поля индуцированных зарядов. В этом случае $|E_0| = |E|$, т.е. напряженность результирующего поля равна нулю, и упорядоченное движение зарядов в проводнике прекращается, т. е. наступает равновесие.

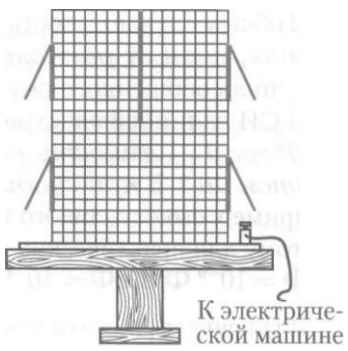


Рис. 9.17

При равновесии зарядов на проводнике потенциал всех его точек одинаков. Следовательно, *в случае равновесия зарядов поверхность проводника эквипотенциальна.*

**Электростатическая защита.** Если проводнику сообщить некоторый заряд $Q$, то он распределится так, чтобы соблюдалось условие равновесия, т. е. нигде внутри проводника не будет избыточных зарядов, а все они расположатся по поверхности проводника с некоторой плотностью $\sigma$ (плотностью заряда называют отношение $Q/S$, где $S$ — площадь поверхности проводника). Избыточный заряд на полом проводнике распределяется так же, как и на сплошном, т. е. по его наружной поверхности. Этот вывод был наглядно продемонстрирован Фарадеем, произведшим следующий опыт. Если изготовить замкнутый полый проводник из проволочной сетки (рис. 9.17) в виде клетки (клетка Фарадея), укрепить его на изолирующей подставке и подвесить на его внутренней и внешней поверхности бумажные полоски, выполняющие роль электроскопов, то при зарядке клетки с помощью электрофорной машины отклонятся лишь наружные листочки. Это свидетельствует о том, что электрическое поле внутри клетки отсутствует. Таким образом, проводящая поверхность надежно защищает ту область пространства, которую она окружает, от действия электрического поля. Такие поверхности используют в качестве электростатической защиты.

## 9.10. Конденсаторы

**Электрическая емкость.** Опытным путем было установлено, что если форма и размеры уединенного проводника не изменяются и остается неизменной среда, в которой находится проводник (например, воздух), то при увеличении заряда $Q$ на проводнике происходит пропорциональное ему возрастание потенциала проводника:

$$Q = C\varphi. \qquad (9.24)$$

Коэффициент пропорциональности $C = Q/\varphi$ называется электрической емкостью. ***Электрическая емкость (емкость)*** проводника или системы проводников есть физическая величина, характеризующая способность проводника или системы проводников накапливать электрические заряды.

В общем случае емкость зависит как от ***среды, в которой находится проводник,*** так и от ***расположения окружающих его тел,*** но не зависит от значения сообщенного ему заряда и его потенциала.

В СИ единицей электрической емкости является ***фарад*** **(Ф).**

***Фарад — емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на*** 1 В ***при сообщении ему заряда*** 1 Кл. Эта единица весьма велика. Например, емкость такого проводника, как Земля, всего лишь порядка $7 \cdot 10^{-4}$ Ф, поэтому для практических целей используют дольные единицы: $1\ \text{мкФ} = 10^{-6}$ Ф,

$1\ \text{нФ} = 10^{-9}$ Ф, $1\ \text{пФ} = 10^{-12}$ Ф.

Для примера рассчитаем электрическую емкость уединенного проводника, имеющего форму сферы. По определению, $C = Q/\varphi$. Потенциал сферического проводника, имеющего радиус $R$, на его поверхности равен

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

Таким образом, электрическая емкость уединенной сферы

$$C = 4\pi\varepsilon_0 R.$$

Электрическая емкость проводников другой формы вычисляется более сложно. Если проводник поместить в диэлектрик, относительная диэлектрическая проницаемость которого равна $\varepsilon$, то его емкость возрастает в $\varepsilon$ раз.

Электрическая емкость не зависит от материала проводника и от наличия полостей внутри его. По формуле электрической емкости проводника, имеющего форму сферы, можно вычислить емкости как полых, так и сплошных металлических шаров, помещенных в среду с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R.$$

**Конденсаторы.** Известно, что в общем случае емкость проводника зависит от среды, в которой он находится, и от расположения окружающих его проводников. Систему проводников, емкость которой не зависит от расположения окружающих тел, называют ***конденсатором.*** Конденсаторы — это обычно система из двух проводников, называемых ***обкладками*** и разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. Обкладки конденсатора располагают таким образом, чтобы поле, создаваемое зарядами, находящимися на обкладках, было сосредоточено в пространстве между ними.

***Электрическая емкость конденсатора определяется его геометрией и диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками.*** При зарядке конденсатора на его обкладках появляются заряды, одинаковые по значению, но противоположные по знаку. Разность потенциалов между обкладками изменяется пропорционально заряду [см. (9.22)].

Простейшими являются плоские конденсаторы — система двух плоскопараллельных проводящих пластин — обкладок, разделенных диэлектриком. Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \qquad (9.25)$$

где $S$ — площадь обкладок конденсатора; $d$ — расстояние между обкладками; $\varepsilon$ - диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками.

Соединение конденсаторов. Для получения заданного значения емкости конденсаторы соединяют в ***батареи.*** Различают два вида соединений: параллельное и последовательное.

При ***параллельном соединении*** конденсаторов соединяют их одноименно заряженные обкладки (рис. 9.18, *а).* При этом общий заряд батареи

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Но так как $Q_1 = U_{AB}C_1$, $Q_2 = U_{AB}C_2$, $Q_3 = U_{AB}C_3$, то

$$Q_{\text{общ}} = U_{AB}(C_1 + C_2 + C_3).$$

Емкость такой батареи

$$C_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{общ}}}{U_{AB}}$$

или

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots \qquad (9.26)$$

При параллельном соединении конденсаторов емкость батареи равна сумме емкостей, включенных в нее.

При ***последовательном соединении*** конденсаторов соединяют разноименно заряженные обкладки (рис. 9.18, ***б).*** При этом заряд батареи

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 = Q_2 = Q_3.$$

Напряжение между точками А и *В*

$$U_{AB} = U_1 + U_2 + U_3 = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} = Q_{\text{общ}}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right).$$

Отсюда получаем, что при последовательном соединении конденсаторов емкость батареи рассчитывают по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{U_{AB}}{Q_{\text{общ}}}$$

или

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \qquad (9.27)$$

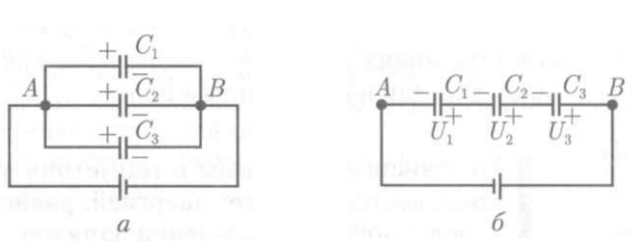



Рис. 9.18

В случае n конденсаторов одинаковой емкости электрическая емкость батареи при параллельном соединении $C_{\text{общ}} = nC$. При последовательном соединении $C_{\text{общ}} = C/n$.

## 9.11. Энергия заряженного конденсатора

Если обкладки заряженного конденсатора замкнуть металлическим проводником (рис. 9.19), то по цепи пойдет электрический ток, лампочка загорится и будет гореть до тех пор, пока конденсатор не разрядится. Это значит, что заряженный конденсатор обладает энергией. Для вычисления энергии заряженного конденсатора сначала рассмотрим уединенный незаряженный проводник.

Перенесем заряд $Q$ многократными порциями $\Delta Q$ из бесконечности на проводник. При этом необходимо преодолеть силы отталкивания, действующие между вновь переносимой порцией заряда $\Delta Q$ и уже накопившимся зарядом на поверхности проводника. Перенос очередной порции заряда $\Delta Q$ из бесконечности на проводник изменяет его потенциал на $\Delta\varphi$. Так как проводник ранее был не заряжен, его первоначальный потенциал равен нулю. Если $\varphi$ — конечный потенциал, то среднее значение потенциала составит $\varphi/2$. Работа, которая совершается против сил поля при сообщении проводнику заряда $Q$ и потенциала $\varphi$, является мерой энергии заряженного проводника. Она может быть вычислена по формуле

$$A = \frac{Q\varphi}{2}.$$

Если проводник не находится во внешнем электрическом поле, то эта работа характеризует сообщенную потенциальную энергию взаимодействия зарядов, находящихся на проводнике:

$$\Pi = A = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2}, \tag{9.28}$$

так как $Q = C\varphi$, где $C$ — емкость проводника.

Если имеется система двух заряженных проводников (конденсатор), то ***полная энергия системы*** равна сумме собственных энергий проводников и энергии их взаимодействия:

$$\Pi = \frac{Q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2}, \text{ или } \Pi = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2}, \tag{9.29}$$

где $Q$ — заряд одной из обкладок конденсатора; $C$ — емкость конденсатора; $\varphi_1$ и $\varphi_2$ — потенциалы соответствующих обкладок, создаваемые как полем другой обкладки, так и собственным полем.

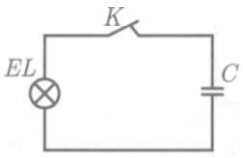


Рис. 9.19

**Независимо от формы и геометрических размеров конденсатор обладает энергией, равной работе, произведенной при разделении зарядов, сосредоточенных на его обкладках.**

## 9.12.* Энергия электрического поля

**Энергия электрического поля.** В 9.11 было показано, что заряженный конденсатор обладает энергией. Возникает вопрос: где локализована эта энергия? Можно предположить, что она сосредоточена на обкладках конденсатора или в пространстве между обкладками, т. е. в электрическом поле конденсатора. Ответ на этот вопрос может дать только опыт. В электростатике рассматриваются лишь постоянные во времени поля. Если материальный объект не обменивается энергией с окружающими объектами, то энергия поля не проявляет себя. Определить опытным путем наличие энергии у поля можно только в электродинамике, т. е. рассматривая поля, переменные во времени. Далее будет показано, что существуют электромагнитные волны, представляющие собой электрические и магнитные поля, изменяющиеся во времени и распространяющиеся в пространстве с определенной скоростью. Опыт показывает, что электромагнитные волны заключают в себе и переносят энергию. Следовательно, энергия конденсатора сосредоточена в электрическом поле.

**Объемная плотность энергии.** ***Объемная плотность энергии*** электрического поля есть физическая величина, равная отношению потенциальной энергии П, запасенной в объеме $V$, к объему, т. е.

$$\omega = \frac{\Pi}{V}. \tag{9.30}$$

Для однородного поля, каким является поле плоского конденсатора, $U = (\varphi_1 - \varphi_2) = Ed$, а объем $V = Sd$, где $S$ — площадь обкладок конденсатора; $d$ — расстояние между ними. Тогда $\Pi = \frac{CU^2}{2}$,

$$\omega = \frac{CU^2}{2Sd} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SE^2d^2}{2Sdd} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \tag{9.31}$$

### КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Электромагнитное взаимодействие* — это взаимодействие между электрически заряженными частицами или макроскопически заряженными телами. При рассмотрении электромагнитных взаимодействий основываются на принципе близкодействия. Интенсивность электромагнитных взаимодействий определяется электрическим зарядом.

• Различают два вида электрического заряда, условно названных *положительным* и *отрицательным*.

• Существует минимальный элементарный электрический заряд, которому кратны все элементарные заряды частиц и тел — *электрон*.

• Полный электрический заряд замкнутой системы равен алгебраической сумме зарядов, слагающих систему элементарных частиц. Он строго сохраняется во всех взаимодействиях и превращениях частиц этой системы.

• Неподвижные точечные электрические заряды взаимодействуют в вакууме с силой, определяемой по *закону Кулона:*

$$F = \frac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

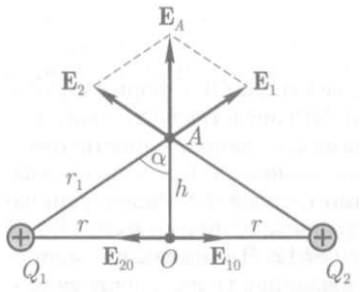



Рис. 9.21

**Дано:** $Q_1 = Q_2 = 10^{-7}$ Кл; $\varepsilon = 1$; 2 r = 8 см = 0,08м; $r_1$ = 5 см = 0,05 м.

**Найти:** $E_0$, $E_A$.

**Решение.** По принципу суперпозиции результирующая напряженность Е поля, создаваемого зарядами $Q_1$ и $Q_2$, определяется векторной суммой напряженностей $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$, создаваемых каждым зарядом в данной точке поля:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2. \qquad (1)$$

В точке $O$ векторы $\mathbf{E}_{10}$ и $\mathbf{E}_{20}$ направлены от точки О в стороны от зарядов, создающих поле. Кроме того, заряды $Q_1$ и $Q_2$ равны и расположены на равном расстоянии от точки $O$. Поэтому с учетом направления векторов из (1) получаем:

$$E_0 = E_{10} - E_{20}, \quad E_{10} = E_{20}, \quad E_0 = 0.$$

В точке $A$ результирующий вектор напряженности $\mathbf{E}_A$ является диагональю параллелограмма, образованного $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$; следовательно, $E_A = 2E_1 \cos\alpha$, так как $E_1 = E_2$.

Поскольку $\cos\alpha = \dfrac{h}{r_1}$, а $h = \sqrt{r_1^2 - r^2} = 0{,}03$ м, напряженность поля в точке $A$

$$E_A = 2\frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_1^2}\frac{h}{r_1}.$$

**Вычисления:**

$$E_A = \frac{2\cdot 10^{-7}\ \text{Кл}\cdot 0{,}03\ \text{м}}{4\pi\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \text{Ф/м}\cdot 0{,}05^3\ \text{м}^3} = 4{,}32\cdot 10^5\ \text{В/м}.$$

**Ответ:** $E_0 = 0$, $E_A = 4{,}32\cdot 10^5$ В/м.

• **Задача** 3. Определить потенциал электрического поля диполя (рис. 9.22), электрический момент которого составляет $8*10^{-14}$ Кл-м, в точке $A$, расположенной на оси диполя на расстоянии $r$ = 0,2 м от его центра со стороны положительного заряда ($l \ll r$).

**Дано**: р = 8-$10^{-14}$ Кл-м; r = 0,2 м; $\varepsilon_0$ =8,85-:$10^{-12}$ Ф/м; $\varepsilon$ **=1.**

**Найти:** $\varphi$.

**Решение.** Согласно принципу суперпозиции полей, потенциал любой точки электрического поля диполя равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых в этой точке каждым зарядом: $\varphi = \varphi_+ + \varphi_-$, или [см. (9.18) и (9.19)]

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\left(r - \frac{l}{2}\right)} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\left(r + \frac{l}{2}\right)} = \frac{Ql}{4\pi\varepsilon_0\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)} = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)}, \qquad (1)$$

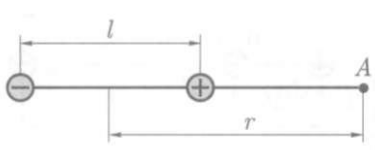



Рис. 9.22

где $p = Ql$.. Поскольку $l \ll r$, величиной $l^2/4$ по сравнению с $r^2$ можно пренебречь и формула (1) примет вид

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

**Вычисления:**

$$\varphi = \frac{8 \cdot 10^{-14}\ \text{Кл} \cdot \text{м}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \Phi/\text{м} \cdot 0{,}2^2\ \text{м}^2} = 1{,}8 \cdot 10^{-2}\ \text{В}.$$

**Ответ:** $\varphi = 1{,}8 \cdot 10^{-2}$ В.

• **Задача 4.** Электрон, пролетев поле с разностью потенциалов $U = 10\,000$ В, попадает в плоский конденсатор длиной 10 см и движется параллельно пластинам на равном расстоянии от них. К пластинам конденсатора, расстояние между которыми $d = 2$ см, приложена разность потенциалов $U_1 = 300$ В. Определить вертикальное смещение электрона при вылете из конденсатора.

**Дано:** $U = 10^4$ В; $l = 10$ см $= 0{,}1$ м; $d = 2$ см $= 0{,}02$ м; $U_1 = 300$ В.

**Найти:** $\Delta x$.

**Решение.** По закону сохранения энергии приобретенная электроном в поле кинетическая энергия равна работе электрических сил поля, т. е.

$$eU = \frac{mv^2}{2},$$

где $e$ — заряд электрона; $m$ и $v$ — его масса и скорость; $U$ — ускоряющая разность потенциалов.

Из этого равенства определяем скорость, с которой электрон влетает в конденсатор:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \qquad (1)$$

В поле конденсатора электрон участвует одновременно в двух движениях:

1) в горизонтальном направлении вдоль пластин конденсатора. При этом электрон движется по инерции прямолинейно и равномерно и пролетает путь $l$ (длина пластин) за время, равное

$$t_1 = \frac{l}{v},$$

где $v$ — скорость электрона;

2) в вертикальном направлении. При этом электрон движется равноускоренно под действием силы электрического поля (силой тяжести электрона можно пренебречь) и получает смещение, равное

$$s = \frac{at_2^2}{2}, \qquad (2)$$

где $t_2$ — время движения электрона в вертикальном направлении; $a$ — ускорение, которое, согласно второму закону Ньютона, равно

$$a = \frac{F_{\text{эл}}}{m}, \qquad (3)$$

где $F_{\text{эл}}$ — сила, действующая на электрон в поле конденсатора.

Но время движения электрона в вертикальном и горизонтальном направлениях одинаково, поэтому

$$t_1 = t_2 = \frac{l}{v}.$$

Сила, действующая на электрон, равна произведению заряда e на напряженность $E$ поля конденсатора, т. е.

$$F_{эл} = eE, \tag{4}$$

а напряженность выражается через градиент потенциала по формуле

$$E = \frac{U_1}{d}, \tag{5}$$

где $U_1$ — разность потенциалов между пластинами; $d$ — расстояние между ними.

После подстановки выражений (4) и (5) в формулу (3) получим

$$a = \frac{eU_1}{md}.$$

Тогда

$$\Delta x = \frac{eU_1}{2md}\frac{l^2}{v^2}.$$

Учитывая выражение (1), получаем искомое смещение

$$\Delta x = \frac{U_1 l^2}{2d \cdot 2U}.$$

**Вычисления:**

$$\Delta x = \frac{300\ \text{В} \cdot 0{,}01\ \text{м}^2}{2 \cdot 0{,}02\ \text{м} \cdot 2 \cdot 10^4\ \text{В}} = 3{,}75 \cdot 10^{-3}\ \text{м} = 3{,}75\ \text{мм}.$$

**Ответ:** $\Delta x$ = 3,75 мм.

• Задача 5. Емкость плоского воздушного конденсатора **C=** $10^{-9}$ Ф, расстояние между пластинами 4 мм. На помещенный между пластинами конденсатора заряд $Q$ = 4,9•$10^{-9}$ Кл действует сила $F$ = 9,8•$10^{-5}$ Н. Площадь пластины конденсатора 100 см$^2$. Определить: напряженность поля и разность потенциалов между пластинами; плотность энергии и энергию поля конденсатора.

**Дано:** $F = 9{,}8 \cdot 10^{-5}$ Н; $Q = 4{,}9 \cdot 10^{-9}$ Кл; $C = 10^{-9}$ Ф; $S = 10^{-2}$ м$^2$; $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $\varepsilon = 1$; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

**Найти:** $E$, $U$, П, $\omega$.

**Решение.** Поле между пластинами конденсатора считаем однородным. Напряженность поля $E$ может быть определена из выражения

$$E = \frac{F}{Q}.$$

Разность потенциалов между пластинами находим из соотношения ***U = Ed.***

Энергия конденсатора равна

$$\Pi = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2d}.$$

Согласно (9.30) и с учетом того, что $V = Sd$ — объем поля в конденсаторе, плотность энергии равна

$$\omega = \frac{\Pi}{V} = \frac{\Pi}{Sd}.$$

**Вычисления:**

$$E = \frac{9{,}8 \cdot 10^{-5}\ \text{Н}}{4{,}9 \cdot 10^{-9}\ \text{Кл}} = 2 \cdot 10^4\ \text{В/м};$$

$$U = 2 \cdot 10^4 \text{В/м} \cdot 4 \cdot 10^{-3}\ \text{м} = 80\ \text{В};$$

$$\Pi = \frac{1 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м} \cdot 10^{-2}\ \text{м}^2 (8 \cdot 10)^2\ \text{В}^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}\ \text{м}} = 7{,}08 \cdot 10^{-8}\ \text{Дж};$$

$$\omega = \frac{7{,}08 \cdot 10^{-8}\ \text{Дж}}{10^{-2}\ \text{м}^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}\ \text{м}} = 1{,}77 \cdot 10^{-3}\ \text{Дж/м}^3.$$

**Ответ:** $E$= 2-10⁴ В/м; $U$= 80 В; П = 7,08- $10^{-8}$ Дж; $\omega$ =1,77- $10^{-3}$ Дж/м³.

• Задача 6. Установить, как изменяются емкость и энергия плоского воздушного конденсатора, если параллельно его обкладкам (рис. 9.23) ввести металлическую пластинку толщиной $d_0$ = 1 мм. Площадь обкладки конденсатора и пластины 150 см², расстояние между обкладками $d$ = 6 мм. Конденсатор заряжен до напряжения 400 В и отключен от батареи.

Дано: $\varepsilon$ =1; $d_0$ = 1 мм = $10^{-3}$ м; S = 150см² = 1,5- $10^{-2}$ м²; d = 6мм = 6- $10^{-3}$ м; U =400 В.

Найти: $\Delta C$, $\Delta\Pi$.

Решение. Емкость и энергия конденсатора при внесении в него металлической пластины изменяется. Это вызвано тем, что при этом уменьшается расстояние между пластинами от $d_0$ до $(d - d_0)$. Использовав формулу электроемкости плоского конденсатора (9.25), получим

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{d - d_0} - \frac{\varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon_0 S d_0}{d(d - d_0)}.$$

При внесении металлической пластины параллельно обкладкам объем электрического поля уменьшается на $\Delta V = S(d - d_0) - Sd = -Sd_0$. Следовательно,

$$\Delta\Pi = \omega \Delta V = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 S d_0}{2}.$$

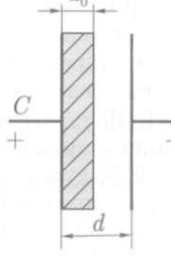


Рис. 9.23

**11.** Расстояние между вертикальными пластинами в плоском воздушном конденсаторе равно 6 мм. Его погружают до половины в масло $(\varepsilon = 7)$. Как изменится емкость конденсатора?

**12.** Пластины плоского воздушного конденсатора площадью 150 см$^2$ раздвигают так, что расстояние между ними увеличивается с 5 до 14 мм. Какую работу необходимо при этом произвести, если напряжение между пластинами конденсатора постоянно (т. е. конденсатор не отключается) и равно 380 В?

**13.** Между обкладками плоского конденсатора площадью 100 см$^2$ каждая находится слюда. Обкладки притягиваются друг к другу с силой 0,03 Н. Определить напряженность поля конденсатора $(\varepsilon_{\text{слюды}} = 6)$.

**14.** На пластинах плоского вакуумного конденсатора равномерно распределен заряд $5 \cdot 10^{-6}$ Кл. Площадь обкладок 100 см$^2$, а расстояние между обкладками 3 мм. Заряженный конденсатор отключен от батареи. Какую надо произвести работу при раздвижении пластин до 8 мм?

**15.** На пластинах плоского воздушного конденсатора с площадью пластин 150 см$^2$ находится заряд $5 \cdot 10^{-8}$ Кл. Каковы сила взаимного притяжения между пластинами и объемная плотность энергии поля конденсатора?

**16.** Два конденсатора емкостью 5 и 7 мкФ последовательно подсоединены к источнику с разностью потенциалов 200 В. Каковы будут заряды и разность потенциалов батареи, если конденсаторы отсоединить от источника и соединить параллельно?

**Ключевые слова:** *электрический заряд, закон Кулона, электрическое поле, напряженность, принцип суперпозиции, диполь, потенциал, диэлектрик, поляризация, проводник, конденсатор.*

Глава 10

# ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 10.1. Условия, необходимые для возникновения и поддержания электрического тока

Под ***электрическим током*** понимают упорядоченный перенос или направленное движение электрически заряженных частиц. Электрический ток может течь в твердых телах, жидкостях и газах. Если в среде имеется большое количество свободных электронов, то течение электрического тока в нем осуществляется за счет дрейфа этих электронов. Такой ток называют ***током проводимости,*** а вещества, в которых он возможен, — ***проводниками.*** За направление тока принимают направление дрейфа положительных зарядов. Поэтому направление тока в металлах противоположно направлению движения электронов.

Электрический ток проводимости возникает в проводнике, если в нем есть свободные заряды и существуют силы, обеспечивающие упорядоченный дрейф этих зарядов. Силы электрического взаимодействия между зарядами в самом проводнике тока вызвать не могут. Они приводят лишь к такому перераспределению зарядов, в результате которого напряженность поля внутри проводника становится равной нулю, а потенциалы всех точек — одинаковыми. Для поддержания в цепи длительного тока на свободные заряды должны действовать ***сторонние силы.***

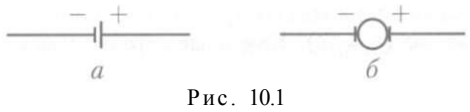



Рис. 10.1

Устройства, обеспечивающие возникновение и действие сторонних сил, называют ***источниками тока.*** В этих устройствах происходит разделение разноименных зарядов. Под действием сторонних сил электрические заряды внутри источника тока движутся в направлении, противоположном действию сил электрического поля. В результате этого на полюсах источника тока поддерживается постоянная разность потенциалов. Схематическое изображение источников постоянного тока показано на рис. 10.1. Положительный полюс гальванических элементов и аккумуляторов изображается длинной чертой, отрицательный — короткой (рис. 10.1, *а).* У полюсов генераторов (рис. 10.1, *б)* ставятся знаки «+» и «—».

## 10.2. Сила тока и плотность тока

**Сила тока.** Количественной характеристикой электрического тока являются сила тока $I$ и плотность $j$.

***Сила тока*** — скалярная величина, равная отношению количества электричества ,$\Delta Q$, которое за время $\Delta t$ переносится через данное сечение проводника, ко времени $\Delta t$:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \qquad (10.1)$$

***Постоянным током*** называется электрический ток, сила и направление которого с течением времени не изменяются. Для постоянного тока

$$I = \frac{Q}{t}. \qquad (10.2)$$

**Плотность тока.** ***Плотность тока*** — векторная физическая величина, модуль которой равен отношению силы тока $I$ к площади поперечного сечения проводника $S$:

$$j = \frac{I}{S}. \qquad (10.3)$$

Вектор $\mathbf{j}$ направлен вдоль направления тока.

Если в цепь постоянного тока включены проводники с разными поперечными сечениями, то плотность тока в различных сечениях обратно пропорциональна площадям сечений проводников. Плотность тока характеризует распределение электрического тока по сечению проводника.

Выясним, от чего зависит плотность тока. Для этого мысленно выделим внутри проводника площадку единичной площади *(*$S = 1$), расположенную перпендикулярно направлению средней скорости $v$ движения зарядов. Построим на этой площадке, как на основании, цилиндр, высота которого численно равна $v$ (вообще, $h = vt$, но $t = 1$ с, отсюда $h = v$). Тогда число электронов, которые пройдут через рассматриваемую площадку за $t = 1$ с, равно числу электронов, заключенных внутри цилиндра. Если $n$ — число электронов проводимости в единичном объеме (концентрация свободных электронов),

то ***nv*** — число электронов проводимости внутри цилиндра, а ***nev*** — заряд, переносимый ими ($e$ — заряд электрона). Плотность тока может быть вычислена по формуле

$$j = nev. \qquad (10.4)$$

Таким образом, *плотность тока в проводнике пропорциональна концентрации свободных электронов в нем и скорости их движения.*

Следует отметить, что важной особенностью металлов является практически постоянная концентрация свободных электронов в них. Концентрация свободных электронов для данного металла не зависит от температуры.



А. Ампер

Используя формулу (10.4), можно определить скорость направленного движения электронов в проводнике *(скорость дрейфа):*

$$v = \frac{j}{ne}.$$

Вычислим эту скорость для медного проводника ($n = 8{,}5 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$). При максимально допустимой плотности тока $j = 10^7$ А/м$^2$

$$v = \frac{10^7 \text{ А/м}^2}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8{,}5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Средняя скорость теплового движения электронов при комнатной температуре составляет около $10^5$ м/с. Сравнив это значение со скоростью дрейфа, видим, что скорость дрейфа электронов много меньше скорости их теплового движения.

Следует различать скорость дрейфа электронов в металле и скорость распространения электрического тока. *Когда речь идет о скорости распространения тока, то имеется в виду скорость распространения электрического поля как причины, вызывающей дрейф электронов.* Под действием источника тока все электроны в металлических проводниках начинают свое направленное движение почти одновременно, так как скорость распространения электрического поля равна скорости света с. Время установления электрического тока в цепи длиной $l$ составляет $t = l/c$.

Силу тока можно найти, если известна плотность тока: $I = jS$.

В СИ единица силы электрического тока *ампер* (А) является основной. Эта единица получила название в честь французского физика А. Ампера (1775 - 1836).

С помощью соотношения (10.2) можно получить формулу для определения единицы количества электричества:

$$Q = It = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл}$$

***Кулон*** *— это количество электричества, проходящее через поперечное сечение проводника при силе тока* 1 А за *время* 1 с.

Единица плотности тока — *ампер на квадратный метр* (А/м$^2$).

## 10.3. Закон Ома для участка цепи без ЭДС

**Закон Ома для участка цепи.** Для того чтобы в проводнике все время протекал ток, необходимо поддерживать в нем постоянное электрическое поле. Возьмем металлический проводник длиной $l$ (рис. **10.2).** Пусть Е — напряженность электрического поля внутри проводника, а $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ — постоянная разность потенциалов на концах проводника. Тогда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l}.$$

Если состояние проводника не меняется с течением времени, то для каждого проводника существует однозначная зависимость между силой тока в проводнике и напряжением, приложенным к его концам. Г. Ом экспериментально установил, что сила тока в металлических проводниках пропорциональна приложенному напряжению: ***I= GU.*** Коэффициент пропорциональности *G* называют ***электрической проводимостью проводника,*** а обратную величину $R = G^{-1}$ его ***электрическим сопротивлением.*** Электрическое сопротивление — одна из важнейших характеристик электрических свойств проводника, определяющая упорядоченность перемещения носителей тока.

> ***Закон Ома для участка цепи:*** **сила тока в проводнике пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:**

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (10.5)$$

**Вольт-амперная характеристика.** График, на котором изображена зависимость тока от приложенного напряжения, называется ***вольт-амперной характеристикой*** данного проводника и представляет собой прямую линию (рис. **10**.3). Угол наклона этой прямой зависит от сопротивления *R* участка цепи:

$$\operatorname{ctg}\alpha = \frac{U_1}{I_1} = R.$$

При изменении приложенного напряжения *U* изменяется сила тока ***I,*** но отношение [///для данного проводника остается постоянным при данной температуре.

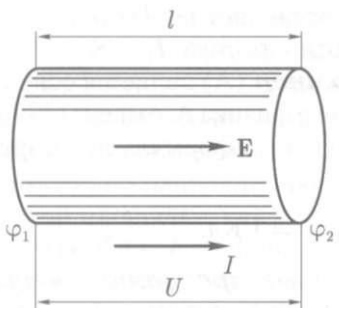



Рис. **10**.2

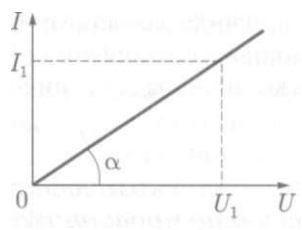



Рис. **10**.3

## 10.4. Зависимость электрического сопротивления от материала, длины и площади поперечного сечения проводника

**Сопротивление проводника.** Электрическое сопротивление обусловлено тем, что свободные электроны при дрейфе взаимодействуют с положительными ионами кристаллической решетки металла. При повышении температуры учащаются соударения электронов с ионами, поэтому сопротивление проводников зависит от температуры. Сопротивление проводников зависит от материала проводника, т. е. строения его кристаллической решетки. Для однородного цилиндрического проводника длиной $l$ и площадью поперечного сечения $S$ сопротивление определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \qquad (10.6)$$

где $\rho = \frac{RS}{l}$ удельное сопротивление проводника (сопротивление однородного цилиндрического проводника, имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения).

Единица сопротивления — *ом* (Ом).

1 Ом — *сопротивление проводника, по которому при напряжении* 1 В *течет ток силой* 1 А, т. е. 1 Ом = 1 В/А.

**Удельное сопротивление проводника.** Величина $\sigma = \frac{1}{\rho}$, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной электрической проводимостью проводника.*

Единица электрической проводимости — *сименс* (См).

1 См — *электрическая проводимость проводника сопротивлением Юм, т.е.* $1\ \text{См} = 1\ \text{Ом}^{-1}$.

Из формулы (10.6) следует, что единицей удельного сопротивления является *ом-метр* (Омм). Удельное сопротивление наиболее распространенных проводников приведено в табл. П.12 (см. прил.).

## 10.5.* Зависимость электрического сопротивления проводников от температуры

**Зависимость сопротивления проводников от температуры.** Удельное электрическое сопротивление проводника зависит не только от рода вещества, но и от его состояния. Зависимость удельного сопротивления **р** от температуры $t$ (по шкале Цельсия) выражается формулой

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \qquad (10.7)$$

где $\rho_0$ — удельное сопротивление при 0 °С; $\alpha$ — ***температурный коэффициент*** *сопротивления, характеризующий относительное изменение удельного сопротивления проводника при нагревании его на* 1 °С *или* 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t}. \qquad (10.8)$$

Температурные коэффициенты сопротивления веществ различны при разных температурах. Однако для многих металлов изменение а с температурой не очень велико. Для всех чистых металлов $\alpha \approx 1/273\ \text{К}^{-1}$ (или $^\circ\text{C}^{-1}$).

Зависимость сопротивления металлов от температуры положена в основу устройства ***термометров сопротивления.*** Они используются как при очень высоких, так и при очень низких температурах, когда применение жидкостных термометров невозможно.

Из понятия о проводимости проводника следует, что чем меньше сопротивление проводника, тем больше его проводимость. При нагревании чистых металлов их сопротивление увеличивается, а при охлаждении — уменьшается.

**Проводимость чистых металлов при нагревании уменьшается, а при охлаждении увеличивается.**

**Сверхпроводимость.** В 1911 г. голландский физик Г. Камерлинг-Оннес провел опыты с ртутью, которую можно получить в чистом виде. Он столкнулся с новым, совершенно неожиданным явлением. Удельное сопротивление ртути при температуре 4,2 К (около —269 °С) резко упало до такой малой величины, что его практически стало невозможно измерить. Это явление обращения электрического сопротивления в нуль Камерлинг-Оннес назвал ***сверхпроводимостью.***

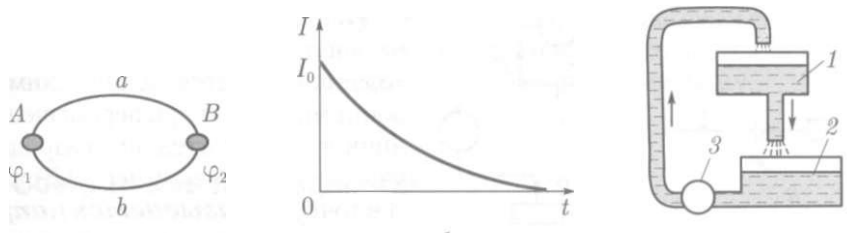
В настоящее время сверхпроводимость обнаружена у более чем 25 металлических соединений, большого числа сплавов, некоторых полупроводников и полимеров. Температура $T_{\text{кр}}$ перехода проводника в сверхпроводящее состояние для чистых металлов лежит в пределах от 0,14 К (для иридия) до 9,22 К (для ниобия).

Движение электронов в металле, находящемся в состоянии сверхпроводимости, является до такой степени упорядоченным, что электроны, перемещаясь по проводнику, почти не испытывают соударений с атомами и ионами решетки. Полное объяснение явления сверхпроводимости можно дать с позиций квантовой механики.

## 10.6. Электродвижущая сила источника тока

**ЭДС источника тока.** Если два заряженных тела *А* и *В* (рис. 10.4, *а),* находящихся под разными потенциалами $(\varphi_1 > \varphi_2)$, соединить проводником *AaB,* то по нему потечет ток, который через короткое время, когда потенциалы уравняются, прекратится (рис. 10.4, *б).* Для поддержания неизменного по времени тока необходимо поддерживать неизменной разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$, т. е. все время пополнять заряды соединенных тел. Это можно сделать только перенося заряды тела *В* обратно в тело *А,* введя как бы круговорот электричества, для чего контур, по которому идет ток, должен быть замкнут *(AaBbA).*

Однако на участке *BbA* зарядам придется перемещаться против электрических сил. Это перемещение могут совершить лишь сторонние силы (т. е. силы не электрической природы, а механической, химической и т.д.), которые могут действовать либо на всем протяжении цепи, либо на отдельных ее участках. Хорошей аналогией может служить пример, приведенный на рис. 10.4, ***е.*** Для поддержания постоянного тока воды из верхнего бака *1* в нижний 2 в




*а* *б* *в*

Рис. 10.4

трубопроводе необходим насос *3* (механические силы) для закачки воды в верхний бак.

Сторонние силы должны совершать работу по перемещению зарядов, на что, естественно, затрачивается энергия.

*Работа, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного электрического заряда вдоль всей цепи, равна электродвижущей силе (ЭДС) источника тока.*

Единица ЭДС — ***вольт*** (В).

Внутри проводника, по которому течет постоянный электрический ток, одновременно существуют поля как кулоновских ($E_{кул}$), так и сторонних ($E_{ст}$) сил. Напряженность результирующего поля определяется по принципу суперпозиций полей:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{кул} + \mathbf{E}_{ст}. \qquad (10.9)$$

При протекании электрического тока по проводнику над зарядом $Q$ при его перемещении совершается работа как кулоновскими ($A_{кул}$), так и сторонними ($A_{ст}$) силами. Полная работа равна сумме этих работ:

$$A = A_{кул} + A_{ст}.$$

Разделив обе части этого соотношения на $Q$, получим

$$\frac{A}{Q} = \frac{A_{кул}}{Q} + \frac{A_{ст}}{Q}.$$

Применим это соотношение к участку $AB$ электрической цепи (рис. 10.**5,** *а),* по которой протекает постоянный ток:

$$\frac{A_{AB}}{Q} = \frac{A_{кул}}{Q} + \frac{A_{ст}}{Q}.$$

Величина $\frac{A_{кул}}{Q} = \varphi_A - \varphi_B$ характеризует разность потенциалов в точках АиВа величина $\frac{A_{ст}}{Q} = \mathscr{E}_{BA}$ — электродвижущую силу, действующую на участке $BA$, поэтому соотношение (10.9) можно переписать в виде

$$\frac{A_{AB}}{Q} = (\varphi_A - \varphi_B) + \mathscr{E}_{BA}.$$

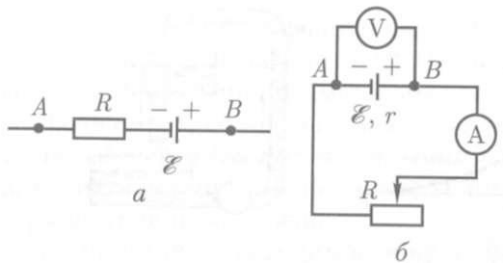



Рис. 10.5

**Напряжение.** Физическая величина, численно равная полной работе, которая совершается кулоновскими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда вдоль участка цепи (например, *AB)* из точки *A* в точку *B, НАЗЫВАЕТСЯ НАПРЯЖЕНИЕМ* ***(падением*** *НАПРЯЖЕНИЯ)* $U_{BA}$ на этом участке. Тогда

$$U_{BA} = (\varphi_A - \varphi_B) + \mathscr{E}_{BA}.$$

Анализируя это выражение, можно сделать вывод о том, что напряжение на концах участка цепи *AB* равно разности потенциалов только в том случае, если на участке не приложена ЭДС:

$$U_{BA} = \varphi_A - \varphi_B \quad \text{при } \mathscr{E}_{BA} = 0.$$

Измерить ЭДС можно по разности потенциалов на клеммах разомкнутого источника:

$$\mathscr{E}_{BA} = \varphi_A - \varphi_B \quad \text{при } U_{BA} = 0.$$

## 10.7. Закон Ома для полной цепи

Рассмотрим замкнутую цепь, состоящую из внешней части, имеющей сопротивление *R,* и внутренней — источника тока, сопротивление которого $r$ (рис. 10.5, *б).* Согласно закону сохранения энергии, ЭДС источника тока равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи, так как при перемещении по замкнутой цепи заряд возвращается в исходное положение — в точку с тем же потенциалом (т. е. $\varphi_A = \varphi_B$):

$$\mathscr{E} = IR + Ir, \tag{10.10}$$

где $IR$ и $Ir$ — падения напряжения соответственно на внешнем и внутреннем участках цепи.

Из формулы (10.10) следует формула, выражающая закон Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}. \tag{10.11}$$

***Закон Ома для полной цепи:*** **сила тока цепи пропорциональна действующей в цепи Э Д С и обратно пропорциональна сумме сопротивлений цепи и внутреннего сопротивления источника.**

ЭДС, как и сила тока, — величина алгебраическая. Если ЭДС способствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то она считается положительной i$(\mathscr{E} > 0)$. Если ЭДС препятствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то она считается отрицательной $(\mathscr{E} < 0)$

Следует иметь в виду, что формулой (10.11) можно пользоваться лишь в случае, когда ток идет внутри источника от отрицательного полюса к положительному, а во внешней цепи — от положительного к отрицательному.

## 10.8. Соединение проводников

**Последовательное соединение.** Проводники в электрической цепи могут соединяться последовательно или параллельно.

При последовательном соединении (рис. 10.6, ***а)*** сила тока во всех частях одинакова (/ = const); общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников $(R = R_1 + R_2)$; напряжение на концах цепи равно сумме напряжений последовательно соединенных проводников $(U = U_1 + U_2)$

**При последовательном соединении двух проводников:** /= const; $U = U_1 + U_2$; $R = R_1 + R_2$.

**Параллельное соединение.** При параллельном соединении (рис. 10.6, *б)* проводников сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов, текущих в разветвленных участках $(I = I_1 + I_2)$**;** падения напряжения в параллельно соединенных участках одинаковы *(U* = const).

Общее сопротивление *R* параллельно соединенных проводников $R_1$ и $R_2$ цепи рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

т. е. общее сопротивление

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

**l**$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$**льном соединении двух проводников:** $I = I_1 + I_2$; *U* = const;

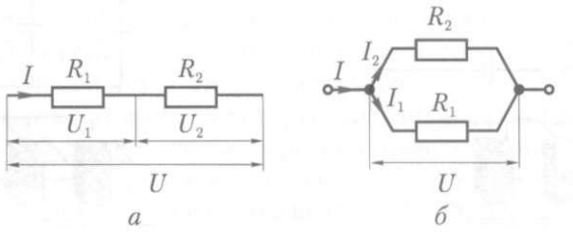



Рис. 10.6

## 10.9. Соединение источников электрической энергии в батарею

Часто источники электрической энергии соединяют между собой для питания цепи. Соединение источников в батарею может быть последовательным и параллельным.

**При последовательном соединении два соседних источника соединяются разноименными полюсами** (рис. 10.7).

Положительный и отрицательный полюсы соединены проводником, а следовательно, имеют одинаковый потенциал. Поэтому разность потенциалов между положительным полюсом второго источника и отрицательным полюсом первого равна сумме ЭДС этих источников.

Если всего имеется n одинаковых источников, то разность потенциалов крайних полюсов при разомкнутой цепи в n раз больше, чем у одного источника.

**При последовательном соединении ЭДС батареи равна сумме ЭДС отдельных источников, составляющих батарею.**

Это верно и в том случае, когда отдельные источники имеют различные ЭДС.

**Общее сопротивление батареи одинаковых источников равно сумме внутренних сопротивлений отдельных источников:**

$$r_б = r_1 + r_2 + ... + r_n = nr.$$

Тогда, по закону Ома, сила тока в такой цепи

$$I = \frac{n\mathscr{E}}{R + nr}. \qquad (10.12)$$

*Если соединить между собой все положительные и все отрицательные полюсы двух или n источников, то получим параллельное соединение источников энергии* (рис. 10.8). На практике всегда соединяют параллельно источники только с одинаковой ЭДС.

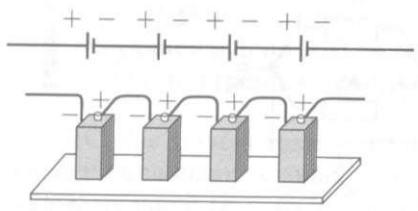


Рис. 10.7

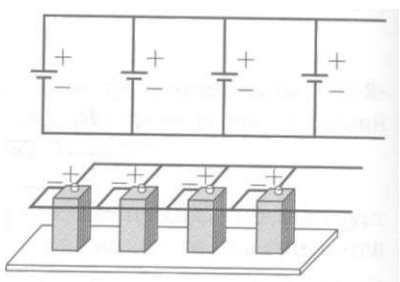


Рис. 10.8

При параллельном соединении напряжение на разомкнутой батарее такое же, как на отдельном источнике. Значит, при параллельном соединении одинаковых источников электрической энергии **ЭДС** батареи равна **ЭДС** одного источника.

Сопротивление батареи при параллельном соединении меньше, чем сопротивление одного источника. Если цепь состоит из n одинаковых источников, внутреннее сопротивление каждого r, то сопротивление батареи

$$r_б = \frac{r}{n}.$$

Тогда, по закону Ома,

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r/n}. \qquad (10.13)$$

## 10.10. Закон Джоуля-Ленца

Протекание тока по проводнику вызывает нагревание проводника. Как показывают опыты, количество выделяемой теплоты тем больше, чем больше сила тока и сопротивление проводника. Проведем такой опыт. Подвесим железную проволоку и пропустим по ней ток, включив в цепь реостат и амперметр. Увеличивая силу тока в цепи, наблюдаем сначала провисание проволоки от нагревания, а затем при достаточно большой силе тока красное каление. Дальнейшее увеличение силы тока может привести к перегреванию проволоки. На основании опытных данных можно утверждать, что в электрической цепи происходит ряд превращений энергии. При перемещении заряда вдоль электрической цепи кулоновскими и сторонними силами совершается работа ***A***. Если электрическая цепь в рассматриваемой системе координат находится в состоянии покоя, а ток, протекающий по ней, постоянен (/ = const), то работа вычисляется по формуле

$$A = IUt \qquad (10.14)$$

независимо от того, в какой вид энергии превращается электрическая энергия. Эта работа может пойти на увеличение внутренней энергии проводника, т. е. его нагревание, на изменение механической энергии, например на движение проводника с током в магнитном поле, и т. д.

Необратимые преобразования электрической энергии в тепловую можно объяснить взаимодействием электронов с ионами металлического проводника. Сталкиваясь с ионами металлического проводника, электроны передают им свою энергию. Вследствие этого увеличивается интенсивность колебаний ионов около положения равновесия. А с чем большей скоростью колеблются ионы, тем выше температура проводника. Ведь температура — это мера средней энергии хаотического движения атомов, из которых состоит проводник.

Чтобы вычислить электрическую энергию, затраченную на нагревание проводника, нужно знать падение напряжения на данном участке проводника $U = IR$. Подставив в формулу (10.14) последнее выражение, получим

$$A = I^2Rt, \text{ или } Q = I^2Rt. \qquad (10.15)$$

***Закон Джоуля — Ленца:*** **количество теплоты, которое выделяется в проводнике с током, пропорционально квадрату силы тока, времени его прохождения и сопротивлению проводника.**

## **10.11.** Работа и мощность электрического тока

**Работа электрического тока.** Предположим, нас интересует механическая работа, которую совершает электродвигатель, если $U$— напряжение сети; $R$ — сопротивление обмотки; $I$ — сила тока, текущего по обмотке. Очевидно, что на механическую работу $A_{\text{мех}}$, совершаемую двигателем, расходуется часть энергии электрического тока. При работе двигателя обмотка его будет нагреваться. На основании закона сохранения энергии можно утверждать, что энергия электрического тока $(IUt)$ превращается в механическую $(A_{\text{мех}})$ и тепловую $(I^2Rt)$ энергии:

$$IUt = A_{\text{мех}} + I^2Rt, \quad A_{\text{мех}} = IUt - I^2Rt.$$

Прибор, служащий для измерения энергии электрического тока, называется *электрическим счетчиком.*

Полная работа, совершаемая источником тока, ЭДС которого $\mathscr{E}$, определяется по формуле

$$A = \mathscr{E}It. \qquad (10.16)$$

Единица работы электрического тока — *джоуль* (Дж).

**Мощность электрического тока.** ***Мощность*** — это отношение работы электрического тока ко времени $t$, за которое совершается работа:

$$N = \frac{A}{t} = IU. \qquad (10.17)$$

Единица мощности электрического тока — *ВАТТ* (Вт).

## **10.12.** Тепловое действие тока

Тепловое действие электрического тока играет большую роль в современной технике. Рассмотрим некоторые примеры его применения.

На тепловом действии тока основано устройство теплового гальванометра, его схема представлена на рис. **10.9.** Концы металлической проволоки ***2*** закреплены неподвижно в металлических колодках *1* и ***3.*** Проволока ***2*** выполнена из неокисляемого упругого материала. В середине проволока ***2*** оттягивается нитью 5, проходящей через блок *4* и скрепленной с пружиной *6.* При прохождении электрического тока по проволоке ***2*** она нагревается и удлиняется, ее прогиб увеличивается. Вследствие этого нить 5 перемещается и поворачивает блок *4.* С блоком *4* скреплена стрелка гальванометра, поэтому поворот блока соответствует отклонению стрелки на некоторый угол. Если шкала прибора градуирована в единицах силы тока, то прибор называется *амперметром.*

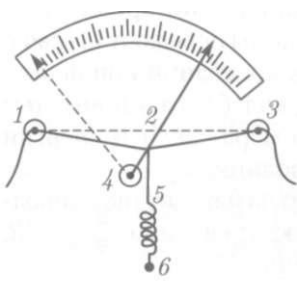


Рис. 10.9



Часто используются разли
гревательные приборы и элек
ским нагревательным прибор
хранители («пробки»), кото
опасности короткого замыка)
ные или свинцовые проволоч
но в цепь электрического ток
зом, чтобы они плавились пр
чение, на которое рассчитана

К нагревательным прибор
накаливания. Первая лампоч
электротехником А. Н. Лодып
стеклянный баллон, в которс
проволочками укреплялся уп
кании тока угольный стержен
вершенствованием ламп нака

В настоящее время в качес
мовая проволока с температу!
тем большая часть излучаем
лись лампочки, баллоны кот<
сутствие аргона замедляет **ж**

Лампа накаливания преде
или спираль *1,* укрепленную
дят проволочки ***2,*** подводящ]
бочка *4,* которая после удале
кий цоколь *5* и изолированн
провода оси нити накаливай]
в патрон соединяются с проЕ

Нагревательными прибор
чайник и т.д., которые нани
создания высоких температ)
печи может достигать 2 500
щего вещества применяются
рические печи нашли широк
зяйства. Еще одним важным
тактная сварка, которая прш
удельным сопротивлением

### Э КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Электрический ток*
частиц. Количественными xaf

и *плотность тока*

Часто используются различного типа электрические нагревательные приборы и электрические печи. К электрическим нагревательным приборам относятся плавкие предохранители («пробки»), которые служат для устранения опасности короткого замыкания. Обычно это тонкие медные или свинцовые проволочки, вводимые последовательно в цепь электрического тока и рассчитанные таким образом, чтобы они плавились при токе, превышающем то значение, на которое рассчитана цепь.

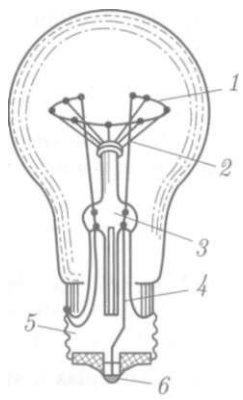


Рис. 10.10

К нагревательным приборам можно отнести и лампочки накаливания. Первая лампочка была изобретена в 1872 г. электротехником А. Н. Лодыгиным. Она представляла собой стеклянный баллон, в котором между толстыми медными проволочками укреплялся угольный стержень. При пропускании тока угольный стержень раскалялся и давал свет. Усовершенствованием ламп накаливания занимались Т. Эдисон, И. Ленгмюр и др.

В настоящее время в качестве нити накаливания ламп используется вольфрамовая проволока с температурой плавления 3 370 °С. Чем выше температура нити, тем большая часть излучаемой энергии отдается в виде света. В 1913 г. появились лампочки, баллоны которых заполнялись инертным газом (аргоном). Присутствие аргона замедляет испарение нити, и срок службы ламп увеличивается.

Лампа накаливания представлена на рис. 10.10. Она имеет вольфрамовую нить или спираль *1,* укрепленную на металлической ножке ***3,*** внутри которой проходят проволочки ***2,*** подводящие ток к спирали. Для откачки воздуха служит трубочка *4,* которая после удаления воздуха запаивается. Лампа имеет металлический цоколь *5* и изолированный от цоколя контакт *6,* к которому припаиваются провода оси нити накаливания. Цоколь и контакт *6* при вворачивании лампочки в патрон соединяются с проводами электрической сети.

Нагревательными приборами являются электроплита, электроутюг, электрочайник и т.д., которые нашли широкое применение в домашнем обиходе. Для создания высоких температур служат электрические печи. Температура внутри печи может достигать 2 500 - 3 000 °С. Для этого в печах в качестве токопроводящего вещества применяются тугоплавкие металлы, например молибден. Электрические печи нашли широкое применение в различных областях народного хозяйства. Еще одним важным применением теплового действия тока является контактная сварка, которая применяется для сваривания металлов со значительным удельным сопротивлением (никель, тантал, молибден и др.).

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Электрический ток* — это упорядоченное движение электрически заряженных частиц. Количественными характеристиками электрического тока являются *сила тока*

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

и *плотность тока*

$$j = \frac{I}{S}.$$

Согласно закону Ома для участка цепи,

$$I = \frac{U}{R}.$$

• *Электрическое сопротивление* металлических проводников зависит от материала, длины и площади поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

С увеличением температуры сопротивление увеличивается:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

У некоторых проводников и сплавов при температуре, близкой к О К, электрическое сопротивление практически отсутствует, т. е. наблюдается *сверхпроводимость.*

• Потенциальные силы электростатического поля (силы Кулона) не могут поддерживать постоянный ток в цепи, так как работа этих сил вдоль замкнутого контура равна нулю. Для поддержания в цепи постоянного тока должны действовать непотенциальные (сторонние) силы, имеющие механическую, химическую или иную природу. Устройства, обеспечивающие возникновение и действие сторонних сил, называют *источниками тока.*

Физическую величину, численно равную работе, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда вдоль всей цепи, называют ЭДС *источника тока:*

$$\mathscr{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{Q}.$$

• *Закон Ома для замкнутой цепи* устанавливает зависимость между силой тока, ЭДС источника и полным сопротивлением цепи:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}.$$

• *Закон Джоуля —Ленца:* количество теплоты, которое выделяется в проводнике с током, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению и времени:

$$Q = I^2 R t.$$

• *Работа* электрического поля при упорядоченном движении электронов в проводнике пропорциональна силе тока, напряжению и времени:

$$A = IUt.$$

• *Мощность* электрического тока равна отношению работы ко времени, за которое она совершается:

$$N = \frac{A}{t} = IU.$$

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Что понимают под электрическим током? **2.** Какие условия необходимы для возникновения и поддержания электрического тока? **3.** Что называют силой тока? плотностью тока? **4.** От чего зависит скорость направленного движения (скорость дрейфа) электронов в проводнике? **5.** Сформулируйте закон Ома для участка цепи без ЭДС. **6.** Как зависит сопротивление проводника от его длины, площади, поперечного сечения и материала? **7.** Что называют удельным сопротивлением? удельной электропроводимостью проводника? **8.** Как зависит удельное сопротивление проводника от температуры? **9.** В чем состоит яв-

ление сверхпроводимости? **10.** Что называют электродвижущей силой источника тока? **11.** Сформулируйте закон Ома для полной цепи. **12.** Какое соединение сопротивлений называют последовательным? параллельным? Чему равно сопротивление цепи при этих соединениях? **13.** Сформулируйте закон Джоуля - Ленца. **14.** Чему равна работа постоянного тока на участке цепи? **15.** Чему равна мощность постоянного тока?

### Примеры решения задач

• **Задача 1.** Какое количество электронов проходит через поперечное сечение проводника площадью 1 мм² за 2 мин, если плотность тока в проводнике 150 А/см²?

**Дано:** $S = 1$ мм² $= 10^{-6}$ м²; $t = 2$ мин $= 120$ с; $j = 150$ А/см² $= 150 \cdot 10^4$ А/м².

**Найти:** $n$.

**Решение.** Количество электронов, проходящих через поперечное сечение проводника, равно отношению заряда, прошедшего через данное поперечное сечение, к заряду электрона:

$$n = \frac{Q}{e}. \qquad (1)$$

За время $t$ через сечение проводника при токе $I = jS$ проходит заряд

$$Q = jSt. \qquad (2)$$

Подставляя (2) в (1), имеем

$$n = \frac{jSt}{e}.$$

**Вычисления:**

$$n = \frac{150 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 120 \text{ с}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 1{,}15 \cdot 10^{21}.$$

**Ответ:** $n = 1{,}15 \cdot 10^{21}$.

• **Задача 2.** Определить силу тока короткого замыкания батареи, ЭДС которой 15 В, если при подключении к ней сопротивления 3 Ом сила тока в цепи составляет 4 А.

**Дано:** $\mathscr{E} = 15$ В; $R = 3$ Ом; $I = 4$ А.

**Найти:** $I_{кз}$.

**Решение.** Сила тока короткого замыкания

$$I_{кз} = \frac{\mathscr{E}}{r}, \qquad (1)$$

где r — внутреннее сопротивление батареи, которое можно найти исходя из закона Ома для полной цепи (10.11):

$$r = \frac{\mathscr{E} - IR}{I}. \qquad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$I_{кз} = \frac{\mathscr{E}}{r} = \frac{\mathscr{E}I}{\mathscr{E} - IR}.$$

**Вычисления:**

$$I_{кз} = \frac{15\ \text{В} \cdot 4\ \text{А}}{15\ \text{В} - 4\ \text{А} \cdot 3\ \text{Ом}} = 20\ \text{А}.$$

**Ответ:** $I_{кз} = 20$ А.

● **Задача 3.** Определить время $\tau$, необходимое для нагревания на электрической плитке мощностью 1 200 Вт при КПД 75 % 2 кг льда, взятого при температуре −16 °С, превращения его в воду и нагревания полученной воды до температуры 100 °С.

**Дано:** $N = 1\,200$ Вт; $\eta = 0{,}75$; $m = 2$ кг; $t_1 = -16$ °С; $t_2 = 100$ °С; $\lambda = 3{,}3 \cdot 10^5$ Дж/кг $c_л = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $c_в = 4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

**Найти:** $\tau$.

**Решение.** Электрическая энергия $Q = \eta N \tau$ расходуется на нагревание льда от температуры −16 °С до температуры плавления $t_0 = 0$ °С ($Q_1$), на плавление льда ($Q_2$) и на нагревание полученной из льда воды от температуры 0 °С до температуры 100 °С ($Q_3$):

$$Q_1 = c_л m(t_0 - t_1),$$
$$Q_2 = \lambda m,$$
$$Q_3 = c_в m(t_2 - t_0).$$

Уравнение теплового баланса:

$$\eta N \tau = c_л m(t_0 - t_1) + \lambda m + c_в m(t_2 - t_0),$$

откуда

$$\tau = \frac{c_л m(t_0 - t_1) + \lambda m + c_в m(t_2 - t_0)}{\eta N}.$$

**Вычисления:**

$$\tau = \frac{2{,}1 \cdot 10^3\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 2\ \text{кг} \cdot 16\ \text{К} + 3{,}3 \cdot 10^5\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 2\ \text{кг} + 4{,}19 \cdot 10^3\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 2\ \text{кг} \cdot 100\ \text{К}}{0{,}75 \cdot 1\,200\ \text{Вт}} =$$
$$= 1\,740\ \text{с}.$$

**Ответ:** $\tau = 1\,740$ с.

## ? *Задачи для самостоятельного решения*

1. Через поперечное сечение проводника каждую секунду протекает 12 • 10' свободных электронов. Определить силу тока в проводнике.

**2.** Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника в течение 1 с, если за этот промежуток времени сила тока равномерно возрастает от нуля до 6 А?

3. Какова **Э Д С** источника напряжения, если сторонние силы совершают работу 10 **Дж** при разделении зарядов +5 и —5 Кл?

4. Аккумуляторная батарея, состоящая из 60 банок, заряжается от источника постоянного напряжения 100 В. Ток зарядки равен 2,5 А. **Э Д С** каждой банки в начале зарядки 1,2 В, внутреннее сопротивление 0,02 Ом. Каково сопротивление реостата, включенного между источником и батареей?

**5. Э Д С** источника тока равна 1,5 В. При замыкании источника сопротивлением 2 Ом сила тока составляет 0,3 А. Определить силу тока короткого замыкания.

6. Электрический чайник имеет в нагревателе две секции. Если они соединены параллельно, то вода в чайнике закипает за 8 мин, а если они включены последовательно, то за 50 мин. За какое время закипит вода в чайнике, если включена одна из секций?

7. Определить мощность нагревателя электрочайника, если в нем за 10 мин можно вскипятить 2 л воды, начальная температура которой 20 °С. КПД нагревателя 70 %.

**8.** Для нагревания 4,5 л воды от 23 °С до кипения нагреватель потребляет 0,5 кВт-ч электрической энергии. Чему равен КПД этого нагревателя?

**Ключевые слова:** *сила тока, плотность тока, закон Ома, ЭДС, электрическое сопротивление, напряжение, закон Джоуля-Ленца.*

# Глава 11
# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

## 11.1. Собственная проводимость полупроводников

**Историческая справка.** Бурное развитие радиотехники обязано электровакуумным приборам. Они являлись неотъемлемой частью всякого радиотехнического устройства, и главным образом их свойствами определялись технические показатели аппаратуры.

Однако в период наивысшего расцвета техники и теории электровакуумных приборов они нашли достойных конкурентов в виде разнообразных полупроводниковых приборов. Эти приборы обладают рядом ценных качеств: большим сроком службы, малыми габаритами, высокой механической прочностью и незначительным потреблением энергии. Эти качества в совокупности обеспечивают повышение надежности работы аппаратуры при одновременном сокращении расхода энергии на ее питание, массы и габаритов. К тому же в ряде случаев полупроводниковые приборы могут выполнять функции, не доступные электронным лампам.

В 20-х годах XX в. О. В. Лосев открыл способность полупроводниковых диодов (кристаллических детекторов) генерировать незатухающие колебания. В нашей стране исследования полупроводников начались в конце 20-х годов XX в. под руководством А. Ф. Иоффе.

В дальнейшем в связи с прогрессивным развитием физики и особенно физики твердого тела, был открыт ряд важных свойств полупроводников, которые позволили значительно расширить область использования полупроводниковых приборов в настоящем и оценить их роль в будущем.

**Полупроводники.** Существует большая группа веществ, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества называют ***полупроводниками.*** К ним относят кремний, германий, фосфор, мышьяк, сурьму, селен, оксиды ряда металлов, сульфиды, теллуриды. Наиболее типичными полупроводниками являются германий и кремний. С ними связаны многие успехи полупроводниковой электроники. Атомы этих элементов, обладая четырьмя валентными электронами, образуют кристаллическую решетку типа алмаза с ковалентной связью атомов.

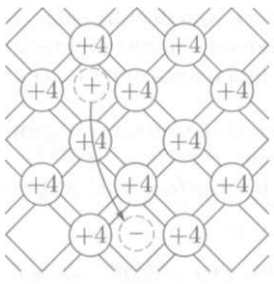



Рис. 11.1

От типичных проводников (металлов) полупроводники отличаются прежде всего концентрацией свободных электронов. Концентрация носителей заряда в полупроводниках при комнатной температуре значительно меньше, чем в металлах, поэтому удельное сопротивление полупроводников гораздо больше, чем металлов.

Удельное сопротивление полупроводников существенно зависит от температуры (если при нагревании металла оно возрастает, то при нагревании полупроводника сильно уменьшается).

Наличие примесей также по-разному влияет на электрическую проводимость металлов и полупроводников (присутствие примесей в металлах заметно снижает их электрическую проводимость, в то время как в полупроводниках примеси в отдельных случаях могут повысить электрическую проводимость в десятки и сотни тысяч раз).

Наличие электронов проводимости в полупроводниках объясняется особенностью их кристаллического строения.

**Собственная проводимость полупроводников.** Рассмотрим кристаллическую решетку германия (рис. 11.1).

Во внешней оболочке атомов германия имеется четыре валентных электрона (германий находится в IV группе Периодической системы элементов Д.И.Менделеева). Эти электроны, участвующие в ковалентной связи с соседними атомами, слабо связаны с ядром. Энергия ионизации атомов германия сравнима с энергией теплового движения (колебания частиц в кристалле) уже при комнатной температуре. Поэтому часть внешних электронов обобществляется соседними атомами и легко переходит от одного из них к другому, становясь блуждающими частицами. Одновременно с появлением блуждающего электрона у одного из атомов полупроводника возникает вакантное (свободное) для электрона место, которое принято называть *дыркой.* Эту дырку может занять электрон соседнего атома, у которого в свою очередь образуется дырка. Блуждание электронов в кристаллической решетке полупроводника влечет за собой своеобразное блуждание дырок. «Перемещение» дырок от одного атома к другому подобно движению *положительного заряда,* равного заряду электрона.

Если в полупроводнике создать электрическое поле, то движение как электронов, так и дырок принимает направленный характер, причем дырки «перемещаются» в направлении поля, а электроны — навстречу им.

В чистом полупроводнике число свободных электронов равно числу дырок, поэтому проводимость чистых полупроводников наполовину электронная, наполовину дырочная. Такую проводимость называют ***собственной проводимостью.***

**Примесная проводимость.** Электрическая проводимость полупроводников определяется концентрацией электронов и дырок и их подвижностью, введение же атомов примеси приводит к созданию дополнительных носителей тока и повышает электрическую проводимость вещества. Поэтому большинство полупроводников — примесные.

**Донорные примеси.** При введении в кристаллическую решетку германия атомов мышьяка, сурьмы или других веществ, атомы которых имеют пять валент-

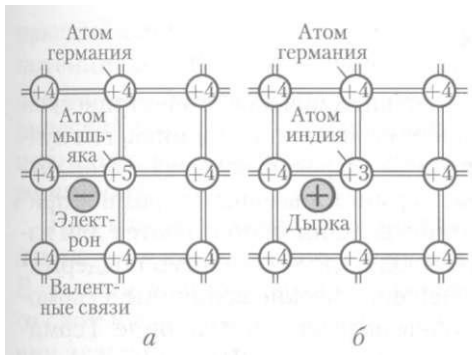



Рис. 11.2

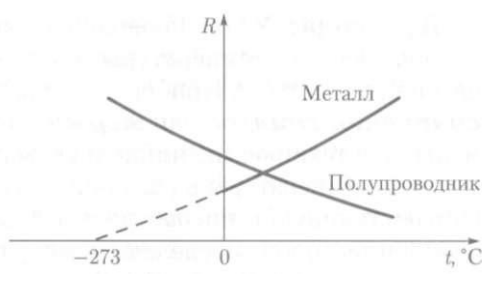



Рис. 11.3

ных электронов, концентрация свободных электронов в полупроводнике резко возрастает. Происходит это потому, что четыре валентных электрона атома примеси участвуют в создании химической связи с атомами германия. Пятый валентный электрон оказывается слабо связанным с атомом примеси, поэтому он легко покидает атом и становится «свободным» (рис. 11.2, *а*).

Таким образом, а этом случае примесные атомы отдают электроны, т. е. являются донорами электронов, что и объясняет их название. Проводимость, обусловленная движением свободных электронов, называется электронной, или проводимостью n-типа.

**Акцепторные примеси.** При введении в кристаллическую решетку германия атомов индия, галлия или других трехвалентных элементов характер проводимости полупроводника меняется. Это объясняется тем, что на образование двухэлектронной связи с одним из соседних атомов германия у атома индия не хватает одного электрона, т. е. между этими двумя атомами получается незаполненная валентная связь, или дырка (рис. 11.2, *б*). ***Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси.*** Проводимость, обусловленная движением дырок, называется дырочной, или проводимостью p-типа.

**Зависимость электрической проводимости от температуры и освещенности.** Различие между проводниками и полупроводниками особенно заметно при понижении температуры, тогда как различие между полупроводниками и изоляторами с понижением температуры исчезает. Зависимость сопротивлений металлов и полупроводников от температуры показана на рис. 11.3.

У металлов уменьшение электрической проводимости при повышении температуры связано с уменьшением подвижности электронов. Концентрация свободных электронов практически не зависит от температуры.

У полупроводников с ростом температуры подвижность электронов и дырок тоже падает, но это не играет заметной роли, так как при нагревании германия кинетическая энергия валентных электронов возрастает и наступает разрыв отдельных связей, что приводит к увеличению числа свободных электронов, т.е. росту электрической проводимости. Впервые в 1873 г. В.Смит наблюдал изменение сопротивления кристаллического селена при освещении.

При освещении полупроводника в нем появляются дополнительные носители, что приводит к повышению его электрической проводимости. Исследования показали, что на свойства полупроводников влияют рентгеновские лучи, радиоактивное излучение, магнитные поля, механические деформации и др.

## 11.2. Полупроводниковые приборы

**Термисторы.** У полупроводников ярко выражена зависимость электрической проводимости от температуры: чем выше температура полупроводника, тем лучше он проводит ток. Приборы, основанные на этом эффекте, называют ***термосопротивлениями,*** или ***термисторами.*** Термисторы нашли огромное применение в технике, медицине и сельском хозяйстве. Они используются для измерения температуры в различных агрегатах, всюду, где необходимо поддерживать постоянную температуру и связанные с ней физические величины. С помощью термисторов определяют температуру почвы на различной глубине. Термисторы можно вводить непосредственно в кровеносный сосуд. Чувствительность этих приборов настолько велика, что на их основе изготовляют приемники лучистой энергии, называемые ***болометрами.***

**Электронно-дырочный переход (p-n-переход).** Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой — дырочную проводимость, называется ***электронно-дырочным переходом*** или ***p-n-переходом.*** Эти переходы имеют большое практическое значение, являясь основой работы многих полупроводниковых приборов. Практически *p-n-переход* осуществляется не механическим контактом двух разных полупроводников, а внесением донорных и акцепторных примесей в разные части чистого полупроводника.

Пусть два полупроводника с различным типом электропроводности *(p* и *n)* соприкасаются друг с другом. При этом начнется переход (диффузия) электронов из n-области, где их много, в p-область, где их мало, и перемещение дырок в обратном направлении. Так как дырки и электроны являются заряженными частицами, то вследствие их диффузии появится ***контактная разность потенциалов*** между *p-* и n-областями (рис. **11**.4, ***а).*** Электроны и дырки на границе раздела двух полупроводников создают ***запирающий слой,*** поле которого препятствует дальнейшему диффузионному переносу носителей заряда.

Приложим внешнее электрическое поле к системе двух полупроводников (как показано на рис. **11**.4, *б).* В этом случае напряженность внешнего поля совпадает по направлению с полем запирающего слоя. При таком направлении внешнего электрического поля электроны, двигаясь против поля, а дырки, двигаясь вдоль поля, уходят из области вблизи контакта. При этом запи-

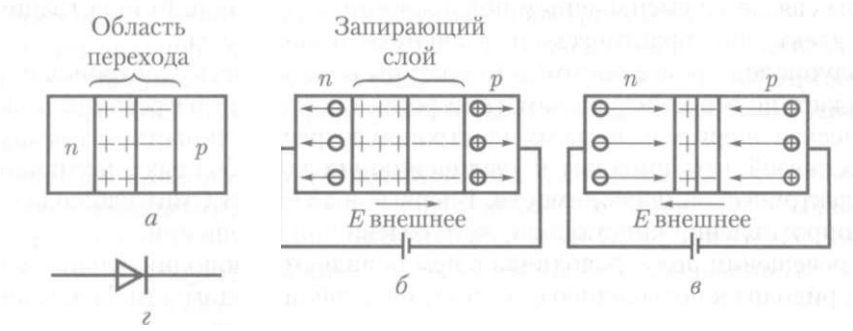



Рис. 11.4

рающий слой расширяется и
потенциалов. В запирающем с
рок мала и он ведет себя как /
рический ток через p-n-перехі
него поля, расширяющего заг
*ратным).*

При изменении направлен
изменяется направление двю
В области p-n-перехода они
го слоя и его сопротивление;
нии электрический ток прохо
ri-полупроводнику. Такое н;
***прямым.***

Таким образом,

**I** p-n-переход обладает с

Диод. Полупроводник с о,
вым диодом. На рис. **11**.4, г по
*ВОГО ДИОДА.*

Полупроводниковый диод,
обладает односторонней про
проще в конструкции и наде»
время они почти полностью і
лупроводниковый диод испо./
жет работать в качестве детек

Если в полупроводников]
ше, чем обычно, то получак
*ИЫМИ.* Такие диоды примег
тоты.

Транзистор. Для созданю
обходимо иметь три составш
ла: две *n-* и одну p-типа или *i*
рис. **11.5,** ***а .*** При включении
включается плюсом на p-час
сом — на среднюю *n* часть, н;
ся плюсом на базу, а минусо*
(К). При таком включении д:
дырок из базы в коллектор оі
ется за счет второй батареи.

При увеличении напряже
батареи возрастает число дьц
ра, которые через базу дост
лектора. Следовательно, н;
между базой и эмиттером уп
ком коллектора, так же как в
между сеткой и катодом в
триоде управляет анодным

рающий слой расширяется и ширина его зависит от приложенной разности потенциалов. В запирающем слое концентрация свободных электронов и дырок мала и он ведет себя как диэлектрик. Очевидно, что в этом случае электрический ток через p-n-переход практически не проходит. Направление внешнего поля, расширяющего запирающий слой, называют ***запирающим (обратным).***

При изменении направления внешнего электрического поля (рис. **11**.4, *в)* изменяется направление движения электронов и дырок на противоположное. В области p-n-перехода они рекомбинируют. При этом ширина запирающего слоя и его сопротивление уменьшаются. Следовательно, в этом направлении электрический ток проходит сквозь p-n-переход от p-полупроводника к n-полупроводнику. Такое направление тока называют ***пропускным,*** или ***прямым.***

Таким образом,

**p-n-переход обладает односторонней проводимостью.**

Диод. Полупроводник с одним p-n-переходом называют полупроводниковым диодом. На рис. **11**.4, г показано условное обозначение ***полупроводникового диода.***

Полупроводниковый диод, как и двухэлектродная электронная лампа (диод), обладает односторонней проводимостью. Полупроводниковые диоды гораздо проще в конструкции и надежнее в работе, чем электронная лампа. В настоящее время они почти полностью вытеснили стеклянные диоды в радиотехнике. Полупроводниковый диод используется для выпрямления переменного тока и может работать в качестве детектора.

Если в полупроводниковый материал примесей внесено в 20 - 30 раз больше, чем обычно, то получают особый класс диодов, называемых ***туннельными.*** Такие диоды применяются как усилители и генераторы высокой частоты.

**Транзистор.** Для создания полупроводникового триода — транзистора — необходимо иметь три составные части полупроводникового примесного материала: две *n*- и одну p-типа или наоборот. Одна из возможных схем представлена на рис. **11.5,** ***а.*** При включении транзистора в цепь используют две батареи. Одна включается плюсом на p-часть триода, называемую ***эмиттером*** (Э), а минусом — на среднюю *n* часть, называемую ***базой*** (Б). Вторая батарея подключается плюсом на базу, а минусом — на вторую p-часть, называемую ***коллектором*** (К). При таком включении дырки эмиттера уходят в базу. Дальнейшее движение дырок из базы в коллектор осуществляется за счет второй батареи.

При увеличении напряжения первой батареи возрастает число дырок эмиттера, которые через базу достигают коллектора. Следовательно, напряжение между базой и эмиттером управляет током коллектора, так же как напряжение между сеткой и катодом в ламповом триоде управляет анодным током. На

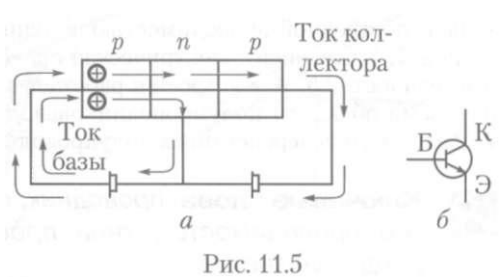


Рис. 11.5

рис. **11.5,** *б* показано условное обозначение ***полупроводникового триода*** типа *p-n-p.*

Первый полупроводниковый триод (транзистор) был создан в **1948** г. американскими физиками **У.** Б. Шокли, **Д.** Бардин и **У**.Бриттейн. Применение полупроводников совершило революцию в радиотехнике. Радиодетали стали настолько миниатюрными, что появилась возможность изготовлять типографским способом так называемые микромодули. *Микромодули* представляют собой тонкие листики, на которых отпечатаны диоды, триоды, сопротивления, индукционные катушки и другие элементы радиосхем. Используя различные комбинации микромодулей, можно изготовлять радиоустройства с заранее заданными параметрами.

Полупроводники приобретают все большее значение, обогащая физику, химию, биологию и другие науки. Исследование полупроводников еще не завершено, и в настоящее время невозможно в полной мере предсказать развитие физики полупроводников.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Различия в электрической проводимости между проводниками (металлами), полупроводниками и изоляторами вызваны различием в строении твердых тел и электронных оболочек атомов, из которых они состоят.

• При введении в кристаллическую решетку полупроводника (германия) атомов веществ, которые имеют пять валентных электронов (мышьяк, сурьма и др.), концентрация свободных электронов в полупроводнике резко возрастает. Примесные атомы являются донорами электронов. Проводимость, обусловленная движением свободных электронов, называется *электронной проводимостью n-типа.* При введении в кристаллическую решетку полупроводника атомов трехвалентных элементов (индий, галлий и др.) возрастает концентрация дырок. Такая проводимость называется дырочной, или *проводимостью p-типа.*

• Наиболее отчетливо полупроводники отличаются от проводников тем, что с увеличением температуры и освещенности у полупроводников растет электрическая проводимость.

• Широкое применение в электронике в настоящее время получили *полупроводники.* Радиодетали стали миниатюрными, появилась возможность изготовлять их типографским способом. Они обеспечивают исключительную надежность аппаратуры и приводят к значительной экономии дорогостоящих материалов. Исследование полупроводников еще не завершено, и сегодня нельзя в полной мере предсказать развитие физики полупроводников.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. В чем отличие проводников от полупроводников и изоляторов? **2.** Что вы понимаете под собственной проводимостью полупроводников? **3.** Объясните проводимости *р-* и п-типа. **4.** Как зависит электрическая проводимость полупроводников от температуры и освещенности? **5.** Как устроен и работает полупроводниковый диод? **6.** Какими преимуществами обладают полупроводниковые диоды и триоды по сравнению с ламповыми? **7.** Расскажите о перспективах полупроводниковой техники.

**Ключевые слова:** ***проводник, полупроводник, изолятор, донор, акцептор, проводимость p-типа, проводимость п-типа, полупроводниковый диод, транзистор.***

Глава 12

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

## 12.1. Магнитное поле

**Опыт Эрстеда.** В одном из научных лондонских журналах в 1735 г. была опубликована статья, в которой сообщалось, что в результате удара молнии в комнате были разбросаны и сильно намагничены металлические вилки и ножи. Это одно из первых сообщений о магнитном воздействии электрического разряда или тока на металлические предметы.

Начало настоящему пониманию природы магнетизма положил датский физик Х.Эрстед (1777-1851), обративший внимание на то, что стрелка компаса, случайно оказавшаяся на столе под проводником, располагается в отсутствии тока параллельно проводнику (рис. 12.1, *а).* При включении тока стрелка отклоняется от первоначального положения (рис. 12.1, *б).* Изменение направления тока сопровождалось аналогичным отклонением, но только в противоположную сторону (рис. 12.1, *в).* Таким образом, было показано, что электрический ток воздействует на магнитную стрелку.

Опыт Эрстеда явился прямым доказательством взаимосвязи электричества и магнетизма: электрический ток оказывает магнитное действие.

Исследования, проведенные русским физиком А. А. Эйхенвальдом в 1901 г., показали, что если заряженное тело покоится относительно наблюдателя, то вокруг этого тела ***существует электрическое поле.*** Если же оно движется относительно наблюдателя, то возникает ***магнитное поле,*** которое вызывает отклонение легкоподвижной магнитной стрелки. Аналогичное действие на магнитную стрелку оказывает и проводник с током. Если по прямому проводнику, расположенному по магнитному меридиану в направлении север — юг, пропустить ток, то расположенная под ним магнитная стрелка отклонится (см. рис. 12.1). Если поместить стрелку над проводником, то стрелка отклонится в другую сторону.

Большой вклад в понимание природы магнетизма внес французский ученый А. Ампер. Им было установлено, что всякий электрический ток способен взаимодействовать с другим током с силой, которая не может быть объяснена кулоновским взаимодействием.

Согласно ***теории близкодействия,*** взаимодействие неподвижных электрических зарядов осуществляется посредством электрического поля. Проводни-

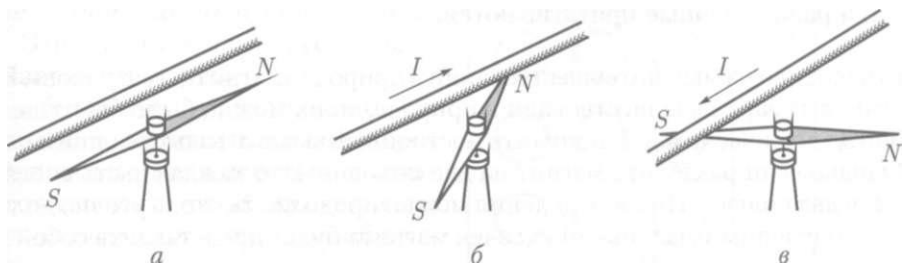
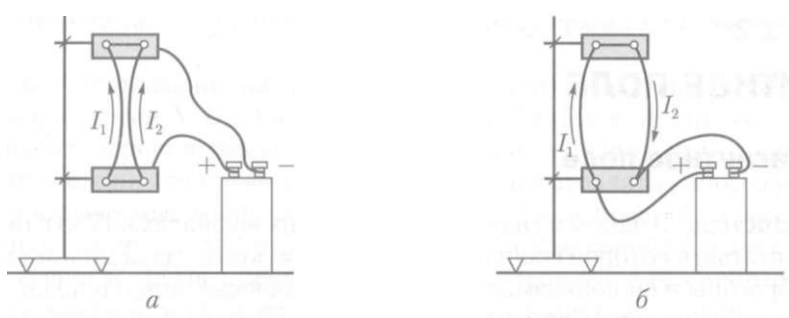



Рис. 12.1




*а* *б*

Рис. 12.2

ки с током электрически нейтральны. Но, пропустив по двум параллельным проводникам ток, мы увидим, что проводники, по которым токи $I_1$ и $I_2$ текут в одном направлении, притягиваются (рис. **12.2,** *а),* а проводники, по которым токи текут в противоположных направлениях, отталкиваются (рис. **12.2,** *б).*

Взаимодействие между проводниками с током, т. е. взаимодействие между движущимися электрическими зарядами, называют ***магнитным.*** Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют ***магнитными силами.*** Причиной возникновения сил магнитного взаимодействия является магнитное поле, которое появляется вокруг проводника с током.

**Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися заряженными частицами или телами, обладающими магнитным моментом.**

Экспериментальным доказательством реальности магнитного и электрического полей является факт существования электромагнитных волн. Магнитное поле, как и электрическое, является частным проявлением единого *электромагнитного поля.*

**Неподвижные заряды не создают магнитного поля. Только движущиеся заряды (электрический ток) и постоянные магниты создают магнитное поле.**

При изучении взаимодействия постоянных магнитов было установлено:

**постоянные магниты имеют два полюса: северный и южный** (на рис. **12.1** соответственно *Nn S);* **одноименные полюсы отталкиваются друг от друга, а разноименные притягиваются.**

Это наводило на мысль о существовании в природе «магнитных зарядов». Если бы магнитные заряды существовали в природе, то их можно было бы разделить подобно электрическим, т. е. получить постоянный магнит только с одним полюсом. Однако если разделить магнит на две половины, то каждая часть снова будет иметь два полюса. Процесс деления можно продолжать сколь угодно долго, и каждый полученный маленький кусочек магнита будет представлять собой магнит с двумя полюсами. Позднее было показано, что даже электроны, протоны, нейтроны ведут себя подобно мельчайшим магнитам.

Если отдельные тела можно зарядить положительно **или** отрицательно, так как существует элементарный электрический заряд, то никогда нельзя отделить северный полюс магнита от южного.

Таким образом,

нет оснований считать, что в природе существуют отдельные магнитные заряды.

Эта мысль была высказана Ампером в гипотезе об элементарных электрических токах. Согласно гипотезе Ампера, внутри атомов и молекул вещества циркулируют элементарные электрические токи. Если эти токи расположены хаотически по отношению друг к другу, то их действие взаимно компенсируется и никакими магнитными свойствами тело не обладает. В намагниченном состоянии (например, в постоянных магнитах) элементарные токи ориентированы определенным образом (рис. 12.3). Следовательно, магнитные свойства любого тела объясняются замкнутыми электрическими токами внутри него, т. е.

магнитное взаимодействие — это взаимодействие токов.

Замкнутый контур с током в магнитном поле. При изучении электрического поля используют ***пробный заряд,*** т. е. такой заряд, который собственным полем не искажает изучаемого поля. Исследования свойств магнитного поля проводят на маленькой плоской рамке с током, подводящие провода к которой переплетают: тогда в этих проводах течет тот же ток, но в противоположном направлении, поэтому силы, действующие со стороны магнитного поля на каждый проводник, равны, но противоположно направлены. Результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на скрученный проводник, равна нулю. Размеры рамки и сила тока, протекающего по ней, должны быть такими, чтобы магнитное поле самой рамки не искажало исследуемого магнитного поля. Такую рамку с током называют ***пробным контуром.***

Проделаем опыт. Подвесим вертикально маленький пробный контур. На некотором расстоянии от него расположим проводник. Если тока в проводнике нет, то рамка находится в безразличном состоянии равновесия. Если по проводнику пропустить электрический ток, то рамка с током повернется и расположится так, чтобы провод находился в плоскости рамки (рис. 12.4). При изменении направления тока в проводнике рамка повернется на угол тс. Следовательно, *магнитное поле оказывает ориентирующее действие на пробный контур.* Этим пользуются для установления направления поля.

Пробный контур, помещенный в магнитное поле, испытывает со стороны магнитного поля действие вращающего момента силы *M.* Опытным путем установлено, что для данной точки магнитного поля максимальное значение момента силы $M_{max}$, действу-

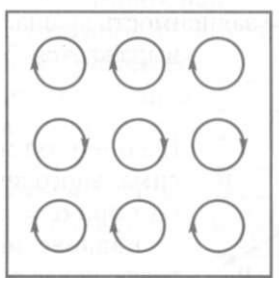


Рис. 12.3

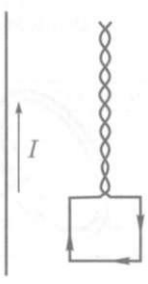



Рис. 12.4

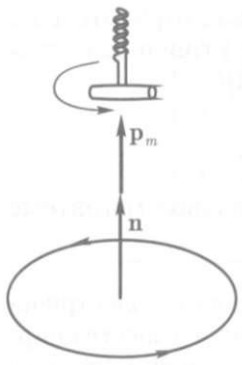


Рис. 12.5

ющего на контур с током, пропорционально произведению силы тока I в контуре на площадь контура *S,* т. е. $M_{max}$ и *IS.* Величину $p_m = IS$, характеризующую магнитные свойства контура с током, которые определяют его поведение во внешнем магнитном поле, называют магнитным моментом контура. Таким образом, $M_{\max} \approx p_m$.

Магнитному моменту контура $p_m$ приписывают определенное направление в пространстве. Следовательно, это ***величина векторная.***

**Вектор $\mathbf{p}_m$ совпадает с направлением положительной нормали n к плоскости контура** (рис. 12.5).

Положительное направление нормали совпадает с направлением перемещения ***буравчика*** с правой нарезкой, вращаемого в направлении тока. Направление магнитного момента можно определить и с помощью магнитной стрелки. Это направление указывает северный полюс стрелки.

## 12.2. Вектор индукции магнитного поля

**Магнитная индукция.** Экспериментально было установлено, что ***отношение максимального вращающего момента, действующего на контур с током в магнитном поле, к магнитному моменту этого контура не зависит от свойств пробного контура*** и поэтому может служить характеристикой исследуемого магнитного поля. Его называют ***магнитной индукцией:***

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}. \qquad (12.1)$$

Формула (12.1) определяет лишь модуль магнитной индукции. Магнитное поле может быть описано полностью, если в каждой его точке найдены модуль и направление магнитной индукции B. Вектор магнитной индукции совпадает с направлением внешнего магнитного поля.

**Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля в данной точке пространства.**

В общем случае зависимость вращающего момента Мот ориентации контура выражается формулой

$$M = Bp_m \sin\alpha, \qquad (12.2)$$

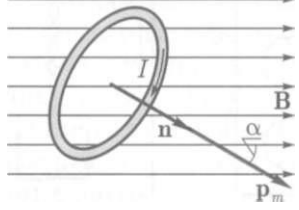


Рис. 12.6

где $\alpha$ — угол между векторами $\mathbf{p}_m$ и B (рис. 12.6). Максимального значения $M_{\max}$ вращающий момент достигает при $\alpha = \pi/2$.

Равновесие контура в магнитном поле возможно тогда, когда векторы $\mathbf{p}_m$ и B направлены по одной прямой.

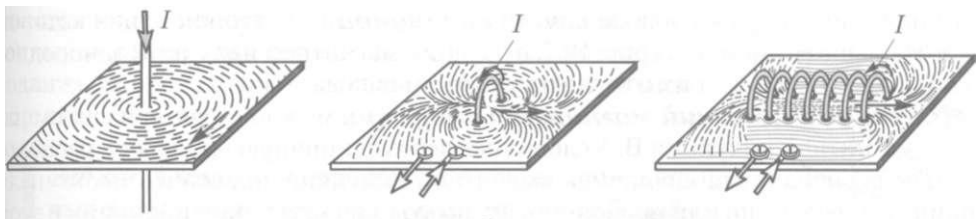



Рис. 12.7

За единицу магнитной индукции в СИ, называемой *тесла* (Тл)[1], принимается такая *индукция, при которой на контур, магнитный момент которого* 1 $А \cdot м^2$, *действует максимальный вращающий момент, равный* 1 Н • м.

Согласно (12.2), имеем 1 Тл = 1 Н/(А-м).

**Линии** магнитной индукции. Подобно тому как электрические поля графически изображаются с помощью электрических силовых линий, магнитные поля изображаются с помощью линий магнитной индукции (или магнитных силовых линий).

***Линии магнитной индукции*** — это линии, касательные к которым в данной точке совпадают по направлению с вектором В в этой точке. Линии магнитной индукции можно сделать «видимыми» с помощью железных опилок. Если на стеклянную пластинку, через которую пропущен прямой проводник с током, насыпать железных опилок и слегка постучать по пластинке, то железные опилки расположатся вдоль силовых линий (рис. 12.7, *а).*

Из опытов следует, что линии магнитной индукции прямого проводника с током представляют концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной току. Центр этих окружностей находится на оси проводника. С помощью железных опилок можно получить изображение линий магнитной индукции проводников с током любой формы (рис. 12.7, *а, б, в).*

**Линии** магнитной индукции всегда замкнуты **и** охватывают проводники с токами.

Это отличает их от линий напряженности электростатического поля. Такие поля называют ***вихревыми*** в отличие от ***потенциальных,*** примером которых является электростатическое поле.

Направление линий магнитной индукции связано с направлением тока в проводнике. Направление силовых линий магнитного поля, создаваемого проводником с током, определяется по ***правилу буравчика.***

Если правовинтовой буравчик ввинчивать по направлению тока, то направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции.

Магнитное поле называется ***однородным,*** если векторы магнитной индукции во всех его точках одинаковы (В = const). Примером однородного магнит-

[1] **Единица магнитной индукции получила свое название в честь югославского ученого — электро- и радиотехника Н.Теслы (1856- 1943).**

ного поля может служить поле внутри ***соленоида*** — катушки, длина которой много больше ее диаметра (рис. 12.7, в). Линии магнитной индукции однородного поля параллельны, и их плотность везде одинакова.

***Плотностью линий магнитной индукции*** можно характеризовать значение магнитной индукции **В.** Условились через единичную площадку, расположенную перпендикулярно линиям магнитной индукции, проводить такое число линий, которое равно или пропорционально модулю магнитной индукции в этой области магнитного поля.

**Магнитная проницаемость среды.** Если с помощью проводника с током в различных веществах создавать магнитное поле и исследовать его с помощью пробного контура, то можно убедиться, что магнитная индукция зависит в данной точке от рода вещества, т. е. зависит от свойств среды. Пусть **В** и $\mathbf{B}_0$ — магнитные индукции соответственно в данной однородной изотропной среде и в вакууме. Их отношение

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \tag{12.3}$$

показывающее, во сколько раз магнитная индукция в среде больше (или меньше), чем в вакууме, называют ***магнитной проницаемостью среды. Относительная магнитная проницаемость*** характеризует магнитные свойства среды, она зависит от рода вещества и температуры: $\mu \gtrless 1$ — величина безразмерная; для вакуума $\mu = 1$. По значению р, различают: а) диамагнетики $(\mu < 1)$, например, вода, мрамор, золото, ртуть, инертные газы; б) парамагнетики $(\mu > 1)$, например, кислород, алюминий, платина, щелочные металлы. Некоторые парамагнетики, например железо, имеют $\mu \gg 1$, их называют ферромагнетиками. Из ферромагнетиков изготовляют постоянные магниты.

При решении задач полезно знать формулы индукции магнитного поля:

а) бесконечно длинного прямолинейного проводника

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}, \tag{12.4}$$

где *Г* — кратчайшее расстояние от проводника до той точки, в которой определяется *В;*

б) внутри бесконечно длинного соленоида или тороида

$$B = \mu\mu_0 In, \tag{12.5}$$

где *n* — число витков, приходящихся на единичную длину соленоида или средней линии тороида.

## 12.3. Действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током. Закон Ампера

**Закон Ампера.** Одним из проявлений магнитного поля является его *силовое воздействие* на движущиеся электрические заряды и проводники с током. В 1820 г. А. Ампером был установлен закон, определяющий силу, действующую на

элемент тока в магнитном поле. Так как создать обособленный элемент тока нельзя, Ампер изучал поведение подвижных проволочных замкнутых контуров различной формы.

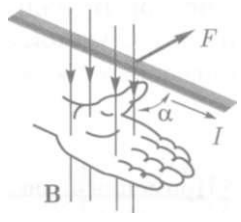


Рис. 12.8

> ***Закон Ампера:*** **на проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле индукции B, действует сила, пропорциональная длине отрезка проводника $\Delta l$, силе тока $I$, протекающего по проводнику, и индукции магнитного поля B:**

$$F = BI\Delta l \sin\alpha, \qquad (12.6)$$

где $\alpha$ — угол между направлением тока в проводнике и направлением вектора **B.**

Эта сила имеет максимальное значение при $\alpha = \pi/2$. Если проводник расположен вдоль линий магнитной индукции, то эта сила равна нулю.

**Правило левой руки.** Для определения направления силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле, применяется правило левой руки (рис. 12.8).

> ***Правило левой руки:*** **если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца совпадали с направлением тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле.**

Эта сила всегда перпендикулярна плоскости, в которой лежат проводник и вектор **B.** Зная направление и модуль силы, действующей на любой участок проводника $\Delta l_i$, можно вычислить силу, действующую на весь проводник. Для этого нужно найти сумму сил, действующих на все участки проводника.

## 12.4.* Взаимодействие токов

Рассмотрим взаимодействие параллельных проводников с током. Предположим, что в однородной изотропной среде с магнитной проницаемостью р, на расстоянии *d* друг от друга расположены два проводника *1* и *2* (рис. 12.9). Пусть в одном направлении по одному из них течет ток $I_1$, а по другому — $I_2$. Будем считать, что проводник с током $I_1$ создает магнитное поле, а проводник с током $I_2$ находится в магнитном поле проводника $I_1$.

Выделим на проводнике *2* произвольный элемент $\Delta l_i$, на него действует сила Ампера

$$\Delta F_i = B_1 I_2 \Delta l_i \sin\alpha,$$

где $B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi d}$ — индукция магнитного поля, создаваемого первым проводником.

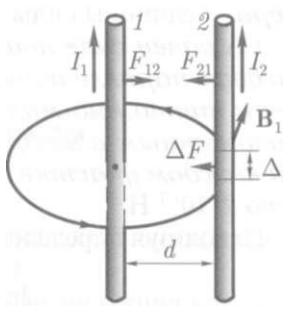


Рис. 12.9

Вектор $\mathbf{B}_1$ направлен перпендикулярно проводнику с током $I_1$, поэтому $\sin\alpha = 1$. С учетом этого

$$\Delta F_i = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi d} I_2 \Delta l_i.$$

Применяя правило левой руки, определяем направление этой силы. Чтобы найти силу $F_{21}$ (т.е. силу, действующую со стороны первого проводника на второй), нужно просуммировать все элементарные $\Delta F_i$. С учетом того, что $\Sigma\Delta l_i = l$, получим

$$F_{21} = \sum_{i=1}^{n} \Delta F_i = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \Delta l_i = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \qquad (12.7)$$

**Сила, с которой первый проводник действует на второй, пропорциональна произведению силы токов, текущих по проводникам, и обратно пропорциональна расстоянию между ними.**

Кроме того, она зависит от магнитных свойств среды, в которой находятся проводники, и их длины.

Пусть теперь, наоборот, первый проводник находится в магнитном поле, создаваемом вторым проводником. С помощью аналогичных вычислений получим, что второй проводник действует на первый с силой

$$F_{12} = -\frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \qquad (12.8)$$

Из сравнения формул (12.7) и (12.8) видно, что эти силы равны по модулю, но противоположны по направлению.

Если токи текут по проводникам в одинаковых направлениях (см. рис. 12.9), то проводники притягиваются, а в противоположных — отталкиваются, потому что на каждый из них со стороны магнитного поля другого проводника действует сила, модуль которой

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \qquad (12.9)$$

Магнитное взаимодействие проводников с током положено в определение ***ампера*** — единицы силы электрического тока, основной единицы СИ:

1 *А равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии* 1 м *друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной* 1 м *силу взаимодействия, равную* $2\cdot10^{-7}$ Н.

Используя определение ампера и формулу (12.9), можно найти

$$\mu_0 = \frac{2\pi dF}{\mu I_1 I_2 l} = \frac{2\pi\cdot 1\,\text{м}\cdot 2\cdot 10^{-7}\ \text{Н}}{1\cdot 1\,\text{А}\cdot 1\,\text{А}\cdot 1\,\text{м}} = 4\pi\cdot 10^{-7}\ \text{Гн}/\text{м}.$$

## 12.5. Магнитный поток

Рассмотрим плоскую площадку площадью $\Delta S$, находящуюся в однородном магнитном поле **B** (рис. 12.10).

***Магнитным потоком*** через поверхность $\Delta S$ называют физическую величину, равную произведению $B_n$ (проекции вектора магнитной индукции на нормаль к поверхности) на площадь этой поверхности:

$$\Delta\Phi = B_n \Delta S = B \Delta S \cos\alpha, \qquad (12.10)$$

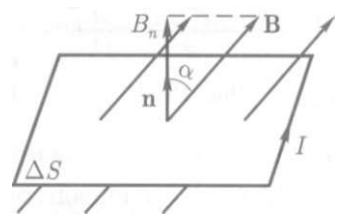



Рис. 1210

где $\alpha$ — угол между направлением нормали n и вектором индукции **B.**

Так как $B_n = B\cos\alpha$ — величина скалярная, скаляром является и магнитный поток.

**Магнитный поток Ф характеризует число линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность.**

В зависимости от того, какой знак имеет cos a, магнитный поток может быть положительным ($\Phi > 0$) и отрицательным ($\Phi < 0$). Знак $\cos\alpha$ зависит от выбора положительного направления нормали. Положительное направление нормали задается направлением тока, протекающего по рассматриваемому контуру.

**Магнитный поток через замкнутую поверхность равен нулю, так как число входящих силовых линий равно числу выходящих.**

Изменить магнитный поток можно следующими способами:

1) изменяя магнитную индукцию по модулю и направлению, т. е. помещая контур с неизменной площадью в неоднородное магнитное поле;

2) изменяя ориентацию контура относительно направления вектора магнитной индукции **B,** т. е. вращая контур в однородном магнитном поле.

Единица магнитного потока — *ВЕБЕР* (Вб).

1 Вб *равен потоку через плоскую поверхность площадью* 1 м$^2$, *помещенную перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, индукция которого равна* 1 Тл:

$$1\ \text{Вб} = 1\ \text{Тл}\cdot\text{м}^2.$$

## 12.6. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Предположим, что параллельные ветви цепи представляют собой шины, вдоль которых скользит проводник, длина которого / (рис. 12.11).

Если эту систему поместить в однородное магнитное поле, индукция которого направлена перпендикулярно плоскости рисунка, то проводник начнет дви-

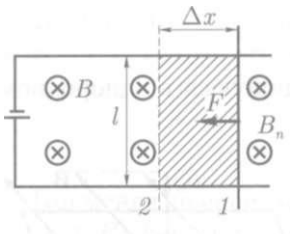


Рис. 12.11

гаться. При движении он будет перемещаться поступательно параллельно самому себе, так как на него со стороны магнитного поля действует сила Ампера

$$F = BlI.$$

Пусть проводник под действием силы ***F*** перемещается на $\Delta x$: из положения *1* в положение *2*. При этом совершается механическая работа

$$\Delta A = F\Delta x = Bl\Delta x,$$

где $l\Delta x = S$ — площадь, охватываемая проводником при движении (на рис. **12.11** она заштрихована). Тогда с учетом **(12.10)**

$$\Delta A = IB\Delta S = I\Delta\Phi. \qquad (12.11)$$

*Работа, совершаемая силами Ампера при перемещении проводника с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на магнитный поток через поверхность, охватываемую проводником при его движении.*

Так как $\Delta\Phi$ характеризует число линий магнитной индукции, пересекаемых проводником при движении, то при многократном перемещении линейного проводника (или при вращении контура) для подсчета работы необходимо брать суммарное число пересечений проводником магнитных силовых линий.

Работа, вычисляемая по формуле **(12.11)**, в СИ выражается в джоулях.

## 12.7. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца

Действие магнитного поля на движущийся заряд. Движущиеся электрические заряды создают вокруг себя магнитные поля, которые распространяются в вакууме со скоростью света с. В средах $(\varepsilon > 1, \mu \gtrless 1)$ скорость распространения меньше с.

Если же заряд движется во внешнем магнитном поле, то происходит силовое взаимодействие магнитных полей, определяемое по закону Ампера. Процесс взаимодействия магнитных полей исследовался Лоренцем, который вывел формулу для расчета силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

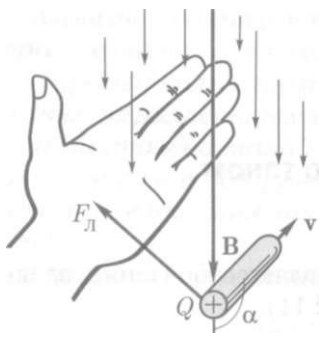


Рис. **12.12**

Сила Лоренца. Силу, действующую со стороны магнитного поля **B** на заряд *Q*, движущийся со скоростью v, можно определить исходя из закона Ампера. Пусть по проводнику длиной $\Delta l$ за время $\Delta t$ проходит *n* одинаковых зарядов **O** (рис. **12.12**). Это означает, что через проводник протекает ток $I = \frac{nQ}{\Delta t}$. Согласно закону Ампера, на *nQ* зарядов действует сила

$$F = BI\Delta l\sin\alpha = B\frac{nQ}{\Delta t}\Delta l\sin\alpha.$$

Сила, с которой поле действует на каждый отдельный заряд (сила Лоренца),

$$F_Л = \frac{F}{n} = BQ\frac{\Delta l}{\Delta t}\sin\alpha.$$

Учитывая, что $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ средняя скорость движения заряда, получаем

$$F_Л = QvB\sin\alpha, \qquad (12.12)$$

где $\alpha$ — угол между вектором скорости заряда **v** и вектором магнитной индукции **B.**

- **Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам v и B.**

**Правило левой руки.** Для движущегося положительного заряда направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки (см. рис. 12.12). С изменением знака заряда направление силы меняется на противоположное.

Анализируя выражение (12.12), можно сделать выводы:

а) если скорость заряда $v = 0$, то $F_Л = 0$, т. е. магнитное поле не действует на неподвижную заряженную частицу;

б) если $\alpha = 0$, то $\sin\alpha = 0$ и $F_Л$ — 0, т.е. если частица движется так, что вектор ее скорости **v** параллелен вектору магнитной индукции **B,** то на нее со стороны магнитного поля силы не действуют.

Так как сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно вектору скорости летящей частицы, то она не изменяет модуля скорости, а изменяет лишь направление движения частицы. Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен направлению скорости заряженной частицы, то сила Лоренца искривляет траекторию движения, выполняя роль центростремительной силы. Действие этой силы не приводит к изменению кинетической энергии заряженной частицы, т. е.

- **сила Лоренца не совершает работу.**

## 12.8.* Определение удельного заряда. Ускорители заряженных частиц

**Движение заряженной частицы в магнитном поле.** Очень важным является использование явления действия магнитного поля на движущийся заряд при исследованиях космических частиц для определения знаков их зарядов. Для вывода общих закономерностей считаем, что магнитное поле однородно.

Траектория заряженной частицы, попавшей в мощное магнитное поле, резко изменяется (рис. 12.13). В зависимости от знака заряда частица отклоняется *влево* или *вправо* (на рис. 12.13 вектор индукции магнитного поля направлен от нас перпендикулярно плоскости чертежа) и движется по окружности, радиус *R* которой можно определить из условия равенства центростремительной силы и силы Лоренца:

$$\frac{mv^2}{R} = QvB.$$

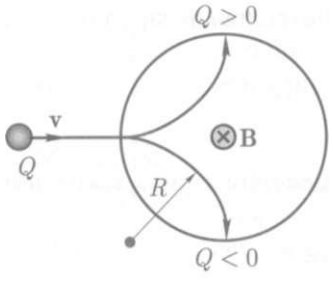



Рис. 12.13

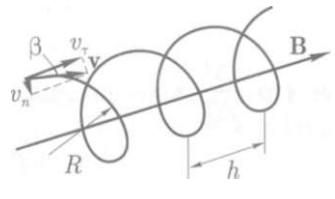



Рис. 12.14

Отсюда

$$R = \frac{mv}{QB}. \qquad (12.13)$$

Частица, скорость v которой направлена под углом $\beta$ к B, движется по винтовой линии и как бы навивается на силовую линию (рис. 12.14). Шаг спирали $h$ определяется тангенциальной составляющей $v_\tau$ скорости частицы. Радиус спирали $R$ зависит от ее нормальной составляющей $v_n$.

На электрический заряд, движущийся одновременно в электрическом и магнитном полях, действует результирующая сила

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{эл} + \mathbf{F}_{Л} = Q\mathbf{E} + Q\mathbf{v}\mathbf{B}. \qquad (12.14)$$

Между электрической и магнитной составляющими этой силы имеется принципиальная разница.

**Электрическое поле изменяет скорость, а следовательно, и кинетическую энергию частицы; однородное магнитное поле изменяет только направление ее движения.**

Пропуская заряженные частицы через одновременно действующие на них электрическое и магнитное поля, из (12.13) определяют их удельные заряды $Q/m$ — отношения зарядов частиц к их массам. Скорость частицы вычисляют по ускоряющей разности потенциалов электрического поля. Действительно, работа электрических сил $Q(\varphi_1 - \varphi_2)$ равна кинетической энергии частицы:

$$\frac{mv^2}{2} = Q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2Q(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}.$$

Радиус $R$ траектории определяют экспериментально. При известных B и $(\varphi_1 - \varphi_2)$ из (12.13) рассчитывают удельный заряд:

$$\frac{Q}{m} = \frac{2(\varphi_1 - \varphi_2)}{R^2 B^2}.$$

Так были определены удельные заряды электрона $\frac{e}{m_e} = 1{,}7588 \cdot 10^{11}$ Кл / кг и протона $\frac{e}{m_p} = 9{,}5488 \cdot 10^{7}$ Кл / кг.

Приборы, с помощью которых можно разделять заряженные частицы по их удельным зарядам, называют ***масс-спектрографами.***

**Ускорители заряженных частиц.** Структуру атомных ядер исследуют бомбардируя их частицами, имеющими большую энергию, т. е. летящими с большой скоростью. Для получения таких частиц в лабораторных условиях используют ускорители частиц различных видов, одним из которых является *циклический ускоритель (циклотрон).*

В циклотроне (рис. 12.15) заряженная частица движется между полюсами электромагнита, многократно проходя через электрическое поле. При этом каждый раз ее энергия возрастает на $10^2 - 10^3$ эВ. Управление движением частицы производится с помощью поперечного магнитного поля.

На заряженную частицу, движущуюся в постоянном магнитном поле, действует сила Лоренца $F_Л$, в результате частица движется по окружности постоянного радиуса *R,* если ее масса то и скорость $v$ остаются неизменными (рис. 12.15, *а).* Сила Лоренца $F_Л$ равна силе, вызывающей центростремительное ускорение, т.е.

$$\frac{mv^2}{R} = QvB,$$

где $Q$ — заряд частицы; $B$ — индукция магнитного поля (векторы v и **B** взаимно-перпендикулярны, т. е. $\sin\alpha$ — 1).

Из этой формулы легко получить выражения для угловой скорости частицы:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{QB}{m}.$$

Если $Q$, то и $B$ постоянны, то угловая скорость, а следовательно, и число оборотов частицы в секунду также являются постоянными величинами, не зависящими от энергии частицы. Однако радиус траектории зависит от скорости движения частицы [см. (12.13)]. Поэтому с увеличением скорости движения частицы и ростом ее энергии радиус траектории увеличивается, поэтому и частица в циклотроне движется по раскручивающейся спирали.

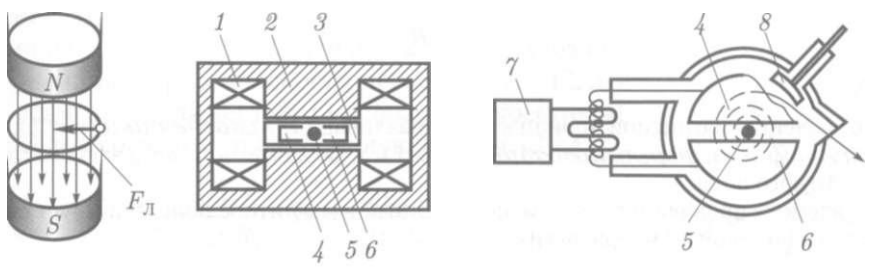



Рис. 12.15

Схема циклотрона показана на рис. **12.15,** *б* (вид сбоку) и рис. **12.15,** *в* (вид сверху). Между полюсами электромагнита, состоящего из магнита *2* и обмоток *1,* помещают два металлических электрода *4* и *6,* на которые подается высокое напряжение от высокочастотного генератора 7. Электроды называются дуантами из-за сходства их формы с латинской буквой *D.* Вблизи центра магнита в промежутке между дуантами располагается источник 5 заряженных частиц (ионов). Вся система из электродов и ионного источника помещена в вакуумную камеру *3,* разрежение в которой достигает $10^{-5}$ мм рт. ст.

Частота изменения электрического поля подбирается так, чтобы к моменту подлета иона, вылетевшего из источника *5,* к зазору между дуантами там существовала ускоряющая разность потенциалов. Внутри дуантов электрическое поле отсутствует, и там ион движется по дуге постоянного радиуса, соответствующего энергии иона. В промежутках между дуантами энергия иона увеличивается, увеличивается и радиус следующего полувитка в дуанте. Ионы движутся по спирали, приближаясь к краю полюса магнита. Пучок ускоренных положительных ионов выводят из циклотрона с помощью отклоняющего электрода *8,* на который подается высокий отрицательный потенциал. Проходя мимо него, пучок ионов изменяет свою траекторию и через окошко, закрытое тонкой фольгой, выходит из камеры.

Циклотрон используется в качестве ускорителя тяжелых частиц — протонов и многозарядных положительных ионов.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Взаимодействие между проводниками с током, т. е. взаимодействие между движущимися электрическими зарядами, осуществляется посредством магнитного поля.

• Магнитное поле, как и электрическое, является частным случаем проявления единого электромагнитного поля.

• Основной характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция*

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}.$$

• Магнитное поле изображается с помощью линий магнитной индукции. Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с током. Поля с замкнутыми силовыми линиями называют *вихревыми.*

• Величину, показывающую, во сколько раз магнитная индукция в среде больше или меньше, чем в вакууме, называют *магнитной проницаемостью:*

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

• По значению магнитной проницаемости различают *диамагнетики* $(\mu < 1)$, *парамагнетики* $(\mu > 1)$, *ферромагнетики* $(\mu \gg 1)$. У ферромагнетиков $\mu$ зависит от внешнего магнитного поля.

• На элемент проводника с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, которая, согласно закону Ампера, равна

$$F = BI\Delta l \sin\alpha.$$

Направление силы определяется *по правилу левой руки.*

• При перемещении проводника с током в магнитном поле силами Ампера совершается работа

$$A = I\Delta\Phi,$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока:

$$\Delta\Phi = B\Delta S\cos\alpha.$$

Магнитный поток характеризует число линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность. Магнитный поток через замкнутую поверхность равен нулю.

• На движущуюся заряженную частицу в магнитном поле действует сила Лоренца

$$F_Л = QvB\sin\alpha.$$

Эта сила изменяет направление скорости, т. е. искривляет траекторию движения. Сила Лоренца не изменяет кинетическую энергию частицы, т. е. не совершает работу.

• Все тела в магнитном поле намагничиваются, т. е. создают свое магнитное поле.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Что представляет собой магнитное поле? Какими свойствами оно обладает? **2.** В чем заключалась гипотеза Ампера? **3.** Что называют вектором магнитной индукции? Какой характеристикой поля он является? **4.** Что называют линиями магнитной индукции? Какое направление они имеют? **5.** Какие поля называют вихревыми? **6.** Сформулируйте принцип суперпозиции полей. **7.** Как связаны векторы напряженности и индукции магнитного поля? **8.** Сформулируйте закон Ампера. **9.** Расскажите о взаимодействии токов. **10.** Что называют магнитным потоком? В каких единицах его выражают? **11.** Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле? **12.** Какая сила действует со стороны магнитного поля на движущийся заряд? Чему она равна? **13.** Что называют удельным зарядом частицы? С помощью каких приборов они определяются? **14.** Какие ускорители заряженных частиц вам известны?

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** По двум длинным параллельным проводам текут в противоположных направлениях токи 90 и 70 А. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого токами в точке $M$, находящейся на расстоянии 12 см от первого и 14 см от второго проводов, если расстояние между проводами 10 см.

**Дано:** $I_1 = 90$ А; $I_2 = 70$ А; $R_1 = 12$ см $= 0{,}12$ м; $R_2 = 14$ см $= 0{,}14$ м; $d = 10$ см $= 0{,}1$ м; $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\mu = 1$.

**Найти:** $B$.

**Решение.** Предположим, что проводники направлены перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 12.16). Ток $I_1$ идет от нас, за чертеж. Он обозначен крестиком. Каждый ток создает в точке $M$ индукцию [см. (12.4)]

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi R_1},\quad B_2 = \frac{\mu\mu_0 I_2}{2\pi R_2},$$

причем $B_1$ направлена перпендикулярно $R_1$ по часовой стрелке (буравчик ввинчивается), а $B_2$ — перпендикуляр-

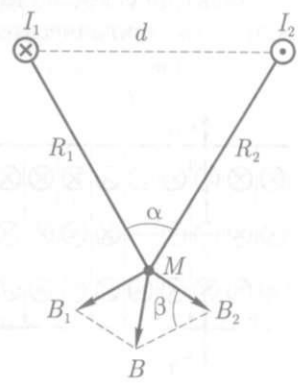


Рис. 12.16

но $R_2$ против часовой стрелки (буравчик вывинчивается). Индукция поля в точке $M$ равна геометрической сумме индукций $B_1$ и $B_2$:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2\cos\beta}.$$

**Вычисления:**

$$B_1 = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot 90\ \text{А}}{2\pi \cdot 0{,}12\ \text{м}} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл};\quad B_2 = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot 70\ \text{А}}{2\pi \cdot 0{,}14\ \text{м}} \approx 1 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Из теоремы косинусов определим cos a (поскольку $\alpha = \beta$, как углы со взаимно-перпендикулярными сторонами, $\cos\beta = \cos\alpha$):

$$\cos\alpha = \frac{R_1^2 + R_2^2 - d^2}{2R_1R_2} = \frac{(144 + 196 - 100)\text{см}^2}{2 \cdot 12 \cdot 14\ \text{см}^2} = \frac{5}{7}.$$

Следовательно,

$$B = \sqrt{\left(1{,}5 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(1 \cdot 10^{-4}\right)^2 - 2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\frac{5}{7}}\ \text{Тл} \approx 1{,}1 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Ответ: $B = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ Тл.

• Задача 2. Параллельно пластинам плоского конденсатора создано однородное магнитное поле индукцией $4 \cdot 10^{-3}$ Тл. Между пластинами перпендикулярно направлению магнитного поля и параллельно пластинам (рис. 12.17) движется электрон со скоростью 5 000 км/с. Определить напряженность электрического поля между пластинами.

Дано: $B$ = 4- $10^{-3}$ Тл; $v$ = 5 000 км/с = 5-10$^6$ м/с.

Найти: $E$.

Решение. Направление напряженности магнитного поля принимается перпендикулярным чертежу (на рис. 12.17 указано крестиками). На электрон, движущийся перпендикулярно полю, по формуле Лоренца (12.12) со стороны магнитного поля действует сила $F_Л = Bve$, где $B = \mu\mu_0 H$ — индукция магнитного поля; е — заряд электрона; $\mu$ - относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0$ — магнитная постоянная.

Электрическое поле действует на электрон с силой $F_{эл} = eE$, где $E$ — напряженность электрического поля. Электрон движется параллельно пластинам и перпендикулярно магнитному полю в том случае, если эти силы равны по модулю, но противоположны по направлению: $Bve = Ee$. Отсюда

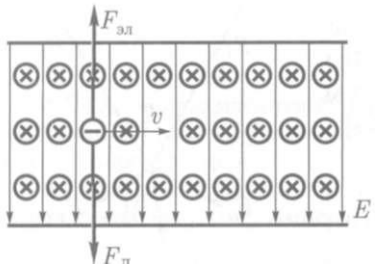


Рис. 12.17

$$E = Bv.$$

Вычисления:

$$E = 4\pi \cdot 10^{-3}\ \text{Тл} \cdot 5 \cdot 10^6\ \text{м/с} = 2 \cdot 10^4\ \text{В/м}.$$

Ответ: $E = 2 \cdot 10^4$ В/м.

• Задача 3. Заряд с постоянной скоростью $v$ влетает в однородное магнитное поле перпенди-

Индукция поля в точке

кулярно линиям индукции. Индукция поля **1** Тл. В течение $10^{-4}$ с параллельно магнитному полю действует электрическое поле напряженностью **100** В/м. Вычислить постоянный шаг спиральной траектории заряда.

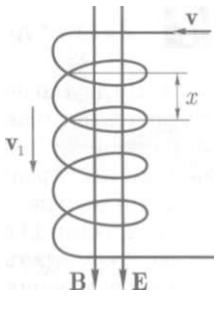


Рис. 12.18

**Дано:** $B$ = **1** Тл; $t = 10^{-4}$ с; $E$ = **100** В/м.

**Найти:** *x.*

**Решение.** Магнитная составляющая силы Лоренца действует нормально к направлению скорости (рис. **12.18**). Направление силы может быть определено правилом левой руки. При отсутствии электрического поля эта сила заставляет заряд двигаться по окружности. Магнитная составляющая силы Лоренца $F_Л = BQv\sin(\mathbf{B},\mathbf{v})$ равна центростремительной силе:

$$BQv = \frac{mv^2}{r}, \qquad (1)$$

где $B$ — индукция поля; $Q$ — заряд; $v$ — скорость движения; то — масса заряда; г — радиус окружности, по которой движется заряд.

В рассматриваемом случае $\sin(\mathbf{B},\mathbf{v}) = 1$. Радиус окружности находим из (1):

$$r = \frac{mv}{BQ}. \qquad (2)$$

С учетом **(2)** период обращения заряда

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{BQ}. \qquad (3)$$

При кратковременном действии электрического поля возникает электрическая составляющая силы Лоренца, направленная параллельно полю, $F_{эл} = QE$, где $E$ — напряженность электрического поля. За время $t$ действия $F_{эл}$ составляющая скорости, направленная параллельно полю, возрастает от нуля до $v_1$. По импульсу силы $F_{эл}t = mv_1$ находим

$$v_1 = \frac{F_{эл}t}{m} = \frac{QEt}{m}. \qquad (4)$$

Наличие составляющей скорости $\mathbf{v}_1$, направленной перпендикулярно v, означает, что заряд движется по спирали. При установившемся движении шаг спирали $x$ постоянен. Он определяется из условия, что за один оборот заряда (за период $T$) происходит его смещение на расстояние шага $x = v_1 T$. Из (3) и (4) получим

$$x = Q\frac{Et}{m}\frac{2\pi m}{BQ} = \frac{E}{B}2\pi t.$$

**Вычисления:**

$$x = \frac{100\ \text{В/м} \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4}\ \text{с}}{1\ \text{Тл}} = 0{,}06\ \text{м}.$$

**Ответ:** $x$ = **0,06** м.

### *Задачи для самостоятельного решения*

**1.** По двум параллельным проводникам, находящимся на расстоянии 12 см друг от друга, протекают токи по 30 А. Определить индукцию магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от каждого проводника, если токи протекают: а) в одном, б) в противоположных направлениях.

2. По двум параллельным проводникам протекают токи силой 3 и 4 А. Расстояние между проводниками 14 см. Найти множество точек, в которых индукция магнитного поля равна нулю. Рассмотреть два случая: токи протекают: а) в одном направлении, б) в противоположных направлениях.

3. По изолированному круговому проводнику радиусом 10 см протекает ток 5 А. Перпендикулярно плоскости кольца проходит длинный проводник так, что он соприкасается с кольцевым проводником. Найти напряженность магнитного поля в центре кругового проводника при условии, что ток в прямом проводнике равен 15,7 А.

4. Под влиянием однородного магнитного поля в нем с ускорением 0,2 $м/с^2$ движется прямолинейный алюминиевый проводник сечением 1 $мм^2$. По проводнику течет ток 5 А, его направление перпендикулярно полю. Вычислить индукцию поля.

**5.** В однородном горизонтальном магнитном поле находится в равновесии горизонтальный прямолинейный алюминиевый проводник с током 10 А, расположенный перпендикулярно полю. Определить индукцию поля, считая радиус проводника равным 2 мм.

**6.** В магнитное поле, образованное в вакууме, перпендикулярно линиям индукции влетают электроны с энергией 1 эВ. Индукция поля $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Тл. Вычислить силу Лоренца и радиус траектории движения электронов.

**7.** Протоны в магнитном поле с индукцией $5 \cdot 10^{-2}$ Тл движутся в вакууме по дуге окружности радиусом 50 см. Какую ускоряющую разность потенциалов они должны были пройти?

**Ключевые слова:** *магнитное поле, магнитная индукция, магнитная проницаемость, закон Ампера, магнитный поток, сила Лоренца.*

## Глава 13

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

## 13.1. Электромагнитная индукция

Опыты Фарадея. В 20-х годах XIX в. проблемами электромагнетизма заинтересовался гениальный английский ученый-самоучка М. Фарадей (1791 -1867). Эрстед и Ампер превратили электричество в магнетизм, Фарадей поставил перед собой задачу «превратить магнетизм в электричество». В 1821 г. он записал в своем дневнике «Коль скоро электричество может создавать магнетизм, может ли магнетизм создавать электричество?». И спустя 10 лет ученым экспериментально было обнаружено (1831):

> при изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, в нем возникает электрический ток.

Это явление было названо ***электромагнитной индукцией*** («индукция» — значит «наведение»).

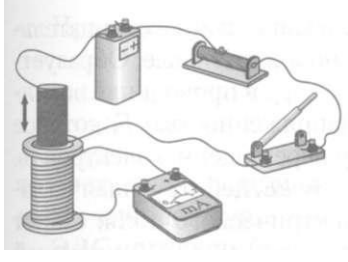


Рис. 13.1

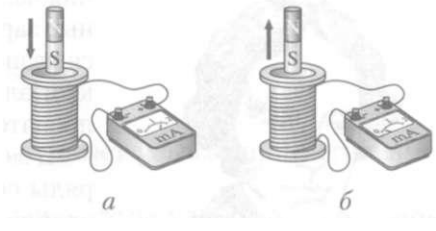



Рис. 13.2

Рассмотрим опыты, которые привели Фарадея к этому открытию.

На рис. 13.1 изображена катушка, включенная в цепь источника тока. Эта катушка вставлена в другую катушку, подключенную к амперметру. При замыкании и размыкании цепи внутренней катушки во внешней катушке возникает индукционный ток.

Затем с помощью опытов Фарадей доказал, что ток возникает и при перемещении катушек друг относительно друга (см. рис 13.1).

Знакомый с трудами Ампера (см. 12.1), Фарадей понимал, что магнит — это совокупность маленьких токов, циркулирующих в молекулах, поэтому он провел аналогичный опыт, заменив катушку с током на магнит.

На рис. 13.2 изображена катушка, подключенная к амперметру. Перемещая вдоль катушки постоянный магнит вниз, увидим, что, пока магнит движется, стрелка гальванометра отклоняется, т. е. в катушке возникает электрический ток (рис. 13.2, *а).*

Как только магнит останавливается, ток исчезает. При движении магнита в обратном направлении — вверх — электрический ток в катушке возникает вновь, но направление тока противоположно первому (рис. 13.2, *б).*

После многочисленных опытов Фарадей установил, что в замкнутых проводящих контурах электрический ток возникает лишь в тех случаях, когда они находятся в переменном магнитном поле, независимо от того, каким способом достигается изменение потока индукции магнитного поля во времени. Ток, возникающий при явлении электромагнитной индукции, называют *индукционным током.* Строго говоря, при движении контура в магнитном поле генерируется не определенный ток (который зависит от сопротивления), а определенная ЭДС.

**Закон Фарадея.** Рассмотрим, как возникает ЭДС индукции, а следовательно, и индукционный ток. Пусть проводник без тока длиной $l$ движется в магнитном поле со скоростью $v$ (рис. 13.3). Магнитное поле однородное. Вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости рисунка от нас. При движении проводника вправо свободные электроны, содержащиеся в нем, будут двигаться также вправо, т.е. возникает конвекционный ток. Направление этого тока обратно направлению движения электронов. На каждый движущийся электрон со стороны магнитного поля действует сила Лоренца $F_л$. Заряд электрона — отрицательный, поэтому сила Лоренца направлена вниз. Под действием этой силы электроны должны двигаться вниз, в

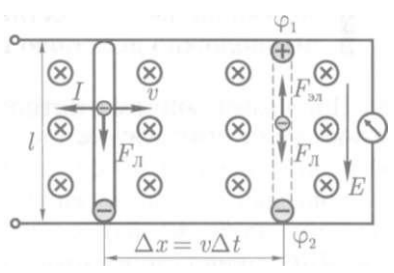



Рис. 13.3



М. Фарадей

нижней части проводника $l$ накапливаются отрицательные заряды, а в верхней — положительные. Образуется разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$, в проводнике возникает электрическое поле напряженностью $E$, которое препятствует дальнейшему перемещению электронов.

В момент, когда сила $F_{эл} = eE$, действующая на заряды со стороны этого электрического поля, станет равной по модулю силе $F_Л = evB\sin\alpha$, действующей на заряды со стороны магнитного поля, т. е. при $eE = evB\sin\alpha$, или $E = vB\sin\alpha$, заряды перестанут перемещаться.

Напряженность электрического поля $E$ в движущемся проводнике длиной $l$ и разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ связаны между собой соотношением

$$\varphi_1 - \varphi_2 = El,$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 = vBl\sin\alpha. \tag{13.1}$$

Если такой проводник замкнуть, то по цепи пойдет ток. Таким образом, на концах проводника индуцируется ЭДС

$$\mathscr{E}_{инд} = vBl\sin\alpha. \tag{13.2}$$

Более подробное изучение электромагнитной индукции показало, что ЭДС индукции, возникающая в каком-либо замкнутом контуре, равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, взятую с обратным знаком. Таким образом,

$$\mathscr{E}_{инд} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \tag{13.3}$$

Соотношение (13.3) выражает ***закон электромагнитной индукции***, или закон Фарадея.

> ***Закон Фарадея*: ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.**

**Правило Ленца.** Знак «минус» в формуле (13.3) отражает ***правило Ленца***:

> **индукционный ток всегда направлен таким образом, что его действие противоположно действию причины, вызывающей ток.**

При возрастании магнитного потока

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0,\ \mathscr{E}_{инд} < 0,$$

т. е. ЭДС индукции вызывает ток такого направления, при котором его магнитное поле уменьшает магнитный поток через контур.

При уменьшении магнитного потока

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0, \ \mathscr{E}_{\text{инд}} > 0,$$

т.е. магнитное поле индукционного тока увеличивает убывающий магнитный поток через контур.

**ЭДС** индукции. Электродвижущая сила в цепи — это результат действия ***сторонних сил,*** т.е. сил неэлектрического происхождения. При движении проводника в магнитном поле роль сторонних сил выполняет сила Лоренца, под действием которой происходит разделение зарядов, в результате чего на концах проводника появляется разность потенциалов. ЭДС индукции в проводнике характеризует работу по перемещению единичного положительного заряда вдоль проводника.

Если замкнутый контур содержит $N$ последовательно соединенных витков (например, катушку или соленоид), то ЭДС индукции равна сумме ЭДС каждого витка:

$$\mathscr{E}_{\text{инд}} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \tag{13.4}$$

Если замкнутый проводящий контур имеет сопротивление $R$, то сила индукционного тока определяется по формуле

$$I = \frac{\mathscr{E}_{\text{инд}}}{R}. \tag{13.5}$$

При этом в контуре протекает количество электричества — заряд

$$\Delta Q = -\frac{\Delta\Phi}{R}. \tag{13.6}$$

Явление электромагнитной индукции лежит в основе действия ***электрических генераторов.*** Если равномерно вращать проволочную рамку в однородном магнитном поле, то возникает индуцированный ток, периодически изменяющий свое направление. Даже одиночная рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле, представляет собой генератор переменного тока. Более сложные генераторы обычно являются улучшенными вариантами такого устройства.

## 13.2. Вихревое электрическое поле

**Вихревое** электрическое поле. Как отмечалось ранее, переменное магнитное поле порождает ***наведенное (индуцированное) электрическое поле.*** Если магнитное поле постоянно, то индуцированного электрического поля не возникнет. Следовательно, индуцированное электрическое поле не связано с зарядами, как это имеет место в случае электростатического поля; его силовые линии не начинаются и не заканчиваются на зарядах, а замкнуты сами на себя, подобно силовым линиям магнитного поля. Это означает, что

**индуцированное электрическое поле, подобно магнитному, является вихревым.**

Если неподвижный проводник поместить в переменное магнитное поле, то в нем индуцируется ЭДС. Электроны приводятся в направленное движение электрическим полем, индуцированным переменным магнитным полем; возникает индуцированный электрический ток. В этом случае проводник является лишь индикатором индуцированного электрического поля. Поле приводит в движение свободные электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя. Теперь можно утверждать, что и без проводника это поле существует, обладая запасом энергии.

**Сущность явления электромагнитной индукции заключается не столько в появлении индуцированного тока, сколько в возникновении вихревого электрического поля.**

Это фундаментальное положение электродинамики установлено Максвеллом как обобщение закона электромагнитной индукции Фарадея.

**В отличие от электростатического поля индуцированное электрическое поле является непотенциальным, так как работа, совершаемая в индуцированном электрическом поле, при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции, а не нулю.**

Направление вектора напряженности вихревого электрического поля устанавливается в *соответствии* с законом электромагнитной индукции Фарадея и правилом Ленца.

Так как вихревое электрическое поле существует и в отсутствие проводника, то его можно применять для ускорения заряженных частиц до скоростей, соизмеримых со скоростью света. Именно на использовании этого принципа основано действие ускорителей электронов — ***бетатронов.***

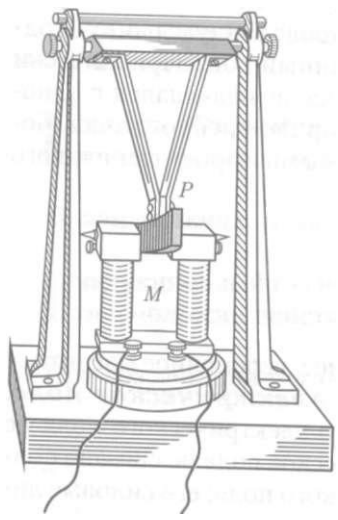



Рис. 13.4

**Вихревые токи.** * Если массивный проводник, сопротивление которого мало, движется в магнитном поле, то в нем возникают короткозамкнутые индуцированные токи. Эти токи, сила которых может достигать больших значений, являются ***вихревыми.*** Открыл и изучил эти токи французский физик Ж.Б.Л.Фуко, по имени которого они и названы (токи Фуко). Направление вихревых токов, как и всяких индуцированных токов, определяется по правилу Ленца, т. е. их направление таково, что создаваемое ими магнитное поле противодействует движению проводника.

Рассмотрим следующий эксперимент. Пусть массивный маятник *P* (рис. 13.4), выполненный из сплошного куска алюминия или меди, колеблется между полюсами сильного электромагнита *M*. Если электромагнит не включен, то маятник, прежде чем остановиться, совершит довольно много колебаний.

При включенном электромагните маятник, дойдя до него, резко тормозится и останавливается. Это происходит потому, что в нем возникает индуцированный ток, который, согласно правилу Ленца, создает магнитное поле, противодействующее движению маятника. Если в этом маятнике сделать прорези, то вихревые токи уменьшатся и маятник будет тормозиться не так сильно.

Тормозящее действие вихревых токов используется для гашения колебаний стрелок в электроизмерительных приборах.

Сила вихревого тока зависит от формы куска металла, движущегося в магнитном поле, от свойств материала, из которого он выполнен, и от скорости изменения магнитного потока. Вихревые токи возникают и в неподвижных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Свойство вихревых токов нагревать проводники используют в индукционных печах для сильного нагревания или даже плавления металлов.

## 13.3. Самоиндукция

Самоиндукция. Рассмотрим цепь (рис. 13.5), состоящую из источника тока $\mathscr{E}$, реостата $R$, катушки индуктивности $L$, гальванометра Г и ключа $K$.

Если цепь замкнута, то по гальванометру Г и катушке индуктивности $L$ протекает электрический ток. В момент размыкания цепи стрелка гальванометра резко отклоняется в обратную сторону. Это происходит потому, что при размыкании цепи магнитный поток в катушке уменьшается, вызывая в ней ЭДС самоиндукции. Ток самоиндукции $I_{си}$ в соответствии с законом Ленца препятствует убыванию магнитного потока, т. е. он направлен в катушке так же, как и убывающий ток $I_2$. Этот ток целиком проходит через гальванометр, но его направление противоположно направлению $I_1$. Явление возникновения индуцированного тока в цепи в результате изменения тока в этой цепи называют ***самоиндукцией.***

Самоиндукция — частный случай **явления** электромагнитной **индукции.**

Выясним, от чего зависит ЭДС самоиндукции. Индукция **B** пропорциональна силе тока в катушке, поэтому магнитный поток, возникающий в катушке, также пропорционален силе тока:

$$\Phi = LI. \tag{13.7}$$

Коэффициент пропорциональности $L$ называют ***индуктивностью контура.***

При изменении собственного магнитного потока в контуре, согласно закону электромагнитной индукции, возникает ЭДС самоиндукции

$$\mathscr{E}_{си} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \tag{13.8}$$

Подставляя в выражение (13.8) формулу (13.7), находим, что ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока:

$$\mathscr{E}_{си} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \tag{13.9}$$

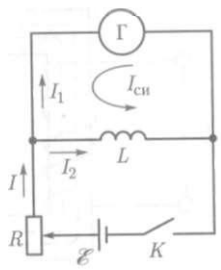


Рис. 13.5

**Индуктивность.** Из формулы (13.9) следует, что *индуктивность* — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с. Индуктивность $L$ контура зависит от его геометрической формы, размеров и магнитных свойств среды, в которой он находится. Например, для соленоида длиной $l$ и площадью сечения витка $S$, находящегося в вакууме или воздухе,

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}, \qquad (13.10)$$

где N — общее число витков соленоида; $\mu_0$ — магнитная постоянная. Учитывая, что объем соленоида $V = lS$, а $n = N/l$ - число витков, приходящихся на единицу длины, формулу (13.10) можно переписать в виде

$$L = \mu_0 n^2 V. \qquad (13.11)$$

Из формулы (13.7) следует, что $L = \Phi/I$.

Из этой формулы можно определить единицу индуктивности — *генри:*

$$1\ \text{Гн} = 1\ \text{Вб/А} = 1\ \text{В}\cdot\text{с/А}.$$

Как следует из опытов, индуктивность всякого контура зависит от свойств среды, в которой он находится. В этом можно убедиться с помощью опыта, схема которого дана на рис. 13.5. Если в катушку $L$ поместить железный сердечник, то сила тока самоиндукции возрастет во много раз. Это свидетельствует о том, что увеличилась индуктивность катушки.

Величину, равную отношению индуктивности L контура в однородной среде к индуктивности $L_0$ контура в вакууме, называют магнитной проницаемостью среды:

$$\mu = L/L_0. \qquad (13.12)$$

Магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства вещества, - величина безразмерная.

**Взаимная индукция.** Если контур, состоящий из проводника *2* (рис. 13.6), поместить вблизи контура *1* с током, изменяющимся с течением времени, то в проводнике *2* будет зарегистрировано индуцированное электрическое поле. Явление возникновения индуцированного электрического поля в проводниках, находящихся вблизи других проводников, по которым протекает изменяющийся во времени электрический ток, называют *взаимной индукцией.* ЭДС взаимной индукции определим по закону электромагнитной индукции:

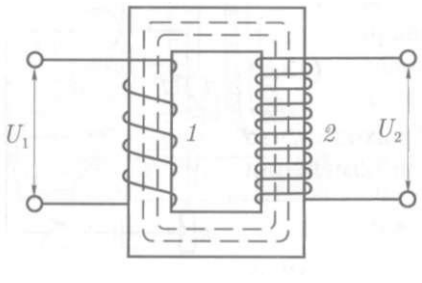


Рис. 13.6

$$\mathscr{E}_{21} = -\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t}, \qquad (13.13)$$

где $\Delta\Phi_{21}$ — поток магнитной индукции, который создается магнитным полем тока $I_1$, протекающего по контуру *1* и пронизывающего площадь поверхности, охватываемой контуром *2*.

Магнитный поток $\Phi_{21}$ прош
туру:

Коэффициент пропорцион
стъюконтуров 1ш2; Ьц 3ai
тельной магнитной проницае!
Из формул (13.7) и (13.14) т
индуктивность, т. е. в генри (

На явлении взаимной инд;
устройства, предназначенного
ного тока (см. 16.11).

## 13.4. Энергия магнитно!

**Энергия магнитного поля т**
тареи *GB,* резистора *R,* солено
*1,* то через соленоид протекае
Всякий электрический ток вс«
где локализована собственная
фуют электроны, или в магни
ответить на этот вопрос, расе»
нуть и перевести в положение
будет течь убывающий до нул
индукции, и происходит превр
разом в энергию молекулярно-
Значит, уменьшение энергии *
тока: $AW = A$. Так как собств
соленоид, пропорционален сш
на в виде, представленном на ]
соответствует элементарной р
значения на $AI$. Полная работ;
работ $AA$ и численно равна пл

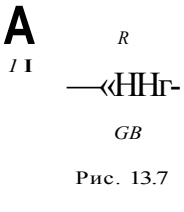


Рис. 13.7

Магнитный поток $\Phi_{21}$ пропорционален току $I_1$, протекающему по первому контуру:

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1. \qquad (13.14)$$

Коэффициент пропорциональности $L_{21}$ называют *взаимной индуктивностью контуров 1и 2;* $L_{21}$ зависит от размеров, геометрической формы, относительной магнитной проницаемости среды и взаимного расположения контуров. Из формул (13.7) и (13.14) видно, что $L_{21}$ выражается в тех же единицах, что и индуктивность, т.е. в *генри* (Гн).

На явлении взаимной индукции основано действие ***трансформатора*** — устройства, предназначенного для преобразования напряжения и силы переменного тока (см. 16.11).

## 13.4. Энергия магнитного поля

Энергия магнитного поля тока. Рассмотрим цепь (рис. 13.7), состоящую из батареи *GB,* резистора *R,* соленоида *L,* ключа *K.* Если ключ находится в положении *1,* то через соленоид протекает постоянный по значению и направлению ток $I_0$. Всякий электрический ток всегда окружен магнитным полем. Возникает вопрос: где локализована собственная энергия тока — внутри проводов, по которым дрейфуют электроны, или в магнитном поле, т. е. в среде, окружающей токи? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим, что будет происходить, если ключ разомкнуть и перевести в положение *2.* В этом случае через резистор *R* некоторое время будет течь убывающий до нуля ток, поддерживаемый возникающим током самоиндукции, и происходит превращение энергии магнитного поля тока главным образом в энергию молекулярно-теплового движения — нагревание сопротивления. Значит, уменьшение энергии магнитного поля можно вычислить как работу этого тока: $\Delta W$ = *A.* Так как собственный магнитный поток $\Phi = LI$, пронизывающий соленоид, пропорционален силе тока, то зависимость $\Phi$ от $I$ может быть изображена в виде, представленном на рис. 13.8. Площадь заштрихованной узкой полоски соответствует элементарной работе $\Delta A$, совершаемой током, при изменении его значения на $\Delta I$. Полная работа *A,* совершаемая током, равна сумме элементарных работ $\Delta A$ и численно равна площади треугольника *OAB:*

$$A = \frac{\Phi_0 I_0}{2}. \qquad (13.15)$$

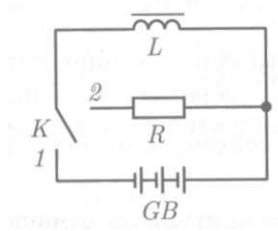



Рис. 13.7

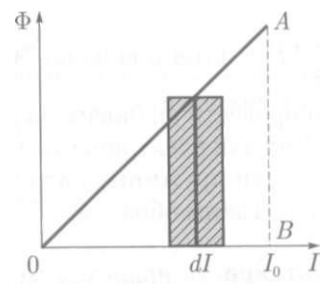



Рис. 13.8

Учитывая, что $\Phi_0 = LI_0$, формулу (13.15) можно переписать в виде

$$A = \frac{LI_0^2}{2}. \qquad (13.16)$$

В процессе совершения этой работы энергия магнитного поля уменьшается до нуля (так как ток убывает от значения $I_0$ до нуля). Поскольку при этом никаких изменений в окружающих электрическую цепь телах не происходит, следует вывод:

**магнитное поле является носителем энергии.**

Итак, собственная энергия тока равна энергии магнитного поля:

$$W_м = \frac{LI_0^2}{2}. \qquad (13.17)$$

Формула (13.17) справедлива для любого контура, она характеризует зависимость энергии магнитного поля тока от силы тока в контуре и его индуктивности.

**Объемная плотность энергии.*** Выразим энергию магнитного поля через физические величины, характеризующие его.

Рассмотрим случай бесконечно длинного соленоида, индуктивность которого определяется по формуле $L = \mu\mu_0 n^2 V$. В этом случае формула (13.17) примет вид

$$W_м = \frac{\mu\mu_0 n^2 V I^2}{2}. \qquad (13.18)$$

Учитывая, что индукция поля внутри бесконечно длинного соленоида $B = \mu\mu_0 In$, получаем

$$W_м = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V. \qquad (13.19)$$

Вследствие того что магнитное поле соленоида однородно и локализовано внутри соленоида, энергия распределена по объему соленоида с постоянной плотностью $\omega = W_м / V$. Учитывая (13.19), получим

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}. \qquad (13.20)$$

**Аналогия между электромагнитными и механическими явлениями.*** Сравнивая выражения для собственных энергий конденсатора $W_{эл} = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$ и соленоида $W_м = \frac{1}{2}LI^2$ с потенциальной $W_п = \frac{1}{2}kx^2$ и кинетической $W_к = \frac{1}{2}mv^2$ энергиями, можно провести аналогию между электромагнитными и механическими явлениями. Так, для электрического поля величина $1/C$, обратная емкости, аналогична упругости пружины, а для магнитного поля индуктивность $L$ аналогична массе тела $m$. Таким образом,

**индуктивность является мерой «инертности» контура по отношению к изменению в нем тока.**

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Явление возникновения ЭДС в проводящем контуре, находящемся в переменном магнитном поле или движущемся постоянном магнитном поле, называется *электромагнитной индукцией.* ЭДС индукции, согласно закону электромагнитной индукции, равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathscr{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Знак «минус» отражает *правило Ленца:* индукционный ток всегда направлен таким образом, что его действие противоположно действию причины, вызывающей его.

• Вихревое электрическое поле порождается переменным магнитным полем. Его силовые линии всегда замкнуты, подобно силовым линиям магнитного поля.

Сущность явления электромагнитной индукции заключается не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении вихревого электрического поля. В отличие от электростатического поля вихревое электрическое поле является непотенциальным.

• Во всех процессах, происходящих на Солнце, — вспышках, появлении пятен, протуберанцев, солнечного ветра — важнейшую роль играет магнитное поле.

• Частным случаем явления электромагнитной индукции является *самоиндукция* — возникновение ЭДС в проводящем контуре при изменении в нем силы тока:

$$\mathscr{E}_{\text{си}} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где $L$ — индуктивность, зависящая от геометрической формы, размеров контура и магнитных свойств среды, в которой он находится:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V.$$

• *Энергия магнитного поля*

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}.$$

• *Объемная плотность энергии* магнитного поля

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

• Сравнивая выражения

$$W_{\text{эл}} = \frac{Q^2}{2C} \quad \text{и} \quad W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$$

для энергии электрического и магнитного полей с потенциальной и кинетической энергией

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} \quad \text{и} \quad W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2},$$

можно провести аналогию между электромагнитными и механическими явлениями.

Для электрического поля величина $1/C$ аналогична упругости пружины $k$, а для магнитного поля индуктивность $L$ аналогична массе тела $m$.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Что называют явлением электромагнитной индукции? 2. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. 3. В чем заключается правило Ленца? **4.** Расскажите о вихревом электрическом поле. 5. Какие токи называют вихревыми? 6. Что называют явле-

нием самоиндукции? **7.** Что такое индуктивность контура? От чего она зависит? **8.** Как распределена энергия магнитного поля соленоида в пространстве?

### Примеры решения задач

• Задача **1.** В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл расположена прямоугольная рамка *KLMN,* подвижная сторона которой *LM* перемещается со скоростью 10 м/с перпендикулярно линиям индукции поля (рис. 13.9). Определить ЭДС индукции, возникающую в контуре *KLMN.* Определить направление индукционного тока. Длина стороны рамки *LM* равна 0,1 м.

Дано: $v = 10$ м/с; $l = 0{,}1$ м; $B = 0{,}1$ Тл.

Найти: $\mathscr{E}$.

Решение. При движении проводника *LM* площадь рамки увеличивается, магнитный поток, пронизывающий рамку, возрастает и, следовательно, согласно закону Фарадея, в рамке возникает ЭДС индукции

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Рамку пронизывает магнитный поток

$$\Phi = BS = Blx. \qquad (2)$$

При движении проводника *LM* изменяется *x,* а *B* и *l* остаются постоянными. Учитывая это, подставим выражение **(2)** в формулу (1):

$$\mathscr{E} = -Bl\frac{\Delta x}{\Delta t}. \qquad (3)$$

Но $\Delta x/\Delta t = v$ — скорость движения проводника *LM;* следовательно,

$$\mathscr{E} = -Blv.$$

**Вычисления:**

$$\mathscr{E} = -0{,}1 \text{ Тл} \cdot 0{,}1 \text{ м} \cdot 10 \text{ м/с} = -0{,}1 \text{ В}.$$

**Анализ.** Знак «минус» показывает, что ЭДС индукции действует в контуре *KLMN* в таком направлении, при котором индукционный ток направлен в контуре против часовой стрелки.

**Ответ:** $\mathscr{E} = -0{,}1$ В.

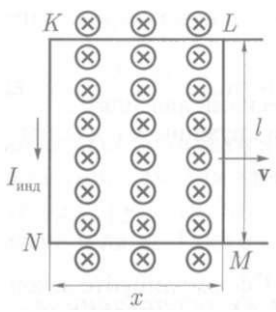



Рис. 13.9

• **Задача 2.** Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром 0,5 мм имеет длину 0,6 м и площадь поперечного сечения 0,006 м². Определить силу тока, текущего по обмотке при напряжении 10 В, если за 0,001 с в обмотке выделяется количество теп-

**Дано:** $d = 0{,}5$ мм $= 5 \cdot 10^{-4}$ м; $l = 0{,}6$ м; $S = 0{,}006$ м²; $U = 10$ В; $t = 0{,}001$ с; $\mu = 1$; $\mu_0 = 12{,}6 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

**Найти:** $I$.

**Решение.** При прохождении тока $I$ при напряжении $U$ в обмотке за время $t$ выделится теплота

$$Q = IUt. \quad (1)$$

Энергия поля внутри соленоида [см. **(13.17)]**

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (2)$$

индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 n^2 V = \mu_0 lS, \quad (3)$$

где $S$ — сечение; $l$ - длина соленоида; $n = \frac{N}{l} = \frac{N}{Nd} = \frac{1}{d}$ — плотность витков соленоида; $N$ — число витков; $d$ — диаметр проволоки.

Если витки плотно прилегают друг к другу, то $l = Nd$. Подставив в **(2)** выражения для $L$ и приравняв по условию правые части **(1)** и **(2),** получим

$$IUt = \frac{\mu\mu_0 I^2 Sl}{2d^2}.$$

Откуда

$$I = \frac{2Utd^2}{\mu\mu_0 Sl}.$$

**Вычисления:**

$$I = \frac{2 \cdot 10\ \text{В} \cdot 0{,}001\ \text{с} \cdot 25 \cdot 10^{-8}\ \text{м}^2}{1 \cdot 12{,}6 \cdot 10^{-7}\ \text{Гн/м} \cdot 0{,}006\ \text{м}^2 \cdot 0{,}6\ \text{м}} = 1{,}1\ \text{А}.$$

**Ответ:** $I = 1{,}1$ А.

## Задачи для самостоятельного решения

**1.** В однородном магнитном поле индукцией $6 \cdot 10^{-3}$ Тл движется проводник длиной 15 м со скоростью $10^{-4}$ м/с перпендикулярно полю и самому себе. Определить ЭДС, индуцируемую в проводнике.

**2.** В однородном магнитном поле индукцией $5 \cdot 10^{-3}$ Тл (воздух) со скоростью 20 м/с перпендикулярно полю перемещается прямой провод длиной 40 см и сопротивлением 10 Ом. Какой ток пошел бы по проводнику, если бы его замкнули? (Влияние замыкающего провода не учитывать.)

3. С какой скоростью движется перпендикулярно однородному магнитному полю индукцией $6{,}3 \cdot 10^{-4}$ Тл ($\mu = 1$) прямой проводник длиной 30 см и сопротивлением 0,1 Ом? При замыкании проводника в нем пошел бы ток 0,01 А. (Влияние замыкающего провода не учитывать.)

4. Проводник длиной 50 см, по которому течет ток 1 А, движется перпендикулярно магнитному полю индукцией $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Тл ($\mu = 1$) соскоростью50км/ч. Определить работу перемещения проводника за 1 ч движения.

5. Проводник длиной 0,6 м, сопротивлением 0,025 Ом движется поступательно в плоскости, перпендикулярной магнитному полю с индукцией $5 \cdot 10^{-3}$ Тл. По проводнику течет ток 4 А. Скорость движения проводника 0,8 м/с. Какая мощность больше: затраченная на перемещение проводника в магнитном поле или на его нагревание? во сколько раз?

**Ключевые слова:** *электромагнитная индукция, закон Фарадея, ЭДС индукции, самоиндукция, индуктивность.*

РАЗДЕЛ IV

# КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Данный раздел посвящен широкому кругу вопросов, связанных с колебаниями и волнами. Учение о колебаниях и волнах в физике выделяют особо. Это обусловлено общностью закономерностей колебательных процессов различной природы и методов их исследования. Механические, акустические, электромагнитные колебания и волны рассматриваются с единой точки зрения.

Колебания свойственны всем явлениям природы: пульсируют звезды, вращаются планеты Солнечной системы, в земной атмосфере и ионосфере циркулируют потоки заряженных и нейтральных частиц, ветры возбуждают колебания и волны на поверхности водоемов. Внутри любого живого организма непрерывно происходят ритмично повторяющиеся процессы, например биение сердца.

Наиболее важные и часто встречающиеся виды волн — упругие волны, частным случаем которых является звук; волны на поверхности жидкости; электромагнитные волны.

Основное свойство всех волн независимо от их природы состоит в том, что волны осуществляют перенос энергии без переноса вещества.

Большую роль играет теория колебательных процессов при расчетах на прочность мостов, отдельных видов машин, летательных аппаратов.

Акустика, электро-, радиотехника, оптика и другие разделы науки и техники базируются на учении о колебаниях и волнах, поэтому их изучение имеет большое значение.



Дж. Максвелл

**Историческая справка.** Гипотеза английского физика Дж. Максвелла (1831 -1879) об электромагнитной природе света была экспериментально подтверждена более чем через 20 лет немецким физиком Г. Герцем (1857- 1894) и русским физиком **П.Н**.Лебедевым (1866-1912). Г.Герц доказал, что с помощью электромагнитных волн можно наблюдать известные эффекты оптики (преломление, отражение и т.д.).

**П.Н**.Лебедев обнаружил и измерил давление света на твердые тела ( 1899) и газы (1907). Опыты Лебедева продолжили русские ученые А. А. Глаголева-Аркадьева и М. А. Левицкая.

Электромагнитные волны нашли широкое применение в технике связи: телеграф (1831), телефон (1876), радио (1896).

Глава 14

# МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

## 14.1. Колебательное движение

**Периодическое движение.** ***Колебательными движениями*** называют движения или процессы, точно или приблизительно повторяющиеся через равные промежутки времени. Среди них важную роль играют периодические движения.

Движение называют ***периодическим,*** если значения физических величин (например, смещения или скорости), изменяющиеся в процессе движения, повторяются через равные промежутки времени.

Примерами периодического движения могут служить движение планет вокруг Солнца, движение поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания и др.

Колебательную систему вне зависимости от ее физической природы называют ***осциллятором.*** Примером осциллятора является колеблющийся груз, подвешенный на пружине или нити.

***Полным колебанием*** называют один законченный цикл колебательного движения, после которого оно повторяется в том же порядке.

**Характеристики колебательного движения.** ***Период колебаний*** $T$ — время, в течение которого совершается одно полное колебание.

Единица периода — секунда (с).

***Частота периодических колебаний*** $\nu$ — величина, показывающая число полных колебаний, совершаемых за единицу времени. Частота — величина обратная периоду:

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (14.1)$$

Единица частоты — ***герц*** (Гц).

**1** Гц — это частота колебаний, период которых равен **1** с **(1** Гц = **1** с"[1]).

***Циклической,*** или ***круговой, частотой*** периодических колебаний называется число полных колебаний, совершаемых за время **2тс** секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \qquad (14.2)$$

Циклическую частоту $\omega$ выражают в ***радианах на секунду*** (рад/с).

Для тела характерно существование некоторого положения, называемого положением ***устойчивого равновесия,*** в котором тело или точка может находиться до тех пор, пока внешняя сила не выведет его из этого состояния. Осуществить это можно за счет работы внешней силы, сообщив телу избыточную энергию. Тело, выведенное из состояния равновесия и предоставленное самому себе, совершает колебания около положения равновесия — такие колебания называют ***собственными,*** или ***свободными.***

Любое колебательное движение характеризуется ***амплитудой*** $A$ — значением максимального отклонения колеблющейся точки от положения равновесия.

Колебания точки, происходящие с постоянной амплитудой, называют ***незатухающими,*** с постепенно уменьшающейся амплитудой — ***затухающими.***

## 14.2. Гармонические колебания

**Гармонические колебания.** Гармонические колебания — это простейшие периодические колебания. Большинство колебаний, встречающихся на практике, являются сложными. Из курса математики известно (теорема Фурье), что любое сложное периодическое колебание представляет собой сумму простейших гармонических колебаний (гармоник).

***Гармонические колебания* — единственный тип колебаний, форма которых не искажается при воспроизведении.**

*Гармоническими являются колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса или косинуса.*

Гармонические колебания величины $s$ описываются уравнением

$$s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{14.3}$$

где $A$ — амплитуда (так как синус изменяется в пределах от **+1** до — 1, то $s$ может принимать значение от $+A$ до $-A$); $\omega_0$ — циклическая частота.

Аргумент синуса $(\omega_0 t + \varphi_0)$ называют ***фазой колебаний.*** Фаза колебания определяет значение $s$ в момент времени $t$ В момент начала отсчета ($t$ = 0) фаза равна ***начальной фазе*** $\varphi_0$

*Фаза колебаний представляет собой угловую меру времени, прошедшего от начала колебаний.*

Если начальная фаза колебаний $\varphi_0$ = 0, то фазе $\varphi = 2\pi$ соответствует $t$ = T, фазе $\pi/2 - T/4$ и т.д. (рис. 14.1).

**Метод векторных диаграмм.** Гармоническое колебание можно представить с помощью вектора, длина которого равна амплитуде колебания $A$, а направление образует с осью $X$ угол, равный начальной фазе колебания. Если привести этот вектор во вращение с угловой скоростью (циклической частотой) $\omega_0$, то проекция конца вектора на ось $X$ будет перемещаться в пределах от $+A$ до $-A$.

Пусть точка $M$ равномерно движется по окружности радиуса $A$ против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью $\omega_0$ (рис. 14.2, *а*). Если в начальный момент времени $t$ = 0 эта точка занимала положение $M_0$ и ее начальная фаза была равна нулю, то через время $t$, совершив угловое перемещение $\omega_0 t$, она придет в положение $M$. Проекция точки $M$ на ось $X$ составит

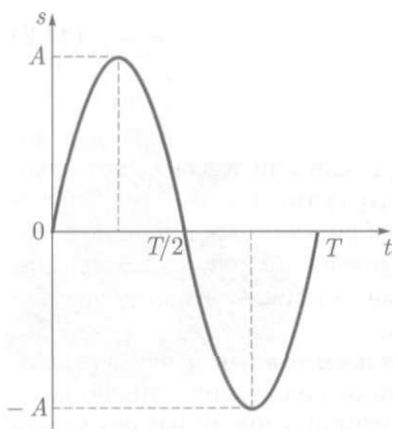


Рис. 14.1

$$s = A \sin \omega_0 t. \tag{14.4}$$

Из этого уравнения следует, что при вращении точки $M$ по окружности проекция ее радиуса, вектора А на ось $X$ совершает гармонические колебания около точки 0 (рис. 14.2, *б*).

**Скорость колебания.** Проекция вектора линейной скорости $v_0$ точки $M$ на ось $X$ (см. рис 14.2, *а*)

$$v_x = v_0 \cos \omega_0 t.$$

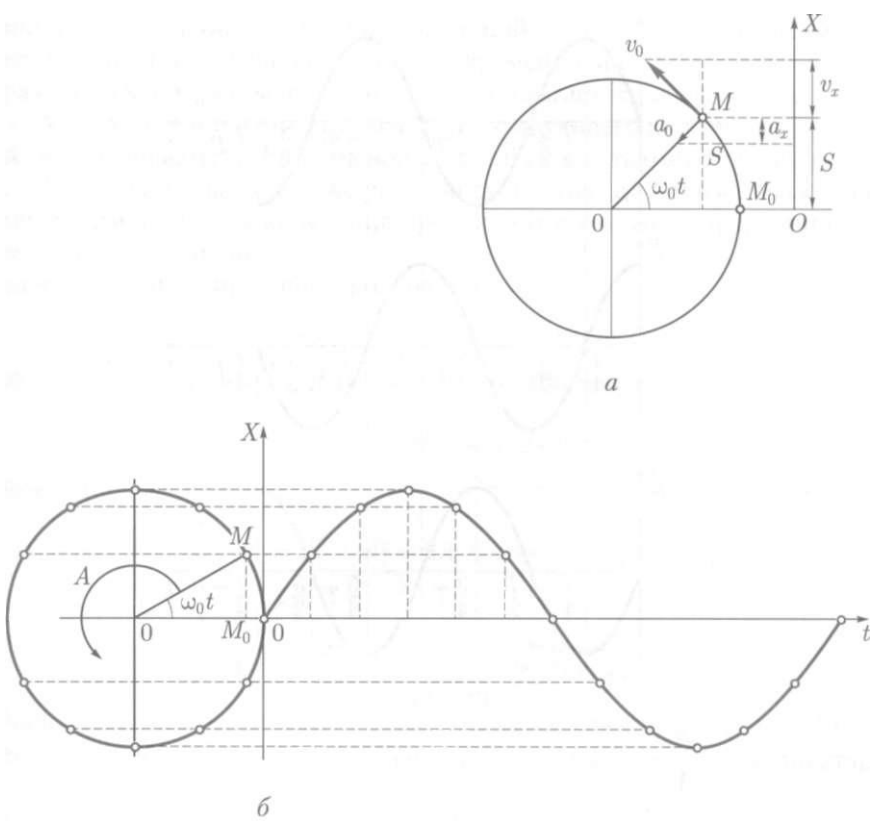



Рис. 14.2

Между линейной $v_0$ и угловой $\omega_0$ скоростями существует следующая связь:

$$v_0 = A\omega_0,$$

где $A$ — радиус окружности, поэтому

$$v_x = A\omega_0 \cos \omega_0 t. \tag{14.5}$$

Учитывая, что $\cos \omega_0 t = \sin(\omega_0 t + \pi/2)$, уравнение (14.5) можно переписать в виде

$$v_x = A_0\omega_0 \sin(\omega_0 t + \pi/2). \tag{14.6}$$

Из уравнений (14.4 и 14.6) следует, что:

• *скорость колеблющейся точки М изменяется, как и смещение, по синусоидальному закону, причем максимальное значение* $v_{\max} = A\omega_0$ *скорость достигает при* $\sin(\omega_0 t + \pi/2) = 1$;

• *смещение s и скорость* $v_x$ *сдвинуты по фазе на* $\pi/2$;

• *скорость достигает максимального значения в те моменты времени, когда смещение s* **= 0.**

**Ускорение.** Проекция вектора центростремительного ускорения $a_0$ на ось $X$ (см. рис. 14.2, *а)*

$$a_x = a_0 \sin \omega_0 t. \tag{14.7}$$

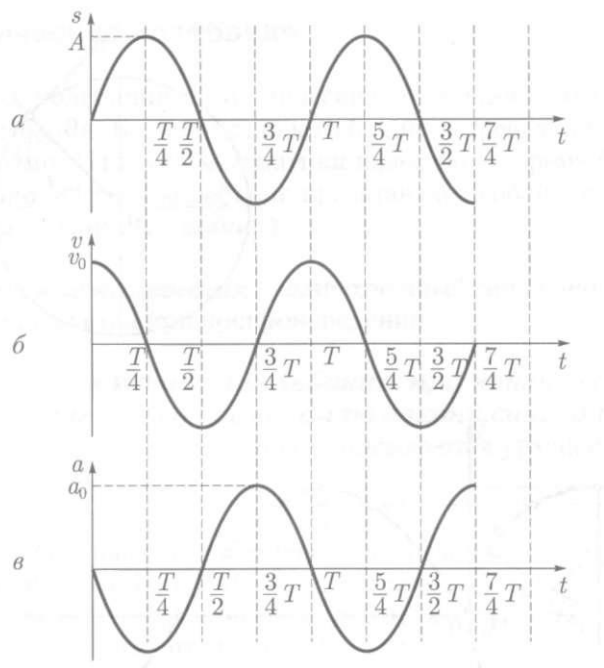



Рис. 14.3

Подставив $a_0 = \dfrac{v_0^2}{A} = \omega_0^2 A$ в (14.7), получим

$$a_x = -A\omega_0^2 \sin \omega_0 t. \tag{14.8}$$

Ускорение колеблющейся точки также изменяется по синусоидальному закону. Максимальное значение $a_{\max} = -\omega_0^2 A$ ускорение достигает в моменты времени, когда $\sin \omega_0 t = 1$. Учитывая (14.4), формулу (14.8) можно переписать в виде

$$a_x = -\omega_0^2 s. \tag{14.9}$$

*Знак «минус» в уравнении (14.9) означает, что ускорение колеблющейся точки направлено в сторону, противоположную смещению, и всегда к положению равновесия. Ускорение и смещение изменяются в противофазе.*

На рис. 14.3 представлены графические зависимости смещения $s$, скорости $v$ и ускорения $a$ от времени $t$ при условии, что начальная фаза колебания $\varphi_0$ равна нулю. Из рисунка видно, что скорость достигает максимального значения $v_0$, когда колеблющаяся точка проходит положение равновесия. В этот момент смещение $s$ и ускорение $a$ равны нулю.

**Биения.*** Рассмотрим сложение колебаний одного направления и одинаковой частоты, но различающихся амплитудами и начальной фазой. Пусть тело одновременно участвует в двух гармонических колебаниях, происходящих, например, вдоль оси $X$:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1), \\ x_2 &= A_2 \sin(\omega_0 t + \varphi_2). \end{aligned} \tag{14.10}$$

Выполним сложение с помощью векторной диаграммы. Изобразим положение векторов $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$ в начальный момент времени (рис 14.4) Углы между этими векторами и осью $X$ равны начальным фазам слагаемых колебаний $\varphi_1$ и $\varphi_2$. Вектор $\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2$ является амплитудой результирующего колебания. Так как векторы $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$ вращаются с одинаковой угловой скоростью $\omega_0$, то их сумма — вектор $\mathbf{A}$ — будет вращаться с той же угловой скоростью $\omega_0$. Таким образом, результирующее гармоническое колебание происходит в том же направлении и совершается с той же частотой.

Уравнение результирующего колебания будет:

$$x = x_1 + x_2 = A\sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Результирующую амплитуду определим по теореме косинусов:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2\cos\alpha,$$

где $\alpha = \pi - (\varphi_1 - \varphi_2)$:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

или

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}. \qquad (14.11)$$

Начальная фаза $\varphi$ результирующего колебания, как следует из рис. 14.4, определяется следующим образом:

$\operatorname{tg}\varphi = \dfrac{CB}{OB}$; так как $CB = A_y$, $OB = A_x$, то $\operatorname{tg}\varphi = \dfrac{A_y}{A_x}$.

Учитывая, что проекция суммы векторов на какую-либо ось равна сумме проекций слагаемых на ту же ось, т. е.

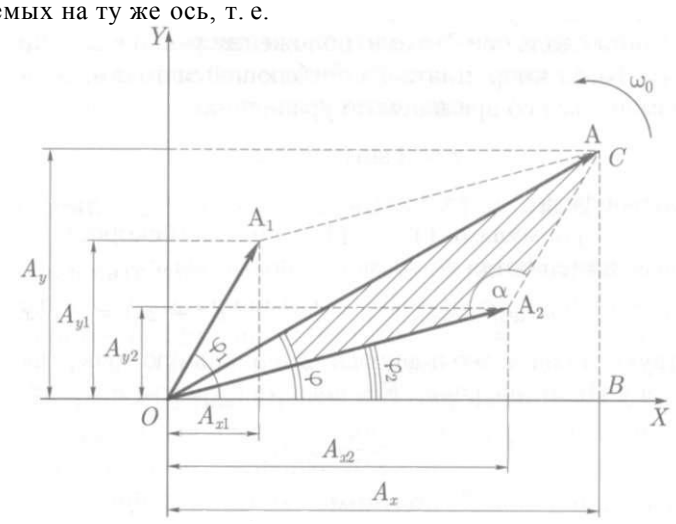



Рис. 14.4

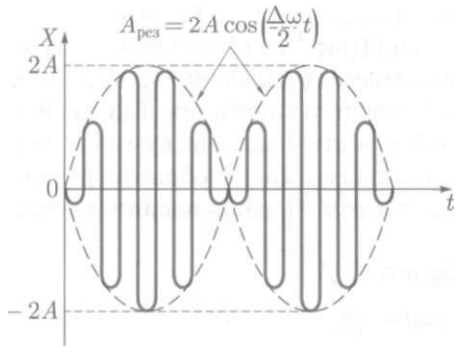



Рис. 14.5

$$A_x = A_{x1} + A_{x2} = A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2;$$
$$A_y = A_{y1} + A_{y2} = A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2,$$

найдем

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2}, \qquad (14.12)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2}\right). \qquad (14.13)$$

Частные случаи сложения колебаний:

• $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi n$, где $n$ — **0, 1, 2,** ... Тогда $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 1$ и, как следует из формулы **(14.11)**, $A$ — $A_1$ + Л$_2$;

• $\varphi_1 - \varphi_2 = (2n+1)\pi$, где $n$ = **0, 1, 2,** ... Тогда $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = -1$, и, как следует из формулы **(14.11)**, $A = |A_1 - A_2|$. Если $A_1 = A_2$, то $A$ = **0**.

При сложении двух гармонических колебаний одного направления, но мало различающихся по частоте $(\Delta\omega)$ результирующее колебание происходит с амплитудой, изменяющейся периодически от некоторого максимального значения до нуля:

$$A_{рез} = 2A\cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right). \qquad (14.14)$$

Колебания такого вида называют ***биениями*** (рис. **14.5**).

## 14.3. Свободные механические колебания

**Квазиупругие силы.** Пусть материальная точка массой m совершает гармонические колебания вдоль оси $X$ около положения равновесия, принятого за начало координат. Тогда координата $x$ колеблющейся точки, согласно формуле **(14.3)**, будет изменяться со временем по уравнению

$$x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $\varphi_0$ — начальная фаза.

В соответствии с формулами **(14.5)**, **(14.8)** и **(14.9)** скорость и ускорение материальной точки изменяются со временем по законам:

$$v = A\omega_0\cos(\omega_0 t + \varphi_0);\ a = -A\omega_0^2\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 x.$$

Сила, действующая на колеблющуюся материальную точку массой то, согласно второму закону Ньютона, равна $F = m\,a$, или с учетом $a = -\omega_0^2 x$,

$$F = -m\omega_0^2 x.$$

Введя обозначение $k = m\omega_0^2$, получим

$$F = -kx. \qquad (14.15)$$

Из уравнения (14.15) видим, что эта сила подобно упругой силе (см. закон Гука) пропорциональна смещению материальной точки относительно положения равновесия и направлена к положению равновесия.

Силы, неупругие по природе, но аналогичные по свойствам силам, возникающим при малых деформациях, называют ***квазиупругими силами.***

Механические колебания совершаются под действием упругих или квазиупругих сил.

Свободные колебания. Для тел характерно существование некоторого положения, называемого положением устойчивого равновесия, в котором тело или материальная точка может находиться до тех пор, пока внешняя сила не выведет их из этого состояния.

***Свободными (собственными) колебаниями*** называют колебания, которые происходят в системе, представленной самой себе после того, как она была выведена из положения равновесия.

Свободные колебания совершаются в колебательной системе без внешнего воздействия за счет первоначально сообщенной энергии.

Свободные колебания являются гармоническими

$$x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{14.16}$$

где $A$ и $\varphi_0$ — произвольные постоянные, для определения которых необходимо знать начальные условия; $\omega_0$ — собственная циклическая частота, которая зависит от параметров колебательной системы.

Каждое колебание характеризуется определенными значениями амплитуды $A$ и начальной фазы $\varphi_0$. Тело данной массы $m$, находясь под действием одной и той же силы $F = -kx$, может совершать колебания с различными амплитудами и начальными фазами в зависимости от начальных условий. Но период колебания всегда остается одним и тем же:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \tag{14.17}$$

Свободные колебания являются не только самыми распространенными, но и самыми важными в теории колебаний, так как условия возникновения других колебаний существенно зависят от их характера.

## 14.4. Линейные механические колебательные системы

**Линейная** колебательная **система.** ***Линейные колебательные системы —*** системы, в которых происходят колебания в малых окрестностях около положения равновесия. Линейные системы являются идеализацией реальной системы. Примерами линейных колебательных систем могут служить:

• маятник в поле силы тяжести при небольших амплитудах колебания;

• пружинный маятник при растяжениях, для которых выполняется закон Гука;

• элементарный колебательный контур, индуктивность, емкость и сопротивление которых не зависят от протекающих по ним токов.

Параметры линейной колебательной системы, определяющие физические свойства системы, в ходе процесса не изменяются. Различные по своей природе

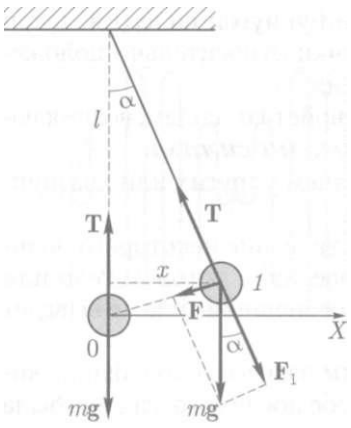



Рис. 14.6

линейные системы часто описываются идентичными уравнениями, что позволяет изучать общие свойства линейных колебательных систем и развивать общую теорию колебаний и волн.

Математический маятник. ***Математический маятник*** — идеализированная система, представляющая собой материальную точку массой то, подвешенную на тонкой, невесомой и нерастяжимой нити длиной $l$ (рис. 14.6). В положении равновесия 0 сила тяжести mg материальной точки уравновешивается натяжением **T** нити. На материальную точку, находящуюся в положении *1* (угол отклонения $\alpha$ мал настолько, что $\alpha \approx \sin\alpha$), действует возвращающая сила $F = -mg\sin\alpha$, которая является составляющей силы тяжести. Знак «минус» указывает на то, что сила направлена в сторону, противоположную смещению.

Так как $\alpha \approx \alpha \approx x/l$, то возвращающая сила

$$F = -\frac{mg}{l}x,$$

откуда

$$F = ma_x = -\frac{mg}{l}x, \text{ или } a_x = -\frac{g}{l}x.$$

Сила $F$ пропорциональна смещению $x$ и направлена к положению равновесия, следовательно, под действием этой силы материальная точка будет совершать гармонические колебания. При этом проекция ускорения колеблющейся материальной точки пропорциональна его смещению, взятому с противоположным знаком [см. формулу (14.9)]:

$$a_x = -\omega_0^2 x.$$

Следовательно,

$$-\frac{g}{l}x = -\omega_0^2 x.$$

Откуда следует, что

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \qquad (14.18)$$

По формуле (14.17) определим ***период колебаний математического маятника***

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (14.19)$$

*Период колебаний математического маятника не зависит от его массы и амплитуды колебаний, он пропорционален корню квадратному из длины маятника и обратно пропорционален корню квадратному из ускорения свободного падения.*

Таким образом, малые колебания математического маятника $(\alpha \approx \sin\alpha)$ являются свободными гармоническими колебаниями.

Математический маятник — наиболее простой и в то же время точный прибор для определения ускорения свободного падения.

Как следует из формулы (14.19),

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T_0^2}.$$

Пружинный маятник. ***Пружинный маятник*** — груз массой $m$, подвешенный на абсолютно упругой пружине (рис. 14.7). В положении равновесия упругая сила Г уравновешивает силу тяжести mg.

Если тело вывести из положения равновесия, а затем отпустить, то оно будет совершать гармоническое колебательное движение под действием упругой силы

$$F = -kx,$$

где k — жесткость пружины.

Запишем уравнение движения этого тела согласно второму закону Ньютона

$$ma_x = -kx,$$

откуда

$$a_x = -\frac{k}{m}x, \qquad (14.20)$$

т.е. проекция ускорения колеблющегося тела пропорциональна его смещению, взятому с противоположным знаком.

Колебания пружинного маятника являются свободными гармоническими колебаниями.

Согласно формуле (14.9),

$$a_x = -\omega_0^2 x,$$

следовательно,

$$-\omega_0^2 x = -\frac{k}{m}x,$$

или

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \qquad (14.21)$$

По формуле (14.18) определим ***период колебаний пружинного маятника***

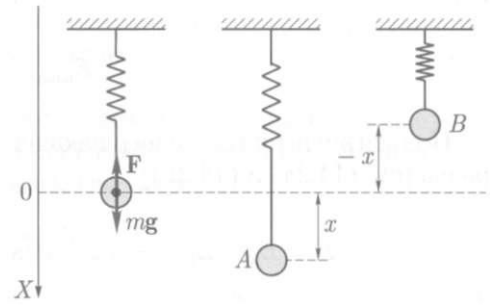



Рис. 14.7

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (14.22)$$

*Период колебаний пружинного маятника зависит от массы колеблющегося тела и жесткости пружины.*

## 14.5. Превращение энергии при колебательном движении

Определим энергию колеблющегося тела, например материальной точки массой $m$.

Потенциальная энергия измеряется работой силы, вызывающей смещение $\boldsymbol{x}$, т. е. выводящей тело, совершающее гармоническое колебательное движение, из положения равновесия. Эта сила равна возвращающей силе $\boldsymbol{F}$ и противоположна ей по направлению. Тогда потенциальная энергия [см. (3.10)] будет

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}. \qquad (14.23)$$

Но $k = m\omega_0^2$, а $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ (рис. 14.8, *а*), поэтому потенциальная энергия тела, совершающего гармоническое колебательное движение, будет равна (рис. 14.8, *б*)

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0), \qquad (14.24)$$

откуда следует, что максимальное значение потенциальной энергии

$$E_{\text{п max}} = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2. \qquad (14.25)$$

Так как скорость колеблющегося тела $v = \omega A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, то его кинетическая энергия будет равна (рис. 14.8, *в*)

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \qquad (14.26)$$

Из уравнения (14.26) следует, что максимальное значение кинетической энергии

$$E_{\text{к max}} = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2. \qquad (14.27)$$

Полная энергия тела, совершающего гармоническое колебательное движение, равна [см. (14.24) и (14.26)]

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{1}{2} m{\omega_0}^2 A^2 \left[\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)\right],$$

но $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$, поэтому

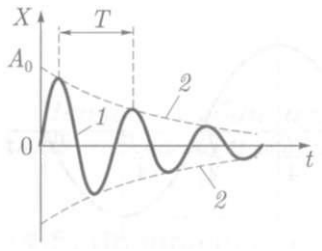


Рис. 14.9

Затухающие колебания описываются уравнением

$$x = A_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0). \qquad (14.31)$$

Из (14.31) следует, что колебание совершается с амплитудой

$$A = A_0 e^{-\delta t}, \qquad (14.32)$$

убывающей с течением времени по экспоненциальному закону (рис. 14.9), и частотой

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \qquad (14.33)$$

где $\delta$ — коэффициент затухания, равный

$$\delta = \frac{r}{2m}. \qquad (14.34)$$

Коэффициент затухания зависит от коэффициента сопротивления r и массы $m$ колеблющегося тела.

Из (14.33) следует, что колебания возможны, если $\delta \ll \omega_0$. Затухание нарушает периодичность колебаний, поэтому они уже не являются периодическим процессом и к ним неприменимо понятие периода или частоты. Однако если затухание мало, то можно условно пользоваться понятием периода как промежутка времени между двумя последующими максимумами колеблющейся физической величины (см. рис. 14.9). Здесь зависимость (14.31) изображена линией *1*, азависимость (14.32) — линией ***2.*** Период затухающих колебаний равен

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \qquad (14.35)$$

При $\delta \ll \omega_0$ период $T = T_0$. Быстроту затухания колебаний характеризует ***логарифмический декремент затухания*** $\Theta$ — натуральный логарифм отношений амплитуд двух последовательных колебаний, соответствующих промежутку времени в один период:

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T. \qquad (14.36)$$

Промежуток времени $\tau = 1/\delta$, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз, называют *ВРЕМЕНЕМ* ***релаксации.***

Тогда выражение для логарифмического декремента затухания имеет вид

$$\Theta = \frac{T}{\tau} \quad \text{или} \quad \Theta = \frac{1}{N}. \qquad (14.37)$$

Логарифмический декремент затухания — величина, обратная числу колебаний *N,* по истечении которых амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

**Автоколебания.** В реальных колебательных системах совершаются затухающие колебания. Если восполнять потери энергии реальной колебательной системы, то колебания станут незатухающими. Особенно важны и широко приме-

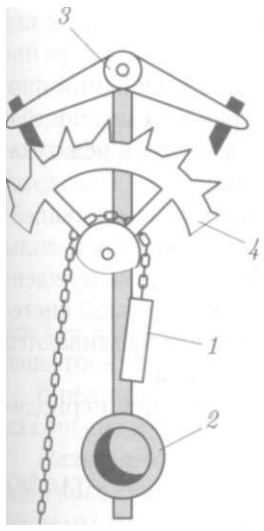



Рис. 14.10




Рис. 14.11

няются *автоколебания* – незатухающие колебания, поддерживаемые в колебательной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой.

Рассмотрим систему, которая состоит из источника энергии, тела, способного совершать эти колебания, и устройства, осуществляющего передачу энергии от источника к телу. Эта система способна регулировать поступление энергии к колеблющемуся телу для компенсации потерь на трение, джоулеву теплоту, излучение и т.д. Примером такой системы являются часы с маятником (рис. 14.10). Здесь отчетливо выделяются три основных элемента. Источником энергии служит пружинный или гиревой завод *1*. Колеблющейся системой является маятник *2* или балансир (колесико с пружиной), и, наконец, устройством, регулирующим поступление энергии от источника к телу, — анкерный ход *3*. Система обладает определенным запасом энергии — потенциальной энергией гири, или энергией сжатой пружины. Гиря приводит в движение храповое колесо *4*- Анкерное устройство (планка, выполненная в виде якоря) жестко связано с маятником и управляет вращением храпового колеса, которое своими зубьями упирается то в левый, то в правый выступ анкерного устройства. При этом маятник получает импульс то в одну сторону, то в другую, открывая или закрывая при этом доступ энергии от источника. В результате происходят незатухающие колебания маятника (ход часов) с частотой, практически равной частоте его свободных колебаний, при условии, что трение в системе мало. Системы, подобные рассмотренной, называют *автоколебательными.* Примером таких систем являются органная труба, скрипичная струна при равномерном движении смычка, электрический звонок с прерывателем, генератор незатухающих колебаний.

Автоколебательная система состоит из следующих основных частей: колебательной системы; источника энергии, за счет которого пополняется энергия в колебательной системе; клапана — устройства, регулирующего поступления энергии в колебательную систему определенными порциями; обратной связи, с помощью которой колебательная система управляет клапаном (рис. 14.11).

## 14.7. Вынужденные механические колебания

Амплитуда вынужденных колебаний. Рассмотренные ранее колебания происходили с собственной частотой $\omega_0$, определяемой параметрами самой колебательной системы. Чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, необходимо компенсировать потери энергии.

Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют ***вынужденными колебаниями.*** За счет внешней силы периодически компенсируются потери энергии системы. Характер вынужденных колебаний определяется как внешней силой, так и свойствами самой системы. По прошествии некоторого промежутка времени в системе устанавливаются вынужденные колебания с частотой, равной частоте внешней силы.

Пусть вынужденные колебания возникают под действием внешней периодически изменяющейся силы

$$F_{\text{вн}} = F_0 \sin \omega t, \tag{14.38}$$

где $F_0$ — амплитуда вынуждающей силы; $\omega$ — циклическая частота.

Определим амплитуду вынужденных колебаний, считая, что затухание отсутствует. В этом случае на тело массой $m$ действуют сила $F_{\text{вн}}$ и квазиупругая сила $F = -kx$. В соответствии со вторым законом Ньютона:

$$ma = F_{\text{вн}} - kx, \tag{14.39}$$

учитывая, что $a = -\omega^2 x$, а $k = m\omega_0^2$, получим

$$-m\omega^2 x = F_0 \sin \omega t - m\omega_0^2 x,$$

или

$$xm(\omega_0^2 - \omega^2) = F_0 \sin \omega t,$$

откуда

$$x = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \sin \omega t.$$

Полученное выражение можно переписать в виде

$$x = A \sin \omega t, \tag{14.40}$$

где

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \tag{14.41}$$

— ***амплитуда вынужденных колебаний.***

**Резонанс.** Анализируя выражение (14.41), можно сделать вывод, что чем меньше разность $(\omega_0^2 - \omega^2)$, тем больше амплитуда вынужденных колебаний.

С приближением частоты $\omega$ вынуждающей силы к частоте собственных колебаний $\omega_0$ колебательной системы амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. В идеальных колебательных системах (отсутствуют силы сопротивле-

ния и трения) амплитуда вынужденных колебаний при $\omega = \omega_0$ максимальна и стремится к бесконечности. Реальные колебательные системы характеризуются *коэффициентом затухания* Ь.

Коэффициент затухания механической колебательной системы

$$\delta = \frac{k}{2m}, \qquad (14.42)$$

где *к* — коэффициент трения; *m* — масса колеблющегося тела.

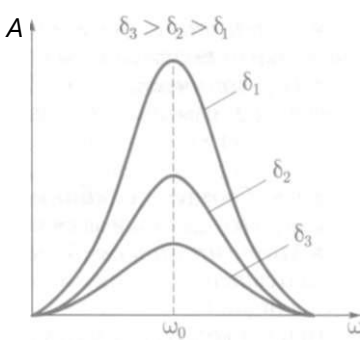


Рис. 14.12

В реальных колебательных системах амплитуда конечна и достигает наибольшего значения при частоте, несколько меньшей $\omega_0$.

***Резонанс*** **—** явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, когда частота колебаний $\omega$ приближается к частоте собственных колебаний системы $\omega_0$.

На рис. 14.12 приведены резонансные кривые для различных коэффициентов затухания, откуда видно, что с увеличением коэффициента затухания кривые становятся более пологими.

Явление механического резонанса впервые было описано Г. Галилеем. Механический резонанс может быть как полезным, так и вредным. Явление резонанса используется в вибромашинах, работающих в горнодобывающей области, в электро- и радиотехнике. Вредное действие резонанса связано с разрушениями, которые он может вызвать. Чтобы предотвратить нежелательные последствия резонанса, необходимо при конструировании различных сооружений и машин учитывать даже небольшие периодически действующие силы и вибрации или использовать успокоители колебаний, основанные на явлении антирезонанса.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Колебательными движениями* называют движения или процессы, точно или приблизительно повторяющиеся через одинаковые промежутки времени.

• *Полным колебанием* называют один законченный цикл колебательного движения, после которого оно повторяется в том же порядке.

• *Положение устойчивого равновесия* — это положение, в котором тело (материальная точка) может находиться до тех пор, пока внешняя сила не выведет его из этого состояния.

• *Период колебаний* *Т*— время, в течение которого совершается полное колебание.

• *Частота периодических колебаний* $\nu$ — число полных колебаний, совершаемых за единицу времени:

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

• *Циклическая, или круговая, частота* периодических колебаний $\omega$ — число полных колебаний, совершаемых за время $2\pi$ секунд:

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

Единица циклической частоты — радиан в секунду (рад/с)

• *Амплитуда A* — значение максимального отклонения колеблющейся материальной точки от положения равновесия.

• *Гармонические колебания* — колебания, при которых колеблющаяся величина со временем изменяется по закону синуса (косинуса):

$$x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

• *Свободные колебания* — колебания, совершаемые в колебательной системе без внешнего воздействия за счет первоначально сообщенной энергии.

• *Математический маятник* — идеализированная система, представляющая собой материальную точку массой m, подвешенную на тонкой, невесомой и нерастяжимой нити длиной $l$.

Период колебаний математического маятника не зависит от его массы и амплитуды колебаний, а зависит от длины маятника $l$ и ускорения свободного падения $g$:

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

• *Пружинный маятник* — груз массой *m,* подвешенный на абсолютно упругой пружине.

Период колебаний пружинного маятника зависит от массы колеблющегося тела $T$ и жесткости пружины $K$:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

• При колебательном движении происходит превращение энергии потенциальной в кинетическую и наоборот:

$$E = E_{\text{к max}} = E_{\text{п max}} = \frac{1}{2}m\omega^2 A.$$

• Незатухающие колебания материальной точки (тела) происходят с постоянной амплитудой в системе, полная механическая энергия которой с течением времени остается постоянной.

• Затухающие колебания материальной точки (тела) происходят с постепенно уменьшающейся амплитудой по экспоненциальному закону. Затухающие колебания происходят с частотой, определяемой параметрами колебательной системы.

• *Вынужденные механические колебания* — незатухающие колебания, совершаемые под действием внешней периодически изменяющейся силы:

$$F = F_0\sin\omega t.$$

В установившемся режиме вынужденные колебания происходят с частотой вынуждающей силы и являются гармоническими.

Амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитудному значению вынуждающей силы $F_0$.

• *Резонанс* — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, когда частота вынужденных колебаний $\omega$ приближается к частоте собственных колебаний системы $\omega_0$ ($\omega \approx \omega_0$).

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Какое движение называют колебательным? **2.** Какие колебания называют гармоническими? **3.** Какие колебания называют свободными? **4.** Дайте определения периода, частоты и амплитуды колебательного движения? **5.** По какому закону изменяется скорость,

ускорение при свободных гармонических колебаниях? 6. Как определить амплитуду результирующего колебания при сложении двух колебаний одного направления и одинаковой частоты? 7. Какие силы называют квазиупругими? 8. Какие механические колебания называют свободными? 9. От чего зависит период колебания математического, пружинного маятника? 10. От чего зависит полная энергия колеблющегося тела? 11. Какие механические колебания называются затухающими? 12. От чего зависит амплитуда, период затухающих колебаний? 13. Как можно получить автоколебания? 14. Какие механические колебания называют вынужденными? 15. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний? 16. Какое явление называют механическим резонансом?

## Примеры решения задач

• **Задача 1**. Гармонические колебания величины $S$ описываются уравнением $S = 0{,}01\sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$ м. Определите: амплитуду колебаний; циклическую частоту; начальную фазу колебаний; период колебаний.

**Дано:** $S = 0{,}01\sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$ м.

**Найти:** $A$; $\omega_0$; $\varphi_0$; $T$.

**Решение.** Уравнение гармонических колебаний имеет вид:

$$S = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1)$$

Сравнивая уравнение (1) с уравнением, данным в условии задачи, определяем амплитуду колебаний $A$, циклическую частоту $\omega_0$ и начальную фазу $\varphi_0$ колебаний: $A$ = 0,01 м; $\omega_0 = 3\pi$ $\varphi_0 = \frac{\pi}{6}$.

Циклическая частота $T$ и период колебаний связаны соотношением

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

**Вычисления:** $T = \frac{2\pi}{3\pi}$ с $= \frac{2}{3}$ с $= 0{,}66$ с.

**Ответ:** $A$ = 0,01 м; $\omega_0 = 3\pi$; $\varphi_0 = \frac{\pi}{6}$; $T$ = 0,66 с.

• **Задача 2.** Напишите уравнение гармонического колебания точки, если его амплитуда 10 см, максимальная скорость 20 см/с, а начальная фаза колебаний равна нулю.

**Дано:** $A$ = 10 см = 0,1 м; $v_{max}$ = 20 см/с = 0,2 м/с; $\varphi_0$ = 0.

**Решение.** Уравнение гармонического колебания имеет вид:; $x = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ Чтобы записать уравнение колебания точки, необходимо найти $\omega_0$. Максимальная скорость колеблющейся точки определяется по формуле

$$v_{max} = |A\omega_0|,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{v_{max}}{A}.$$

**Вычисления:** $\omega_0 = \dfrac{0{,}2\ \text{м/с}}{0{,}1\ \text{м}} = 2\ \text{с}^{-1}.$

**Ответ:** $x = 0{,}1 \sin(2t)$ м.

**• Задача** 3. **Масса подвешенного к спиральной пружине груза 100 г. На сколько нужно увеличить массу груза, чтобы период колебаний груза увеличился в три раза?**

**Дано:** $m$ = 100 г = 0,1 кг; $T_2 = 3T_1$

**Найти:** $\Delta m$.

**Решение: Периоды колебания пружинного маятника массой** $m$ и $m + \Delta m$ **определяем по формулам:**

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}};\ T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m+\Delta m}{k}}.$$

$\dfrac{T_2}{T_1} = \sqrt{\dfrac{m+\Delta m}{m}} = 3,$ **откуда** $9m = m + \Delta m,$ **следовательно,** $\Delta m = 8m.$

**Вычисления:** $\Delta m$ = 8 • 0,1 кг = 0,8 кг.

**Ответ:** $\Delta m$ =0,8 кг.

**• Задача 4. Определите полную энергию материальной точки массой 0,01 кг, колеблющейся по закону** $x = 0.5 \sin(2t)$ м.

**Дано:** $m = 0{,}01$ кг $= 1 \cdot 10^{-2}$ кг; $x = 0{,}05 \sin(2t)$ м.

**Найти:** E

**Решение. Из уравнения** $x = 0{,}05 \sin(2t)$ **м определяем амплитуду и циклическую частоту колебаний**

$$A = 0{,}05\ \text{м} = 5 \cdot 10^{-2}\ \text{м};\ \omega_0 = 2\ \text{с}^{-1}.$$

**Найденные величины подставляем в формулу, по которой определяется полная энергия:**

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

**Вычисления:** $E = \dfrac{0{,}01\ \text{кг} \cdot 25 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2 \cdot 4\ \text{с}^{-2}}{2} = 5 \cdot 10^{-5}\ \text{Дж} = 50\ \text{мкДж}$

**Ответ:** $E$ = 50 мкДж.

## *Задачи для самостоятельного решения*

1. Уравнение гармонического колебательного движения имеет вид: $x = 0{,}03 \sin\left(\pi t + \dfrac{\pi}{3}\right)$ м. Определить: 1) амплитуду колебаний; 2) циклическую частоту; 3) частоту; 4) период колебаний.

2. Записать уравнение гармонического колебательного движения точки, совершающей колебания с амплитудой 3 см, если за 1 мин совершается 240 колебаний. Начальная фаза колебаний равна 30°.

**3.** Уравнение гармонического колебания точки имеет вид: $x = 0{,}08 \sin(10\pi t)$ м. Определить максимальную скорость и максимальное ускорение колеблющейся точки.

4. Тело совершает гармонические колебания с амплитудой 12 см и периодом 0,25 с. Определить: 1) максимальную скорость; 2) максимальное ускорение колеблющегося тела.

**5.** Определить максимальную кинетическую, максимальную потенциальную и полную энергии материальной точки массой 8 г, колеблющейся по закону $x = 0{,}01 \sin(0{,}1t)$ м.

6. Груз, подвешенный к пружине, жесткость которой 250 Н/м, колеблется по вертикали с амплитудой 0,08 м. Определить максимальные значения потенциальной и кинетической энергий колеблющегося тела.

**7.** Тело совершает гармонические колебания с амплитудой 10 см, период колебаний 6,28 с. Максимальная кинетическая энергия колеблющегося тела 1 мДж. Определить массу колеблющегося тела.

**Ключевые слова:** *гармонические колебания, амплитуда, фаза, частота, период, математический маятник, пружинный маятник, механические колебания, резонанс.*

Глава 15

# УПРУГИЕ ВОЛНЫ

## 15.1. Поперечные и продольные волны

**Волновые процессы.** Среду, состоящую из частиц, связанных друг с другом упругими силами, называют ***упругой средой.***

*ВОЛНОВЫМ* ***процессом*** называют процесс распространения колебаний в упругой среде. Механические колебания возникают в любой среде, содержащей атомы или молекулы, если устойчивое равновесие частиц среды нарушается. Возникшее нарушение устойчивого равновесия не остается в пределах некоторой области, а вследствие того, что среда упругая и обладает инертными свойствами, передается в другие части среды.

***Лучом*** называют линию, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны. Колебания частиц среды могут совершаться по направлению луча и перпендикулярно ему. Волны, возникающие в упругой среде, называют упругими, или *механическими.*

Различают поперечные и продольные волны.

В *поперечной ВОЛНЕ* частицы среды совершают колебания в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (например, сейсмические волны, распространяющиеся в твердой мантии Земли).

В *продольной ВОЛНЕ* частицы колеблются вдоль направления распространения волны. Эти волны состоят из сгущений и разрежений в упругой среде (например, звуковые волны).

*Волновой процесс характеризуется тем, что частицы среды совершают колебательные движения относительно положения равновесия и почти не перемещаются поступательно.*

Распространение упругой волны представляет собой последовательную передачу движения от одной области упругой среды к другой, при этом передается энергия, поставщиком которой является «источник» колебаний, т.е. возникает поток энергии, расходящийся от источника колебаний.

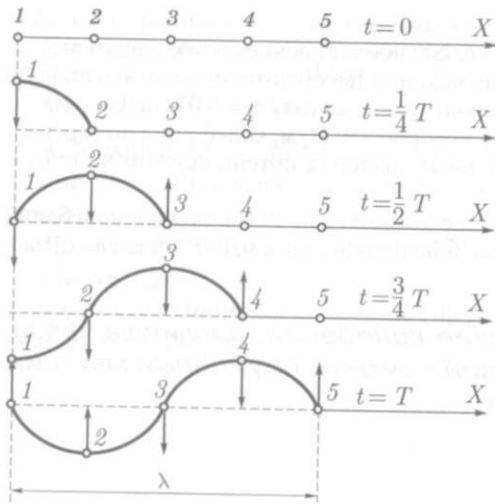



Рис. 15.1

Наиболее важные и часто встречающиеся виды волн — упругие волны, волны на поверхности жидкости и электромагнитные волны. Основное свойство всех волн, независимо от их природы, состоит в том, что волны осуществляют перенос энергии.

**Перенос энергии не связан с переносом вещества.**

Энергия, переносимая волнами, может как совершать работу, так и превращаться в другие виды энергии (например, распространение взрывной волны, обладающей большой разрушающей силой, т. е. способностью производить механическую работу).

**Поперечные волны.** Рассматривая механические волны, можно получить соотношения, которые имеют наиболее общий характер и могут быть использованы для описания волновых процессов более сложной природы, например при изучении электромагнитных волн.

Поперечные механические колебания возникают в твердых телах, так как для возбуждения таких колебаний нужно создать начальную упругую деформацию сдвига.

Рассмотрим процесс образования поперечной волны. В такой волне смещения колеблющихся точек направлены перпендикулярно направлению распространения волны, т.е. оси *X*. На рис. 15.1 изображено пять последовательных моментов образования волны, которая распространяется вдоль линии ***1 — 5,1.*** е. оси *X*.

Это графическое представление волнового процесса имеет совсем иной смысл, чем график смещения при гармоническом колебании, на котором изображалось смещение *одной и той же точки* в зависимости от времени (рис. 15.2). Здесь на каждой строчке показано положение частиц *1, 2, 3,* ***4, 5*** *в* выбранный момент времени (см. рис. 15.1).

В начальный момент времени (£ — 0) все частицы расположены на оси *X,* т.е. находятся в положении равновесия.

Проследим за поведением частиц среды, находящихся в точках *1, 2, 3,* ***4, 5.*** Пусть точка *1* приводится в колебание с периодом *T,* направленное перпендикулярно линии ***1—5.*** Так как соседние точки связаны между собой упругими силами, они также приходят в колебание, но с некоторым запозданием.

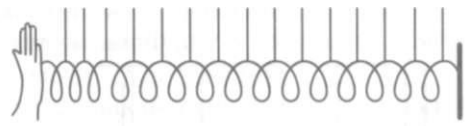
Через четверть периода $(t = \frac{1}{4}T)$ точка *1* отклонится от линии равновесия на максимальное смещение $A$. Колебание начали все точки, лежащие слева от точки *2.* После $t = \frac{1}{4}T$ начнет подниматься вверх и точка *2.* Еще через $\frac{1}{4}T$', т. е. при $t = \frac{1}{2}T$, точка *1* вернется в положение равновесия, точка *2* достигнет максимального отклонения и колебания дойдут до точки *3.*



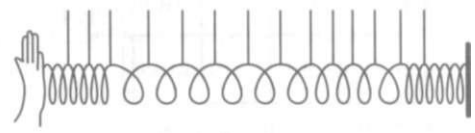

Рис. 15.2




Рис. 15.3



*а*



*б*

Рис. 15.4

При $t = \frac{3}{4}T$ точка *1* достигнет максимального отрицательного смещения, точка *2* вернется в положение равновесия и колебания достигнут точки *4.*

Наконец, за время, равное периоду $t — T$, точка *1* вернется в положение равновесия, совершив полностью одно колебание. Колебания распространились до точки 5, все колеблющиеся точки образуют полную волну.

При дальнейших колебаниях точек волновой процесс распространится вправо от точки 5.

В рассмотренном случае образовании поперечной волны каждая частица движется только вверх и вниз, при этом происходит передача энергии колебательного движения от одной точки среды к другой (см. рис. 15.2).

Продольные волны. Помимо поперечных волн в среде могут возникнуть продольные волны, в которых колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волнового процесса (рис. 15.3).

Продольные колебания могут передаваться твердыми, жидкими и газообразными телами, так как при деформации сжатия или растяжения в таких средах возникают упругие силы, стремящиеся устранить эти деформации. Таким образом, продольные волны могут распространяться в любой среде.

В продольных волнах вследствие совпадения направлений колебаний частиц и волны появляются сгущения и разрежения.

Продольная волна возникает, например, в длинной спиральной пружине, когда один конец подвергается периодическому внешнему воздействию (рис. 15.4, *а).* Если период внешнего воздействия *Т,* то упругая волна представляет собой последовательные сжатия и растяжения пружины, сменяющие друг друга через время, равное половине периода (рис. 15.4, *б).*

## 15.2. Характеристики волны

**Фронт волны.** При рассмотрении образования поперечных волн предполагалось, что колебания частиц происходят вдоль оси *X,* т. е. в определенном направлении. Но от источника колебаний волны распространяются в пространстве по всем направлениям, поэтому колеблется совокупность частиц, расположенных в некотором объеме.




Рис. 15.5

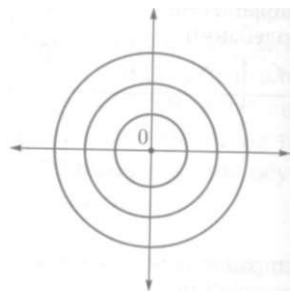



Рис. 15.6

Множество точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называют ***волновой поверхностью,*** а множество точек, до которых дошло колебание к данному моменту времени, — ***фронтом волны.***

Волновых поверхностей можно изобразить много, а фронт волны, т. е. волновая поверхность в данный момент времени, один. В зависимости от вида фронта волны различают плоские и сферические волны.

*В* ***плоской волне*** фронтом волны и волновыми поверхностями являются плоскости, перпендикулярные направлению распространения волны, т.е. лучу. На рис. 15.5 показаны ряд волновых поверхностей, фронт и источник волны.

В ***сферической волне*** волновые поверхности и фронт волны являются сферой. Сферические волны возникают в том случае, если источник волны является точечным. Лучи в сферической волне направлены вдоль радиусов сфер от источника, расположенного в их центре 0 (рис 15.6).

**Скорость распространения волн.** Скорость распространения волнового процесса *v* зависит от плотности среды р, в которой возникают волны.

Для продольных волн скорость зависит также от модуля Юнга *E* и определяется по формуле:

$$v_{\text{прод}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \qquad (15.1)$$

Для поперечных волн скорость зависит от модуля сдвига ***N:***

$$v_{\text{поп}} = \sqrt{\frac{N}{\rho}}. \qquad (15.2)$$

Так как для большинства твердых тел модуль Юнга больше модуля сдвига *(E> N),* то в одном и том же теле скорость продольных волн больше скорости поперечных:

$$v_{\text{прод}} > v_{\text{поп}}.$$

При землетрясениях возникают сейсмические волны, которые бывают двух видов:

**1)** продольные, или волны сжатия;

**2)** поперечные, или волны сдвига.

Скорость распространения этих волн в мантии Земли различна, что дает возможность по сейсмограммам, т.е. непрерывной записи упругих колебаний Земли, вызванных землетрясением, определять очаги землетрясения.

**Длина волны.** На рис. 15.1 в момент времени, равный периоду *(t= T),* точки *1* и 5, находящиеся в положении равновесия, имеют одинаковое смещение и одинаковое направление движения (вверх). Поэтому говорят, что точки *1* и *5* имеют одинаковые фазы. Точки *1* и *3с* одинаковым смещением движутся в противоположные стороны, поэтому говорят, что точки *1 и 3* находятся в противоположных фазах (противофазе).

Расстояние между точками *1* и *5* определяет длину волны X.

***Длиной волны*** $\lambda$ называется расстояние между ближайшими точками волны, колеблющимися в одинаковых фазах.

***Периодом волны*** *T* называется время одного полного колебания ее точек. Величину, обратную периоду, называют ***частотой волны*** $\nu$***:***

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

На рис. 15.1 видно, что за время периода *(t= T)* волновой процесс распространится на расстояние $\lambda$. Между длиной волны, скоростью распространения и периодом (или частотой) колебаний существует зависимость:

$$\lambda = vT, \tag{15.3}$$

**или**

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \tag{15.4}$$

**Скорость распространения и длина волны зависят от свойств среды, в которой волна распространяется, а период и частота зависят только от свойств источника волны.**

## 15.3. Уравнение плоской бегущей волны

Пусть вдоль положительного направления оси *X* распространяется плоская волна, источник которой *O* находится в начале координат *x* = О (рис. 15.7). Скорость распространения волны $v$. В источнике волн — вибраторе — изменение смещения величины *S* происходит по закону:

$$s(0,\ t) = A \sin \omega t,$$

где *A* — амплитуда; $\omega$ — циклическая частота.

Рассмотрим некоторую частицу среды *M,* находящуюся на расстоянии *x* от источника колебаний *O*. Очевидно, что частица среды *M* колеблется по закону колебания источника, но ее колебания будут отставать по времени от колебаний источника на $\Delta t$. Колебания дойдут до точки *M* через промежуток времени $\Delta t = \frac{x}{v}$, поэтому время колебаний точки *M* будет меньше, чем *t* на $\Delta t$, и составит $\left(t - \frac{x}{v}\right)$.

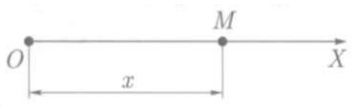


Рис. 15.7

Тогда уравнение смещения частиц, находящихся на расстоянии $x$ от источника, будет иметь вид:

$$s(x,t) = A\sin\omega\left(t-\frac{x}{v}\right). \qquad (15.5)$$

Уравнение (15.5) выражает уравнение бегущей волны. Из него следует, что изменение смещения частиц является как периодической функцией времени $t$, так и периодической функцией координаты $x$.

Если плоская волна распространяется в направлении, противоположном положительному направлению оси $X$, то ее уравнение будет:

$$s(x,t) = A\sin\omega\left(t+\frac{x}{v}\right). \qquad (15.6)$$

Для характеристики волн используют *волновое число* $k$, которое показывает, сколько длин волн укладывается на расстоянии, равном $2\pi$ единиц длины:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\pi}{v}. \qquad (15.7)$$

Другая форма уравнения плоскостей бегущей волны [см. формулу (15.5)] имеет вид

$$s = A\sin(\omega t - kx). \qquad (15.8)$$

Уравнения (15.5) и (15.8) определяют смещение любой точки среды, находящейся на расстоянии $x$ от вибратора, в момент времени $t$

## 15.4. Интерференция волн

**Принцип суперпозиции.** Если свойства среды, в которой распространяются волны, не изменяются под действием возмущений, создаваемых волнами, то к ним применим принцип суперпозиции (наложения) волн.

При распространении в среде нескольких волн волны распространяются независимо друг от друга. Каждая точка среды, куда приходят две или несколько волн, принимает участие в колебаниях, вызванных каждой волной в отдельности. На основании принципа суперпозиции можно утверждать, что *результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из волновых процессов в отдельности.*

Особый интерес представляет суперпозиция (наложение) когерентных волн. Когерентность означает согласованное протекание во времени и в пространстве волновых процессов. Волны и возбуждающие их источники являются *когерентными,* если *разность фаз волн не зависит от времени.* Предположим, что распространяются синусоидальные волны:

$$s_1 = A_1\sin(\omega_1 t - k_1 x_1) = A_1\sin\Phi_1;$$
$$s_2 = A_2\sin(\omega_2 t - k_2 x_2) = A_2\sin\Phi_2,$$

где $\Phi_1$ и $\Phi_2$ — соответственно фаза первой и второй волны:

$$\Phi_1 = (\omega_1 t - k_1 x_1); \quad \Phi_2 = (\omega_2 t - k_2 x_2).$$

Разность фаз волны

$$\Delta\varphi = \Phi_2 - \Phi_1 = \omega_2 t - k_2 x_2 - \omega_1 t + k_1 x_1,$$

или

$$\Delta\varphi = (\omega_2 - \omega_1)t - (k_2 x_2 - k_1 x_1).$$

В этом выражении от времени зависит только первый член. Таким образом, волны будут когерентны, если $\omega_2 = \omega_1$, т.е. их частоты должны быть одинаковы. Для когерентных волн, учитывая, что $k_1 = k_2 = \dfrac{2\pi}{\lambda}$, разность фаз $\Delta\varphi$ равна:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{x_1 - x_2}{\lambda}. \tag{15.9}$$

**Интерференция волн.** ***Интерференция*** *ВОЛН* — это сложение в пространстве двух или нескольких волн, при которых в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Интерференция характерна для волн любой природы: волн на поверхности жидкости, упругих и электромагнитных.

При интерференции волн результирующее колебание в каждой точке представляет собой геометрическую сумму колебаний, соответствующих каждой из складывающихся волн. Согласно (14.11), амплитуда результирующей волны в какой-либо точке пространства равна:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos\Delta\varphi}, \tag{15.10}$$

где $A_1$ и $A_2$ — амплитуды складывающихся волн; $\Delta\varphi$ — разность фаз между ними в рассматриваемой точке.

Если волны и возбуждающие источники когерентны, то разность фаз волн $\Delta\varphi$ остается *неизменной в данной точке,* но может изменяться от одной точки к другой, так как зависит от $x_1$ и $x_2$ [см. формулу (15.9)].

На рис. 15.8, а изображены когерентные источники $S_1$ и $S_2$ и произвольная точка *M,* удаленная от $S_1$ на $x_1$, от $S_2$ на $x_2$.

Амплитуда результирующей волны будет максимальна, если разность фаз $\Delta\varphi$ будет равна

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{x_1 - x_2}{\lambda} = \pm 2k\pi, \; k = 0, 1, 2, \ldots \tag{15.11}$$

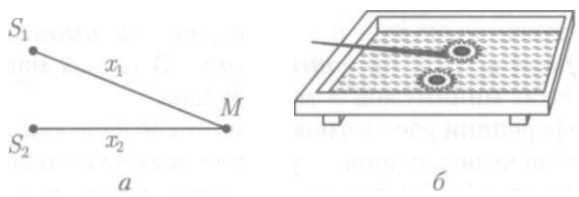



Рис. 15.8

В этом случае $\cos\Delta\varphi = 1$, и, как следует из (15.10), амплитуда результирующей волны будет

$$A = A_1 + A_2.$$

Из соотношения (15.11) следует

$$|x_1 - x_2| = k\lambda. \qquad (15.12)$$

**Максимум амплитуды расположен в тех точках, для которых разность хода волн $|x_1 - x_2|$ равна нулю или целому числу длин волн.**

Соотношение (15.12) называют условием максимума, ***а к*** = 0, 1, 2, ... — ***порядком интерференционного максимума.***

Амплитуда результирующей волны будет минимальна, если разность фаз $\Delta\varphi$ равна

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{x_1 - x_2}{\lambda} = \pm(2k+1)\pi,\ k = 0, 1, 2, 3, \ldots \qquad (15.13)$$

**В** этом случае $\cos\Delta\varphi = -1$, и, как следует из (15.10), амплитуда результирующей волны будет равна

$$A = |A_1 - A_2|.$$

Из соотношения (15.13) следует

$$|x_1 - x_2| = (2k+1)\frac{\lambda}{2},\ k = 0, 1, 2, \ldots \qquad (15.14)$$

**Минимум амплитуды расположен в тех точках, для которых разность хода волн $|x_1 - x_2|$ равна нечетному числу полуволн.**

Соотношение (15.14) называют условием минимума, ***а. к*** — 0, 1, 2, ... — ***порядком интерференционного минимума.***

Таким образом, в пространстве получается некоторое распределение амплитуд результирующей волны с чередующимися максимумами и минимумами. Если амплитуды складывающихся волн одинаковы, т.е. $A_1 = A_2$, то максимальная амплитуда равна удвоенной амплитуде каждой волны:

$$A_{\max} = 2A_1 = 2A. \qquad (15.15)$$

Минимальная амплитуда равна нулю

$$A_{\min} = |A_1 - A_2| = 0. \qquad (15.16)$$

Из формулы (14.28) следует, что ***энергия пропорциональна квадрату амплитуды,*** следовательно, при ***интерференции происходит перераспределение энергии волн в пространстве.*** **В** точках максимумов энергия максимальна, в точках минимумов — минимальна.

Картину интерференции рассмотрим на примере наложения волн на поверхность воды. С помощью двух шариков, укрепленных на стержне, который совершает гармонические колебания, возбудим одновременно две круговые когерентные волны в ванне, заполненной водой (рис. 15.8, б).

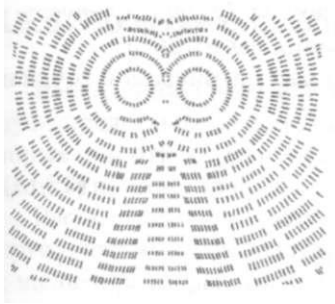


Рис. 15.9

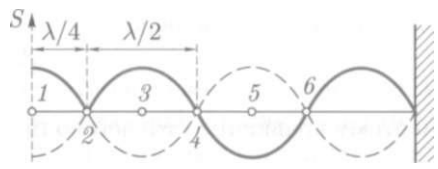



Рис. 15.10

Амплитуды волн равны, т. е. $A_1 = A_2$. Картина интерференции этих волн представлена на рис. 15.9. Из рисунка видно, что на поверхности воды возникают области, в которых амплитуды результирующих волн максимальны $(A = 2A_1)$ и минимальны $(A = 0)$.

Стоячие волны.* Примером результата интерференции двух волн служат *стоячие волны,* образующиеся при наложении двух встречных плоских волн с одинаковыми амплитудами.

Стоячие волны могут быть получены при отражении волны от препятствия. Допустим, вибратор посылает волну к препятствию (прямая волна). Отраженная от него волна наложится на прямую волну (рис. 15.10).

Уравнение стоячей волны получаем сложением уравнения прямой волны, имеющего вид:

$$S_1 = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right),$$

и уравнения отраженной волны

$$S_2 = A\sin\omega\left[t - \frac{(-x)}{v}\right] = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right).$$

Отраженная волна движется в направлении, противоположном прямой волне, поэтому $x$ берем со знаком «минус».

Смещение точки, которая участвует одновременно в двух колебаниях, равно алгебраической сумме $S_1$ и $S_2$:

$$S = S_1 + S_2;$$

$$S = A\left[\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) + \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right].$$

Так как $\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$, то $x = 2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\sin\frac{2\pi t}{T}$, учитывая, что $\frac{2\pi}{T} = \omega$, получим

$$x = 2A\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\sin\omega t. \qquad (15.17)$$

Выражение (15.17) называют уравнением стоячей волны. Отсюда следует:

• в каждой точке стоячей волны происходят колебания частотой $\omega$;

• амплитуда колебания $A_{ст}$ зависит от координаты $x$ рассматриваемой точки и не зависит от времени

$$A_{ст} = 2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}, \qquad (15.18)$$

поэтому уравнение стоячей волны можно записать так:

$$x = A_{ст}\sin\frac{2\pi t}{T},$$

или

$$x = A_{ст}\sin\omega t.$$

Каждая точка совершает гармоническое колебание с периодом $T$. В полученном уравнении стоячей волны амплитуда $A_{ст}$ для каждой точки волны, согласно выражению (15.18), вполне определена. Но при переходе от одной точки волны к другой она изменяется в зависимости от расстояния $x$.

Если придавать $x$ значе $\frac{\lambda}{4}; 3\frac{\lambda}{4}; 5\frac{\lambda}{4}$ и т. д., то при подстановке их в формулу (15.18) получим $\cos\frac{2\pi x}{\lambda} = 0$ и $A_{ст}$ **=0.** Следовательно, указанные точки волны остаются в покое, так как амплитуды колебаний их равны нулю. Эти точки называют *узлами* стоячей волны (точки *2, 4, 6* на рис. 15.10).

*Пучностями* волны называют точки, колеблющиеся с максимальной амплитудой (точки *1, 3,* 5на рис. 15.10). Пучностям (максимальным амплитудам) соответствуют значения $x$, равные $\lambda = \frac{\lambda}{2}$ $2\frac{\lambda}{4}; 4\frac{\lambda}{4}; 6\frac{\lambda}{4}$ и т. д., для них $\left|\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\right| = 1,\ A_{ст} = 2A.$ Расстояние между соседними узлами (пучностями) называют *длиной стоячей волны:*

$$\lambda = \frac{\lambda}{2} \qquad (15.19)$$

где $\lambda$ — длина бегущей волны.

В стоячей волне все точки среды, в которой она распространяется, расположенные между двумя соседними узлами, колеблются в одной фазе (синфазно). Точки среды, лежащие по разные стороны от узла, колеблются в противофазе — фаза их колебания отличается на тт, т.е. *при переходе через узел фаза колебаний скачкообразно меняется на* тт.

В том случае, *когда волна отражается от среды более плотной, чем та среда, где распространяется волна, в месте отражения возникает узел, фаза волны изменяется на противоположную.* При этом говорят, что происходит потеря половины длины волны. Когда волна отражается от среды менее плотной, в месте отражения появляется пучность и потери половины длины волны нет.

В отличие от бегущих волн в стоячей волне отсутствует перенос энергии вследствие того, что образующие эту волну прямая и обратная волны переносят равную энергию в противоположных направлениях.

## 15.5. Понятие о дифракции волн

В изотопной среде волны распространяются прямолинейно. Это означает, что лучи представляют собой прямые линии. Однако существуют условия, при которых они отклоняются от прямолинейного направления, не выходя за пределы данной изотопной среды.

Рассмотрим опыт, демонстрируемый обычно с помощью волновой ванны. На пути плоских волн, возбуждаемых колеблющейся пластиной $S$, ставится экран $D$ с щелью, размеры которой можно изменять. Если ширина щели $d$ значительно больше длины волны $(d \gg \lambda)$, то за щелью образуются области, куда волны не распространяются, называемые геометрической тенью (рис. 15.11). Если ширина щели сравнима по порядку величины с длиной волны $\lambda\,(d \sim \lambda)$, то происходит дифракция волны (рис. 15.12). За экраном волновая картина меняется. Волновые поверхности перестают быть плоскими, а лучи уклоняются от прямого направления и заходят в область геометрической тени.

Дифракция наблюдается не только при прохождении волн сквозь малые отверстия, при огибании волнами малого экрана или края большого экрана. Известно, например, что ствол дерева не может служить препятствием для звуковых волн. Звук можно услышать, также спрятавшись за здание.

**Объяснение дифракции удобно проводить на основе принципа Гюйгенса, утверждающего, что каждая точка волнового фронта становится источником элементарных волн.**

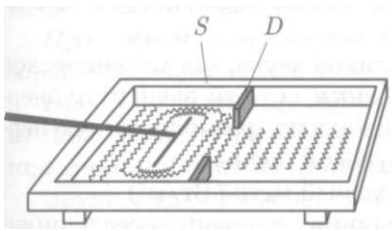



Рис. 15.11

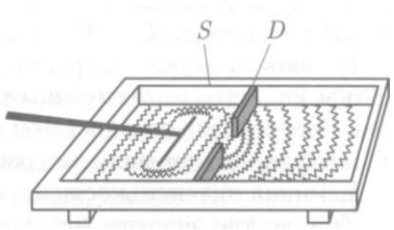



Рис. 15.12

Пусть в некоторый момент времени фронт волны достигает щели. На рис. 15.13 изображен тот же экран с щелью в более крупном масштабе. Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка выделяемого щелью участка фронта волны является источником вторичных волн. В однородной изотропной среде вторичные волны будут сферические. Построив огибающую вторичных волн для некоторого момента времени, получаем новый фронт волны. Из рис. 15.13 видно, что волна огибает препятствие и заходит в область геометрической тени.

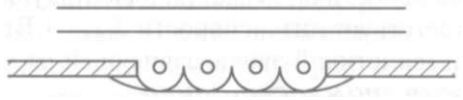


Рис. 15.13

***Дифракцией*** называется огибание волнами препятствий или любое отклонение распространения волн от законов геометрической оптики.

## 15.6. Звуковые волны

Распространение **звуковых** колебаний. Механические колебания, распространяющиеся в упругой среде (твердые, жидкие и газообразные тела) и воспринимаемые органами слуха, называют ***звуковыми волнами.*** Основной средой, в которой распространяются звуковые колебания, является воздух. В воздухе, т.е. газах, колебания распространяются в виде *продольных волн. В безвоздушном пространстве звуковые колебания распространяться не могут,* т. е. для их распространения необходима передающая среда.

Человеческое ухо воспринимает колебания, частоты которых лежат в интервале примерно от 16 до 20 ООО Гц.

Раздел физики, в котором изучают звуковые явления, называется ***акустикой.*** В настоящее время акустика изучает и те механические волны, которые не воспринимаются человеческим ухом, к ним относятся инфра- и ультразвуки.

***Инфразвуками*** называют звуковые волны с частотами меньше 16 Гц, ***ультразвуками*** — волны с частотами более 20 ООО Гц.

*Различные тела по-разному передают звук,* т. е. обладают различной звукопроводностью. Например, мягкие пористые тела проводят звук плохо, поэтому их используют для звукоизоляции.

В каждой среде звук распространяется с определенной скоростью, зависящей от параметров, характеризующих данную среду. В жидкостях скорость звука выше, чем в газах, а в твердых телах — выше, чем в жидкостях. Скорость звука зависит не только от природы вещества, в котором он распространяется, но и от его температуры. Например, скорость звука в воздухе при температуре 0 °С равна 331 м/с, при 20 °С - 343 м/с.

**Громкость звука.** Энергетической характеристикой звука, как механической волны, является ***интенсивность*** $I$, или ***сила, звука,*** которая зависит от энергии, ежесекундно переносимой через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения звуковой волны.

Единица интенсивности звука — ватт на квадратный метр ($Вт/м^2$).

Количество энергии, переносимой волной в единицу времени через единичную площадку, пропорционально квадрату амплитуды волны и квадрату частоты [см. (14.28)], следовательно, *интенсивность, или сила, звука данной частоты пропорциональна квадрату амплитуды.*

Для того чтобы звук был воспринят человеческим ухом, необходимо, чтобы его интенсивность была не меньше некоторой величины, называемой ***порогом слышимости.*** Порог слышимости соответствует интенсивности $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м$^2$.

*Порог слышимости различен для разных частот.* Человеческое ухо наиболее чувствительно к колебаниям, лежащим в пределах от 1 ООО до 3 ООО Гц (1 - 3 кГц).

Звук большой интенсивности вызывает болевые ощущения и опасен для уха. Болевой порог соответствует интенсивности $I_{б.п} = 1$ Вт/м$^2$.

Субъективной характеристикой звука, зависящей от частоты и связанной с интенсивностью, является ***громкость звука.***

Самый громкий звук, который способно воспринимать человеческое ухо, имеет интенсивность примерно в $10^{12}$ раз больше, чем интенсивность самого тихого звука. Целесообразно сравнивать интенсивности звуков по логарифмической шкале. В этой шкале уровень интенсивности выражается

Таблица 15.1

| Источник звука | Уровень интенсивности, дБ | Источник звука | Уровень интенсивности, дБ |
|---|---|---|---|
| Порог слышимости | 0 | Двигатель самолета | 110 |
| Шепот | 20 | Рок-концерт | 120 |
| Шум на оживленной улице | 80 | Порог болевого ощущения | 120 |
| Громкий крик | 100 | Космическая ракета | 180 |

в белах (Б)[1]. Если уровень одного звука на 1 бел (1 Б) выше, чем у другого, то отношение интенсивности этих звуков равно 10, если на 2 Б, то отношение их интенсивностей равно $10^2$, и т.д. Таким образом, громкость звука характеризуется интенсивностью звука.

**Уровень интенсивности звука — десятичный логарифм отношения интенсивностей звука** (табл. 15.1)

$$k = \lg \frac{I}{I_0}, \qquad (15.20)$$

где $I_0$ — интенсивность звука на пороге слышимости.

Обычно уровень интенсивности выражают в децибелах (дБ) (1 Б = 10 дБ).

**Высота тона.** По форме и характеру волн различают звуковые удары, шумы и тоны (музыкальные звуки).

***Простым,*** или ***чистым, тоном*** называют звук, источник которого совершает гармоническое колебание.

Простой тон создает, например, камертон. Основной характеристикой простого тона является частота, определяющая высоту тона. *Чем больше частота, т. е. меньше период колебаний, тем более высокий звук мы слышим.*

Звуки, издаваемые музыкальными инструментами, являются сложными тонами. Сложный тон может быть разложен на простые или в спектр. Наименьшая частота $\nu$ такого разложения спектра соответствует основному тону, остальные — обертонам. Обертоны имеют частоты, равные $2\nu, 3\nu$ и т. д. В зависимости от того, обертоны каких частот имеются в данном звуке, звук приобретает определенный *ТЕМБР,* или окраску.

Тембр звука, кроме того, зависит от громкости (т.е. амплитуды колебаний) отдельных обертонов. Вследствие того что звук имеет отдельный тембр, можно отличить ноты, взятые на различных музыкальных инструментах, или голоса различных людей.

***Шумом*** называют звук, состоящий из большого числа гармонических колебаний с разными частотами. Чем больше в спектре различных частот, тем больше звук приближается к шуму. Спектр шума является сплошным. К шумам относятся звуки от вибрации машин, шорох, скрип, согласные звуки речи и т. п.

***Звуковой удар*** — это кратковременное звуковое воздействие (например, взрыв). *Звуковому удару соответствует единичная, так называемая ударная, волна.*

[1] **Бел — единица, получившая название в честь изобретателя телефона А. Г.Белла (1847**— 1922).

Между излучательной головкой и кожей помещают какую-нибудь жидкость, например масло, так как даже небольшая прослойка воздуха может препятствовать проникновению ультразвука в организм. Первичным механизмом ультразвуковой терапии являются механическое и тепловое действия на ткань.

В хирургии ультразвук применяют как «ультразвуковой скальпель», способный рассекать не только мягкие, но и костные ткани.

Способность ультразвука дробить тела, помещенные в жидкость, и создавать эмульсии используется в фармацевтической промышленности в производстве лекарств, в пищевой промышленности при изготовлении майонеза, различных соусов и т.д. При лечении таких заболеваний, как туберкулез, бронхиальная астма, катар верхних дыхательных путей, применяют аэрозоли различных лекарственных веществ, полученные с помощью ультразвука. В настоящее время используется метод «сваривания» поврежденных или трансплантируемых костных тканей с помощью ультразвука.

Губительное воздействие ультразвука на микроорганизмы используется в процессе стерилизации.

Перечисленные примеры не исчерпывают всех областей применений ультразвука, перспектива расширения этих приложений поистине огромна. Так, можно ожидать, например, появления принципиально новых методов диагностики с внедрением в медицину ультразвуковой голографии.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Упругими,* или *механическими, волнами* называют механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Распространение упругих волн в среде не связано с переносом вещества.

• Различают два типа волн: поперечные и продольные.

Упругая волна называется *поперечной,* если частицы среды колеблются, оставаясь в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Упругая волна называется *продольной,* если частицы среды колеблются в направлении распространения волны.

• *Длиной волны* называется расстояние между ближайшими точками волны, колеблющимися в одинаковых фазах. Длина волны $\lambda$ равна расстоянию, на которое распространяется волна со скоростью $v$ за время, равное периоду колебаний $T$.

$$\lambda = vT.$$

• Уравнение плоской бегущей волны определяет смещение точки среды, находящейся на расстоянии $x$ от вибратора в момент времени $t$

$$S = A\sin(\omega t - kx).$$

• *Волновое число* $K$ показывает, сколько длин волн укладывается на расстоянии, равном $2\pi$ единиц длины:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}.$$

• Несколько волн в среде распространяются независимо друг от друга. Результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из волновых процессов в отдельности.

• *Интерференция волн* — это наложение волн, при котором происходит устойчивое во времени их усиление в одних точках пространства и ослабление в других. Устойчи-

длину и постоянную разность фаз во времени.

При интерференции происходит перераспределение энергии волн в пространстве.

• Частным случаем интерференции волн являются *стоячие волны.* Они образуются в результате наложения двух бегущих синусоидальных волн, распространяющихся навстречу друг другу и имеющих одинаковые частоты и амплитуды. Узлами стоячей волны являются точки, в которых ее амплитуда равна нулю: $A_{ст} = 0$; пучностями — точки, в которых амплитуда максимальна: $A_{ст} = 2A$.

Длина стоячей волны $\lambda_{ст}$ равна расстоянию между двумя соседними узлами или двумя соседними пучностями и составляет половину длины бегущих волн $\lambda$:

$$\lambda_{ст} = \frac{\lambda}{2}.$$

• *Дифракция* — явление огибания волнами препятствий или любого отклонение от законов геометрической оптики.

• *Звуковые волны* — механические колебания, распространяющиеся в упругой среде и воспринимаемые органами слуха человека. Звуковые ощущения вызывают волны, частоты которых лежат в интервале от 16 до $2 \cdot 10^4$ Гц. Упругие волны с частотами менее 16 Гц называются инфразвуком, а с частотами больше $2 \cdot 10^4$ Гц — ультразвуком.

Скорость звука зависит от природы вещества, в котором звук распространяется, и его температуры.

Звуки различаются по высоте, тембру и громкости.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Что такое волновой процесс? 2. Что называется поперечной волной? 3. Что называется продольной волной? 4. Назовите характеристики волны. Какова связь между ними? 5. Запишите уравнение плоской бегущей волны. 6. При каких условиях возникает интерференция волн? 7. Назовите условия интерференционных максимума и минимума. 8. При каких условиях возникают стоячие волны? 9. Что такое дифракция волн? **10.** Что такое звуковые волны? **11.** От чего зависят громкость, высота тона и тембр звука?

## Примеры решения задач

• **Задача 1**. Определить скорость распространения волны, если две точки, лежащие на одном и том же луче и находящиеся на расстоянии 4 и 7 м, колеблются в противофазе. Период колебаний $2 \cdot 10^{-2}$ с.

**Дано:** $x_1 = 4$ м; $x_2 = 7$ м; $\Delta\varphi = \pi$; $T = 2 \cdot 10^{-2}$ с.

**Найти:** $v$.

**Решение.** Характеристики волны связаны между собой соотношением $\lambda = vT$, откуда

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

Длину волны находим из соотношения

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda},$$

откуда

$$\lambda = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{\Delta\varphi}.$$

Таким образом,

$$v = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{\Delta\varphi T}.$$

**Вычисления:** $v = \frac{2\pi(7\text{ м} - 4\text{ м})}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-2}\text{ с}} = 3 \cdot 10^2\text{ м/с}.$

$v = 3 \cdot 10^2$ м/с.

• **Задача** 2. Два когерентных источника колеблются в одинаковых фазах с частотой 500 Гц. Скорость распространения колебаний в упругой среде 1 км/с. Определить, при какой наименьшей, не равной нулю, разности хода будет наблюдаться максимальное усиление колебаний.

**Дано:** $\nu$ = 500 Гц; $v$ = 1 • $10^3$ м/с; $\kappa = 1$.

**Найти:** $|x_1 - x_2| = \Delta$.

**Решение.** Наименьшую разность хода, при которой будет наблюдаться усиление колебаний при интерференции волн, определяем из соотношения

$$\Delta = k\lambda,$$

где $\kappa$ = 1.

Тогда $\Delta = \lambda$.

Длину волны находим по формуле

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

Наименьшая разность хода равна

$$\Delta = \frac{v}{\nu}.$$

**Вычисления:** $\Delta = \frac{1 \cdot 10^3\text{ м/с}}{500\text{ Гц}} = 2\text{ м}.$

**Ответ:** $\Delta = 2$ м.

*Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Колебания, имеющие частоту 0,5 кГц, распространяются в упругой среде со скоростью 350 м/с. Определить длину упругой волны.

**2.** Колебания, имеющие частоту 50 Гц, распространяются в упругой среде со скоростью 100 м/с. Определить наименьшее расстояние между точками среды, фазы колебаний которых противоположны.

**3.** Скорость распространения волны в упругой среде 15 м/с. Разность фаз колебаний двух точек, отстоящих друг от друга на 0,1 м, равна $\pi/3$. Определить частоту колебаний источника упругих волн.

4. От двух когерентных источников, колеблющихся в одинаковых фазах, в упругой среде распространяются колебания со скоростью 200 м/с. Наименьшая разность хода, при которой наблюдается усиление колебаний, равна 0,5 м. Определить период колебаний источника волн.

5. Два когерентных источника колеблются с периодом 0,02 с. Волны распространяются в упругой среде со скоростью 500 м/с. Определить, при какой наименьшей разности хода при интерференции волн будет наблюдаться ослабление колебаний.

**Ключевые слова:** *поперечная волна, продольная волна, бегущая волна, интерференция волн, дифракция волн, звуковая волна, ультразвук.*

**Глава 16**

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

## 16.1. Свободные электромагнитные колебания

**Колебательный контур.** ***Электромагнитными колебаниями*** называют периодические взаимосвязанные изменения зарядов, токов, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Простейшей идеализированной колебательной системой в механике являются, например, математический или пружинный маятник. Как было показано, в этих системах возникают свободные гармонические колебания. При механических колебаниях происходит периодическое превращение энергии системы из кинетической в потенциальную.

Аналогичные процессы протекают при возникновении электромагнитных колебаний в системе, называемой колебательным контуром. ***Колебательный контур*** представляет собой электрическую цепь, состоящую из конденсатора С и индуктивности ***L,*** соединенных между собой. Если сопротивление контура ***R*** = О, то такой колебательный контур называют ***идеальным*** (рис. 16.1).

**Свободные электромагнитные колебания.** Рассмотрим возникновение свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре, пользуясь аналогией между механическими и электромагнитными явлениями (см. подразд. 14.6). Чтобы возбудить колебания в контуре, необходимо: 1) либо сообщить конденсатору *С* некоторый заряд, в результате чего он будет обладать энергией $W = \frac{CU^2}{2}$; 2) либо возбудить в катушке индуктивности ***L*** ток, в результате чего она будет обладать энергией $W_м = \frac{LI^2}{2}$.

**Колебания напряжения и тока.** Предположим, что от источника *GB* конденсатору **С** сообщен заряд $Q_0$ (рис. 16.1, ключ в положении *1).* В начальной момент времени *(t* = 0) заряд на обкладках конденсатора равен $Q = Q_0$ и ток в цепи отсутствует *(I*— 0). Между обкладками конденсатора появилось электрическое поле, энергия которого

$$W_{max} = W_{эл} = \frac{CU_0^2}{2}, \qquad (16.1)$$

где *С* — электроемкость конденсатора; $U_0$ — максимальное напряжение между обкладками конденсатора.

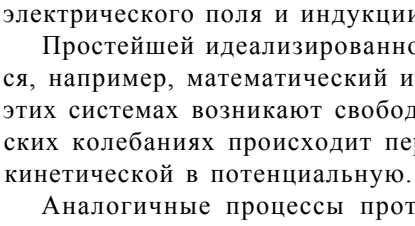
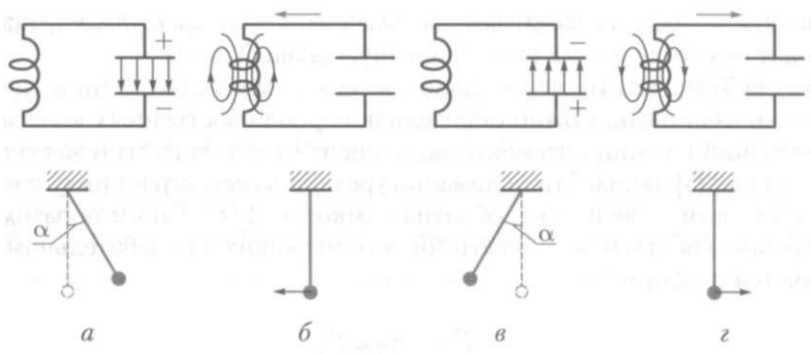


Рис. 16.1

Такое состояние колебательного контура аналогично состоянию математического маятника, отклоненного от положения равновесия на малый угол $\alpha$ (рис. 16.2, *а).*

Замкнем конденсатор *С* на индуктивность ***L,*** ключ в положении 2 (см. рис. 16.1). Конденсатор начнет разряжаться, при этом в контуре возникает электрический ток, вследствие чего в катушке индуктивности появляется магнитное поле **В.** В идеальном контуре через чет-




*а* *б* *в* *г*

**Рис. 16.2**

верть периода энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля:

$$W_{\max} = W_{\text{м}} = \frac{LI_0^2}{2}, \qquad (16.2)$$

где *L* — индуктивность; $I_0$ — максимальный ток, протекающий через катушку.

Напряжение между обкладками конденсатора при этом равно нулю: ***U*** **=** О, $t = {}^1/_4 T$. Такое состояние колебательного контура аналогично состоянию математического маятника при прохождении положения ра
тенциальная энергия системы полностью превращается в кинетическую энергию (рис. 16.2, ***б).***

После этого магнитное поле должно быстро уменьшаться до нуля, так как нет токов, его поддерживающих. Изменяющееся магнитное поле вызывает ток самоиндукции в катушке индуктивности, который, согласно закону Ленца, поддерживает убывающий ток разрядки конденсатора. Таким образом, ток, продолжая течь в том же направлении, перезаряжает конденсатор. Когда закончится перезарядка конденсатора, ток в контуре будет равен нулю. Следовательно, через время, равное половине периода $(t = {}^1/_2 T)$, магнитное поле исчезнет, т.е. энергия магнитного поля полностью превратится в энергию электрического поля (рис. 16.2, *в).* Это состояние колебательного контура аналогично состоянию математического маятника, отклоненного от положения равновесия на угол $\alpha$, но уже в сторону, противоположную состоянию, показанному на рис. 16.2, *а.*

После этого конденсатор снова начинает разряжаться, в контуре возникает ток, но уже противоположного направления. Через время $t = {}^3/_4 T$ конденсатор разрядится полностью, энергия электрического поля вновь превратится в энергию магнитного поля (рис. 16.2, г). Через время *t* — Г состояние контура станет таким же, как и в начальный момент времени (см. рис. 16.2, *а).* Затем весь процесс повторяется.

В контуре возникают колебания, при которых изменяются напряжение между обкладками конденсатора и сила тока. При этом происходит превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля и наоборот, т. е. возникают электромагнитные колебания. Если сопротивление контура равно нулю, то процесс превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля должен продолжаться бесконечно, возникают незатухающие электромагнитные ко-

лебания. Эти колебания называют *собственными,* или *свободными,* так как они происходят без воздействия внешней вынуждающей силы.

**Формула Томсона.** Проводя аналогию между механическими и электромагнитными колебаниями, можно определить период собственных колебаний. Период колебаний пружинного маятника зависит от массы груза и жесткости пружины [см. (14.22)]. В колебательном контуре роль массы играет индуктивность $L$, а роль жесткости — величина, обратная емкости: $1/C$**.** Таким образом, период незатухающих собственных колебаний, возникающих в колебательном контуре, определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \tag{16.3}$$

Формулу (16.3) называют ***формулой Томсона.***

Циклическая, или круговая, частота собственных электромагнитных колебаний

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{16.4}$$

В идеальном колебательном контуре колебания заряда происходят по закону

$$Q = Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{16.5}$$

где $Q_0$ - максимальный заряд на обкладках конденсатора; $\omega_0$ — циклическая, или круговая, частота собственных колебаний; $\varphi_0$ — начальная фаза.

Периодическое изменение заряда на обкладках конденсатора вызывает переменную разность потенциалов — переменное напряжение $U$ и переменный электрический ток $I$:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_0}{C}\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{16.6}$$

где $U_0 = \dfrac{Q_0}{C}$ — амплитуда напряжения.

Учитывая, что электрический ток характеризует скорость изменения заряда на обкладках конденсатора, можно записать [аналогично уравнению (16.6)]

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q_0\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{16.7}$$

где $I_0 = Q_0\omega_0$ — амплитуда тока.

Таким образом, по гармоническому закону изменяется не только заряд на обкладках конденсатора, но и напряжение и сила тока в контуре, т.е. возникают свободные электромагнитные колебания.

Из выражений (16.5) — (16.7) вытекает, что

**колебания заряда (напряжения) и тока в контуре сдвинуты по фазе на $\pi/2$.**

Следовательно (см. рис. 16.2),

**ток достигает максимального значения в те моменты времени, когда заряд (напряжение) на обкладках конденсатора равен нулю, и наоборот.**

## 16.2. Превращение энергии в колебательном контуре

При зарядке конденсатора между его обкладками появляется электрическое поле, энергия которого $W_{эл} = \frac{CU^2}{2}$ или $W_{эл} = \frac{Q^2}{2C}$. При разрядке конденсатора на катушку индуктивности в ней возникает магнитное поле, энергия которого $W_м = \frac{LI^2}{2}$. В идеальном контуре максимальная энергия электрического поля равна максимальной энергии магнитного поля:

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}. \qquad (16.8)$$

Энергия заряженного конденсатора периодически изменяется со временем по закону

$$W_{эл} = \frac{CU_0^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

или

$$W_{эл} = \frac{Q_0^2}{2C}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Учитывая, что $\omega^2 = 1/(LC)$, получаем

$$W_{эл} = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \qquad (16.9)$$

Энергия магнитного поля соленоида изменяется со временем по закону

$$W_{эл} = \frac{LI_0^2}{2}\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \qquad (16.10)$$

Учитывая, что $I_0 = Q_0\omega_0$, получаем

$$W_м = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2}\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \qquad (16.11)$$

Полная энергия электромагнитного поля колебательного контура равна

$$W = W_{эл} + W_м = {}^1/_2 w_0^2 L Q_0^2. \qquad (16.12)$$

Таким образом,

**в идеальном контуре суммарная энергия сохраняется, электромагнитные колебания незатухающие.**

## 16.3.* Затухающие электромагнитные колебания

Реальный колебательный контур (рис. 16.3) обладает омическим сопротивлением $R$, поэтому энергия, вначале запасенная в контуре, непрерывно расходу-

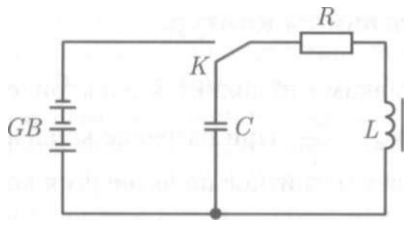



Рис. 16.3

ется на выделение теплоты. Вследствие этого амплитуда колебаний постепенно уменьшается и колебания в контуре затухают.

Проводя аналогию между затухающими механическими и электромагнитными колебаниями, считаем, что $R$ играет роль коэффициента сопротивления г. Тогда уравнение затухающих электромагнитных колебаний имеет вид

$$Q = Q_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \tag{16.13}$$

где коэффициент затухания

$$\delta = \frac{R}{2L}, \tag{16.14}$$

а частота

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \tag{16.15}$$

**Амплитуда затухающих колебаний уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону:**

$$Q_t = Q_0 e^{-\delta t}, \tag{16.16}$$

где $Q_t$ — амплитуда колебаний в момент времени $t$; $Q_0$ — начальная амплитуда колебаний в момент времени $t$ **= 0.**

Зависимость (16.13) показана на рис. 16.4 сплошной линией, а зависимость (16.16) — штриховой.

Из (16.13) следует, что колебания возможны лишь до тех пор, пока $\omega$ — действительная величина, т. е. $\delta < \omega_0$.

При медленном затухании колебаний можно пользоваться понятиями, которые введены для незатухающих колебаний. Период затухающих колебаний определяется по формуле [см. (14.35)1

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}, \tag{16.17}$$

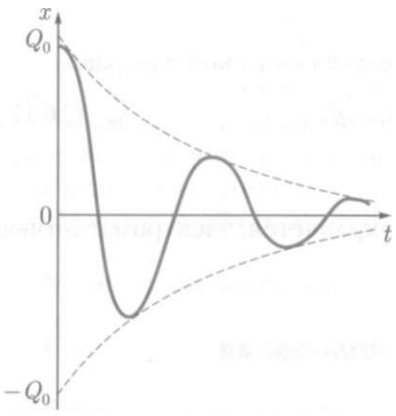



Рис. 16.4

где $\omega_0$ — собственная частота свободных незатухающих колебаний.

Сравнивая формулы (16.3) и (16.17), видим, что период затухающих колебаний больше, чем свободных незатухающих.

Скорость затухания колебаний в контуре, как и для случая механических колебаний, характеризуется логарифмическим декрементом затухания $\Theta$:

$$\Theta = \ln \frac{Q_t}{Q_{t+T}} = \delta T, \tag{16.18}$$

где $Q_t$ и $Q_{t+T}$ — амплитуды колебаний в моменты времени $t$ и $t + T$.

Промежуток времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз, называется ***временем релаксации:***

$$\tau = \frac{1}{\delta} = \frac{2L}{R}. \qquad (16.19)$$

## 16.4. Генератор незатухающих колебаний

Напомним, что автоколебательная система состоит из следующих основных частей: колебательной системы; источника энергии, за счет которого пополняется энергия в колебательной системе; клапана — устройства, регулирующего поступления энергии в колебательную систему определенными порциями; обратной связи, с помощью которой колебательная система управляет клапаном.

В генераторе (рис. 16.5) колебательной системой служит *контур {L* и *C),* обладающий малым сопротивлением; *источником энергии* — батарея (выпрямитель), питающая напряжением транзистор; *роль клапана выполняет транзистор,* который регулирует поступления энергии порциями от источника в колебательный контур. Для самовозбуждения колебаний служит катушка обратной связи $L_{св}$, индуктивно связанная с катушкой колебательного контура *L.* В генераторе роль клапана выполняет транзистор типа *p-n-p.* Транзистор имеет три электрода: эмиттер Э, коллектор К, базу Б. Эмиттерный переход открыт, если положительный полюс источника соединен с эмиттером, а отрицательный — с базой. Транзистор не пропускает ток, если потенциал базы положителен по отношению к эмиттеру. В зависимости от потенциала базы по отношению к эмиттеру транзистор будет «закрыт» или «открыт».

Если ключ замкнуть, то в цепи транзистора возникает ток, который заряжает конденсатор **C** колебательного контура. В контуре возникают *свободные колебания.* Ток, проходящий через катушку *L* контура, индуцирует переменное напряжение в катушке обратной связи $L_{св}$, которое подается на эмиттерный переход транзистора. В первый полупериод колебаний транзистор будет «открыт», т.е. в коллекторной цепи транзистора будет течь ток. Этот ток совпадает по направлению с током в катушке контура. Во второй полупериод ток в контуре изменяет направление, транзистор будет «закрыт», колебательный контур в течение полупериода отключен от источника энергии. В последующий период процесс повторяется. Таким образом, транзистор включает и отключает источник постоянного тока, за счет энергии которого в контуре поддерживаются незатухающие колебания.

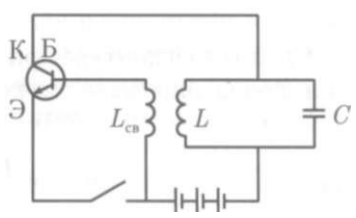


Рис. 155

**Амплитуда и период колебаний определяются свойствами колебательной системы.**

## 16.5. Вынужденные электромагнитные колебания

**Вынужденные электромагнитные колебания.** Рассмотренные выше колебания происходили с частотами, определяемыми параметрами самой колебатель-

ной системы. Чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, надо компенсировать потери энергии. Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС, называют ***вынужденными электромагнитными колебаниями.***

Для того чтобы в колебательном контуре возникли вынужденные колебания, необходимо подвести к контуру внешнюю периодически изменяющуюся по гармоническому закону ЭДС или переменное напряжение

$$U = U_0 \sin \omega t, \tag{16.20}$$

где $U_0$ — максимальное значение напряжения; $\omega$ — циклическая (круговая) частота.

Тогда аналогично вынужденным механическим колебаниям уравнение вануж-денных электромагнитных колебаний имеет вид

$$Q = Q_0 \sin(\omega t + \varphi). \tag{16.21}$$

**В установившемся режиме вынужденные колебания происходят с частотой $\omega$ и являются гармоническими.**

Амплитуда и фаза колебаний зависят от $\omega$ и определяются следующими выражениями:

$$Q_0 = \frac{U_0}{\omega\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right)^2}}, \tag{16.22}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{R}{\dfrac{1}{\omega C} - \omega L}. \tag{16.23}$$

Сила тока в контуре при установившихся колебаниях — это скорость изменения заряда, определяется по формуле, аналогичной (16.7):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \omega Q_0 \cos(wt - \varphi). \tag{16.24}$$

Из сравнения формул (16.21), (16.24) следует, что

**колебания заряда (напряжения) и тока сдвинуты на $\pi/2$.**

## 16.6. Переменный ток. Генератор переменного тока

***Электрический ток,*** изменяющийся со временем, называют ***переменным.*** Переменный электрический ток, изменяющийся со временем по гармоническому закону, представляет собой вынужденные колебания электрической цепи, происходящие с частотой $\omega$, совпадающей с частотой вынуждающей ЭДС.

Рассмотрим замкнутый контур площадью $S$, помещенный в однородное магнитное поле, индукция которого равна **B.** Контур равномерно вращается вокруг оси $OO'$ с угловой скоростью $\omega$ (рис. **16.6).**

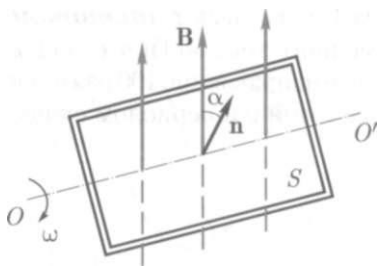


Рис. 16.6

Магнитный поток, пронизывающий контур, определяется формулой $\Phi = BS\cos\alpha$, где $\alpha$ — угол между вектором нормали n к плоскости контура и вектором **B.** При равномерном вращении контура угол поворота $\alpha$ изменяется со временем по закону $\alpha = \omega t$, а магнитный поток, пронизывающий контур, — по закону

$$\Phi = BS\cos\omega t. \tag{16.25}$$

В замкнутом контуре возникает $\mathscr{E} = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. (16.26)

Определим изменение потока $\Delta\Phi$ за малый промежуток времени $\Delta t$. В произвольно выбранный момент времени $t$ магнитный поток $\Phi_1 = BS\cos\omega t$. В момент времени $t + \Delta t$ магнитный поток $\Phi_2 = BS\cos\omega(t + \Delta t)$. Следовательно, $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = BS[\cos\omega(t+\Delta t) - \cos\omega t]$. Использовав формулу $\cos\omega(t+\Delta t) = \cos\omega t\cos\omega\Delta t - \sin\omega t\sin\omega\Delta t$ и учитывая, что поскольку $\Delta t$ очень мало, то $\cos\omega\Delta t \approx 1$, а $\sin\omega\Delta t \approx \omega\Delta t$, имеем

$$\Delta\Phi = -\omega BS\Delta t\sin\omega t. \tag{16.27}$$

Подставив (16.27) в (16.26), получим мгновенное значение ЭДС

$$\mathscr{E} = \omega BS\sin\omega t. \tag{16.28}$$

Как следует из **(16.28), ЭДС** индукции, возникающая в замкнутом контуре, при его равномерном вращении в однородном магнитном поле меняется со временем по закону синуса (рис. **16.7). ЭДС** индукции максимальна при $\sin\omega t = 1$, т. е. $\alpha = \omega t = \pi/2$. Величина $\mathscr{E}_0 = \omega BS$ называется ***амплитудным значением ЭДС индукции.***

Если такой контур замкнуть на внешнюю цепь, то по цепи пойдет ток, сила и направление которого изменяются.

Мгновенное значение переменного тока, текущего по активному сопротивлению ***R,*** определится по закону Ома:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{\mathscr{E}_0}{R}\sin\omega t = I_0\sin\omega t, \tag{16.29}$$

где $I_0 = \mathscr{E}_0/R$ — амплитудное значение силы тока. Ток по фазе совпадает с **ЭДС** (см. рис. **16.7).**

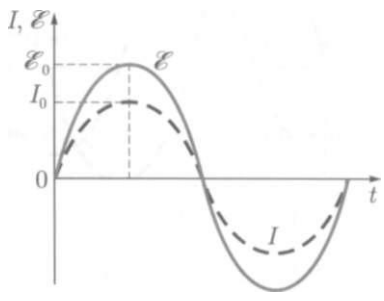


Рис. 16.7

Промежуток времени ***T,*** в течение которого переменная **ЭДС** совершает одно полное колебание, называется ***периодом переменного тока.*** Число полных колебаний, совершаемых

за 1 с, называют ***частотой переменного тока*** $\nu$. Например, частота переменного тока 50 Гц, т.е. 50 колебаний в секунду, означает, что ЭДС и ток меняют свое направление 100 раз в секунду. Между круговой частотой переменного тока $\omega$, частотой **у** и периодом существует следующая связь:

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

## 16.7. Емкостное и индуктивное сопротивления переменного тока

**Емкость в цепи переменного тока.** Пусть в цепь переменного тока включен конденсатор емкостью *C*. Напряжение и заряд на обкладках конденсатора изменяются по закону

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad Q = CU = CU_0 \sin \omega t. \tag{16.30}$$

Сила тока в цепи $I = \Delta Q/\Delta t$. Используя соотношение для скорости колеблющейся точки, можно утверждать, что ток — скорость изменения заряда — опережает колебания заряда по фазе на $\pi/2$:

$$I = C\omega U_0 \sin(\omega t + \pi/2) = I_0 \sin(\omega t + \pi/2). \tag{16.31}$$

Здесь введено обозначение $I_0 = C\omega U_0$. Из сравнения выражений (16.30) и (16.31) следует:

**переменный ток в цепи с емкостью опережает напряжение по фазе на** $\pi/2$ (рис. 16.8).

Это происходит потому, что при периодической зарядке конденсатора в цепи течет переменный ток, достигающий максимального значения в те моменты времени, когда напряжение равно нулю. Для такой цепи выполняется закон Ома не для ***мгновенных,*** а для *амплитудных* значений. Если цепь, в которую включен конденсатор, обладает сопротивлением $X_C$ называемым ***емкостным,*** то закон Ома имеет вид

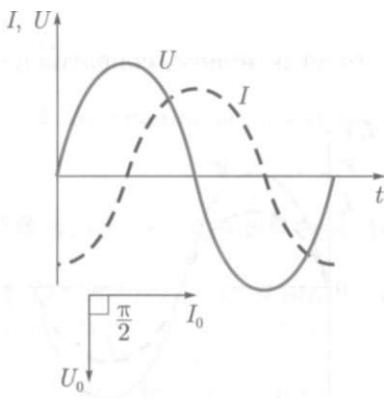



Рис. 16.8

$$I_0 = \frac{U_0}{X_C}. \tag{16.32}$$

Из сравнения формул (16.31) и (16.32) следует:

**емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости и круговой частоте переменного тока:**

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \tag{16.33}$$

**Индуктивность в цепи переменного тока.** Пусть по цепи, содержащей только индуктивность L, течет переменный ток вида $I = I_0 \sin \omega t$. Этот ток возбуждает в катушке ЭДС самоиндукции

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \qquad (16.34)$$

На основании аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями скорость изменения тока определяется по формуле, аналогичной **(14.6):**

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \omega I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

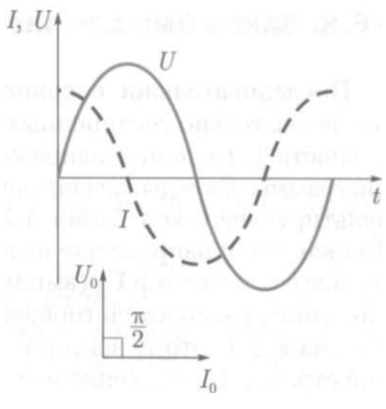


Рис. 16.9

Подставим это выражение в **(16.34),** обозначив

$$U_0 = \omega L I_0;$$

$$\mathscr{E} = -\omega L I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (16.35)$$

Напряжение на индуктивности уравновешивается ЭДС самоиндукции, т.е.

$$U = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Следовательно,

**переменный ток в цепи с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$ (рис. 16.9).**

Это происходит потому, что при увеличении силы тока ЭДС самоиндукции вызывает индукционный ток, препятствующий увеличению основного тока, вследствие этого сила тока достигает максимального значения позже, чем напряжение.

Записывая закон Ома для амплитудных значений в виде

$$I_0 = \frac{U_0}{X_L}, \qquad (16.36)$$

где $X_L$ — ***индуктивное сопротивление,*** и сравнивая формулы **(16.35)** и **(16.36),** можно сделать вывод:

**индуктивное сопротивление пропорционально индуктивности и круговой частоте:**

$$X_L = \omega L. \qquad (16.37)$$

Индуктивное $X_L$ и емкостное $X_C$ сопротивления в отличие от активного сопротивления $R$ называют ***реактивными сопротивлениями.***

## 16.8. Закон Ома для электрической цепи переменного тока

**Последовательное соединение** *R, C, L.* Если электрическая цепь состоит из последовательно соединенных активного сопротивления *R,* емкости *C* и индуктивности *L,* то полное напряжение в этой цепи можно определить из векторной диаграммы. Складывая векторы амплитуд напряжений, получаем амплитуду результирующего колебания. Расположим ось токов горизонтально (рис. 16.10). Так как ток и напряжение на активном сопротивлении *R* совпадают по фазе, то на диаграмме вектор $\mathbf{U}_R$ (амплитудное значение напряжения на активном сопротивлении) расположен горизонтально. Напряжение на емкости отстает от силы тока на $\pi/2$, поэтому вектор $\mathbf{U}_C$ повернут относительно тока на угол $\pi/2$ по часовой стрелке. Напряжение на индуктивности опережает ток на $\pi/2$, поэтому вектор $\mathbf{U}_L$ повернут относительно тока на угол $\pi/2$ против часовой стрелки. Как видно из рис. 16.10, векторы $\mathbf{U}_L$ и $\mathbf{U}_C$ направлены в противоположные стороны, поэтому при их сложении получаем вектор, модуль которого равен $|U_L - U_C|$ и направлен в сторону большего вектора. Выполняя последовательно сложение векторов, находим амплитудное значение вектора, результирующего напряжение $U_0$. Как видно из диаграммы, вектор $\mathbf{U}_0$ сдвинут относительно тока на угол $\varphi$.

**Значение утла $\varphi$ зависит от соотношения $U_L$ и $U_C$.**

В случае $U_L = U_C$ угол $\varphi = 0$. Ток и напряжение совпадают по фазе. Значение $U_0$ можно определить по теореме Пифагора:

$$U_0 = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Аналогично определяется полное сопротивление *Z* цепи переменного тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

*Закон Ома для амплитудных значений силы тока $I_0$ и напряжения $U_0$ в цепи переменного тока* имеет вид

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (16.38)$$

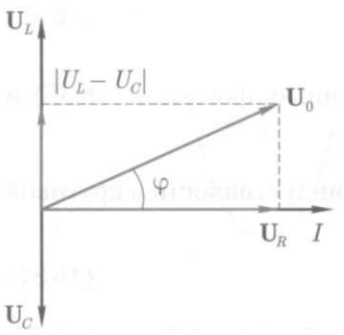



Рис. 16.10

**Амплитуда силы переменного тока пропорциональна амплитуде напряжения и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.**

**Резонанс напряжений.** Если индуктивное сопротивление цепи оказывается равным емкостному, то в цепи наблюдается резонанс, при этом реактивное сопротивление цепи равно нулю. Полное сопротив-

ление цепи равно активному сопротивлению. Тогда закон Ома [см. формулу (16.38)] примет вид

$$I_0 = \frac{U_0}{R}.$$

При резонансе сила тока в цепи оказывается наибольшей и по фазе совпадает с напряжением.

В электротехнике случай резонанса в цепи из последовательно соединенных сопротивлений, емкости и индуктивности получил название резонанса напряжений, так как напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе при резонансе могут значительно превышать напряжение на входе цепи.

## 16.9. Работа и мощность переменного тока

**Работа и мощность переменного тока.** Ранее было показано, что мощность постоянного электрического тока

$$P = IU = I^2R, \tag{16.39}$$

где $U$ — напряжение между концами участка цепи; $I$ — сила тока на этом участке, $R$ — активное сопротивление.

В случае переменного тока дело обстоит сложнее, так как сила переменного тока зависит не только от активного сопротивления цепи, но и от индуктивного и емкостного сопротивлений [см. (16.38)].

Если в цепи имеется конденсатор, то процесс прохождения через него тока представляет многократную перезарядку конденсатора. В этом случае, если пренебречь очень малыми потерями на нагревание диэлектрика в конденсаторе, прохождение тока через него не связано с выделением в нем энергии. В течение той четверти периода, когда происходит зарядка конденсатора, энергия запасается в нем, а когда конденсатор разряжается, он отдает в цепь запасенную энергию.

Аналогично дело обстоит и при наличии в цепи катушки индуктивности. Когда сила тока нарастает, в катушке создается магнитное поле, которое обладает запасом энергии. При уменьшении силы тока магнитное поле исчезает и запасенная в нем энергия возвращается к источнику тока. Следовательно, при наличии в цепи индуктивного и емкостного сопротивлений происходит обмен энергией между конденсатором или катушкой индуктивности и источником тока, в цепи расходуется мощность $P = IUk$, где $k = \cos\varphi$ — *коэффициент мощности цепи,* а $\varphi$ — сдвиг фазы между силой тока в цепи и напряжением между концами рассматриваемого участка. Таким образом,

$$P = IU\cos\varphi. \tag{16.40}$$

Данная формула отличается от (16.39) наличием дополнительного множителя $\cos\varphi$. Она показывает, что

**выделяемая в цепи переменного тока мощность зависит не только от силы тока и напряжения, но и от сдвига фаз между напряжением и силой тока.**

Если $\varphi = 90°$, то $\cos\varphi = 0$ и мощность равна нулю, как бы ни были велики напряжение и сила тока. В этом случае энергия, передаваемая за четверть периода от источника в цепь, равна энергии, передаваемой из цепи в источник в течение следующей четверти периода, т.е. вся энергия колеблется между источником и цепью.

**Средняя мощность переменного тока.** В течение малого промежутка времени переменный ток можно рассматривать как постоянный, поэтому в цепи с активным сопротивлением мгновенная мощность переменного тока

$$p_t = IU = I_0 U_0 \sin^2 \omega t,$$

где $I_0$ и $U_0$ — амплитудные значения силы тока и напряжения.

Определим среднюю мощность переменного тока за время, равное периоду ($t = T$). Известно, что среднее значение $\sin^2 \omega t$ за период равно $\frac{1}{2}$; учитывая это, получим формулу для средней мощности переменного тока

$$P_{ср} = \frac{I_0 U_0}{2}. \qquad (16.41)$$

**Действующие значения силы тока, напряжения, ЭДС.** *Действующей (эффективной) силой тока* $I_{эф}$ и *действующим (эффективным) напряжением* $U_{эф}$ называют такие силу и напряжение постоянного тока, при прохождении которого по той же цепи за то же время выделяется такое же количество теплоты, что и при данном переменном токе.

При этом мощность

$$P = I_{эф} U_{эф} = R I_{эф}^2 = \frac{U_{эф}^2}{R}. \qquad (16.42)$$

Сравнив эту формулу с выражениями для мощности переменного тока (16.41), получим

$$I_{эф} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}; \quad U_{эф} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \qquad (16.43)$$

Аналогично, действующее значение ЭДС переменного тока в цепи меньше его амплитудного значения:

$$\mathscr{E}_{эф} = \frac{\mathscr{E}_0}{\sqrt{2}}. \qquad (16.44)$$

Зная эффективные значения, можно вычислить среднюю мощность переменного тока по тем же формулам, что и мощность постоянного тока. Все вольтметры, предназначенные для переменного тока, показывают эффективные значения ЭДС и напряжения.

**Коэффициент мощности.** Анализируя формулу (16.40), можно сказать, что по этой формуле можно вычислять среднюю или активную мощность цепи переменного тока.

**I Коэффициент мощности** cos ϕ **характеризует потери энергии в цепи**

и, следовательно, является важнейшей характеристикой при проектировании линий на переменном токе. Если нагрузки в цепи имеют большие емкостные и индуктивные сопротивления, то $\varphi \neq 0$ и $\cos\varphi$ может быть много меньше единицы. В этих случаях для передачи нужной мощности необходимо увеличить силу тока $I_{эф}$, что приводит к выделению в цепи большого количества теплоты. Поэтому приходится либо увеличивать сечение проводов, либо распределять нагрузки так, чтобы $\cos\varphi$ был по возможности ближе к единице. При проектировании линий электропередач необходимо стремиться к повышению коэффициента мощности.

## 16.10. Генераторы тока

Генератор. *Генераторы* электрического тока — устройства, предназначенные для преобразования различных видов энергии (механической, химической, тепловой, световой и др.) в электрическую.

Работа современных генераторов основана на явлении *электромагнитной индукции.* На рис. 16.11, а изображена простейшая схема генератора переменного тока. При вращении рамки в магнитном поле в ней возникает переменная ЭДС индукции. Если цепь замкнуть, то в цепи потечет переменный ток. Для соединения рамки с внешней цепью служат *к о л ь ц а ,* укрепленные на одной оси с рамкой. С помощью неподвижных скользящих контактов-щеток кольца соединяются с внешней цепью. За один оборот рамки полярность щеток меняется дважды. Для увеличения напряжения, снимаемого с клемм генератора, на рамки наматывают не один, а много витков. Во всех промышленных генераторах переменного тока витки, в которых индуцируется переменный ток, устанавливают неподвижно, а вращается магнитная система. Неподвижную часть генератора называют *статором,* а подвижную — *ротором.* Если ротор вращать с помощью внешней силы, то вместе с ротором будет вращаться и магнитное поле, создаваемое им, при этом в проводниках статора индуцируется ЭДС.

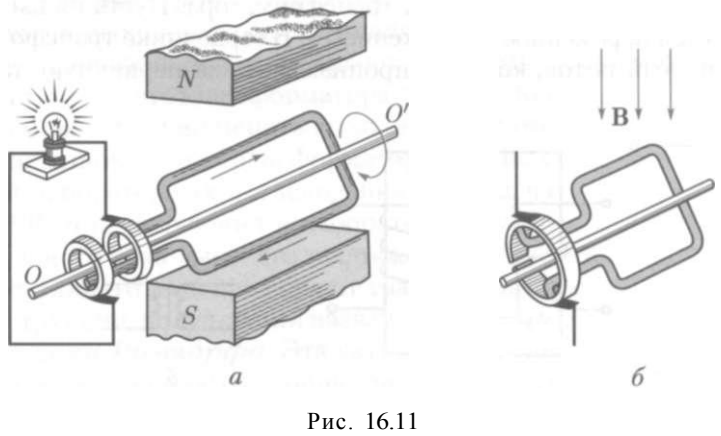



Рис. 16.11

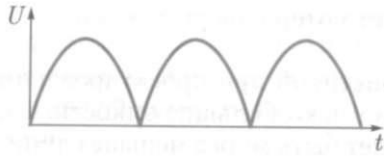



Рис. 16.12

Типы генераторов. Электрогенераторы, работающие с гидротурбинами, называют *гидрогенераторами*, а работающие с паровыми турбинами — *турбогенераторами*.

В настоящее время статоры генераторов изготовляют из тонких изолированных листов электротехнической стали, имеющих узкую петлю гистерезиса, набранных в пакет и скрепленных болтами. Ротор собирают из толстых листов и насаживают на общий вал с турбиной.

В генераторе переменного тока ЭДС дважды за один оборот меняет направление. Для получения постоянного по направлению тока применяют специальное устройство, называемое *коллектором*. Простейший коллектор представляет собой два изолированных друг от друга полукольца, к которым присоединяются концы витка (рис. 16.11, *б*). В те моменты, когда ток в витке меняет направление, полукольца меняют щетки. Во внешней цепи протекает ток одного направления. На рис. 16.12 показано, как изменяется напряжение, снимаемое с этого коллектора. Такой генератор дает пульсирующий ток; его направление постоянно, но сила изменяется. Если вместо одного витка одновременно вращать большое число витков, то можно получить ток, неизменный не только по направлению, но и по значению. Коллектор подобного типа составлен из большого количества изолированных друг от друга пластин.

## 16.11. Трансформаторы

Трансформатор. *Трансформатор* представляет собой выполненный из мягкого ферромагнетика сердечник замкнутой формы, на котором находятся две обмотки: первичная и вторичная (на рис. 16.13, *а* обмотки имеют различное число витков). Концы первичной обмотки, называемые *входом* трансформатора, подключаются к сети питающего переменного тока. Концы вторичной обмотки, называемые *выходом* трансформатора, подключаются к потребителю. На рис. 16.13, б дано условное обозначение трансформаторов на радиосхемах.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Рассмотрим принцип действия трансформатора. Пусть на вход трансформатора подается переменное напряжение $U_1$. В сердечнике трансформатора возникает магнитный поток, который пронизывает как первичную, так и вторич-

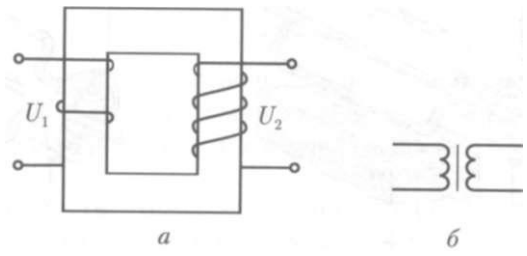



Рис. 16.13

ную обмотки трансформатора. В первичной и вторичной обмотках соответственно возникают ЭДС самоиндукции

$$\mathscr{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad \mathscr{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $N_1$ и $N_2$ — числа витков первичной и вторичной обмоток.

Напряжения на входе и выходе трансформатора будут соответственно равны

$$U_1 = I_1 R_1 - \mathscr{E}_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \tag{16.45}$$

$$U_2 = I_2 R_2 - \mathscr{E}_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \tag{16.46}$$

где $R_1$ и $R_2$ — соответственно сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; $I_1$ и $I_2$ — силы токов, протекающих по первичной и вторичной обмоткам.

Рассмотрим случай, когда вторичная обмотка разомкнута, т.е. $I_2 = 0$ *(ХОЛОСТОЙ ХОД).* Технические трансформаторы конструируются таким образом, чтобы выполнялось условие $I_1 R_1 \ll \mathscr{E}_1$, т. е. обмотки трансформатора обладают небольшим активным сопротивлением, но большой индуктивностью.

Разделив почленно уравнение (16.45) на уравнение (16.46), получим

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \tag{16.47}$$

Напряжение на концах первичной обмотки трансформатора так относится к напряжению на концах его вторичной обмотки, как число витков первичной обмотки относится к числу витков вторичной обмотки.

Коэффициент трансформации. Отношение $k = N_1/N_2$ называют *коэффициентом трансформации.* Если на вторичной обмотке витков больше, трансформатор называют *повышающим* $(N_2 > N_1)$, если меньше — *понижающим* $(N_2 < N_1)$.

Если трансформатор нагружен, то падением напряжения во вторичной обмотке по сравнению с ЭДС индукции пренебрегать нельзя, поэтому выражение (16.46) имеет более сложный характер.

Типы трансформаторов. Существуют также конструкции трансформаторов, когда часть первичной обмотки является вторичной или наоборот (рис. 16.14). Такие трансформаторы называют *автотрансформаторами.* Если один из контактов автотрансформатора сделать подвижным, то можно плавно менять выходное напряжение. Один из типов таких трансформаторов, используемый при лабораторных исследованиях, имеет название ЛАТР. Для получения в лабораторных условиях переменного тока высокого напряжения за счет энергии постоянного тока применяют трансформатор особой конструкции, получивший название *индукционной катушки Румкорфа.* Эта катушка позволяет получить между концами вторичной обмотки напряжение около 10 кВ.

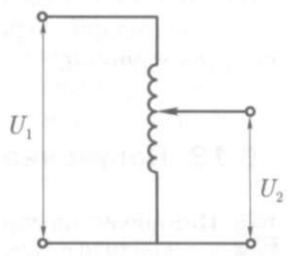



Рис. 16.14

Во время работы трансформаторы нагреваются, поэтому их необходимо охлаждать. Маломощные трансформаторы охлаждают воздухом, мощные — минеральным трансформаторным маслом. Для этой цели сердечник с обмотками погружают в масло, а снаружи корпуса делают масляные радиаторы, через которые пропускают либо холодный воздух, либо воду.

Мощность современных трансформаторов достигает 1 ООО МВт, напряжение повышающих обмоток 750 кВ. При таких параметрах размеры стального сердечника и обмоток велики и трансформаторы представляют собой грандиозные сооружения массой в сотни тонн.

Трансформатор является наиболее современным преобразователем энергии, коэффициент полезного действия мощных трансформаторов достигает 94-99 %.

## 16.12.* Токи высокой частоты

Токи, частота которых 50-10 ООО Гц, называют *токами низкой частоты.* Токи, частота которых более 10 ООО Гц, называют *токами высокой частоты.*

Если в однородном проводнике с постоянным поперечным сечением имеется постоянный ток, то плотность тока одинакова в различных точках сечения проводника. Если протекает переменный ток, то в этом случае плотность тока оказывается не одинаковой по сечению: она наибольшая на поверхности и наименьшая на оси проводника. Ее неравномерность тем больше, чем толще проводник и чем больше частота переменного тока, а при очень больших частотах ток практически существует только в тонком поверхностном слое. Это явление получило название ***скин-эффекта*** (от англ. «скин» — кожа). Указанное явление объясняется возникновением вихревого электрического поля электромагнитной индукции.

Для таких токов сплошные провода можно заменять тонкостенными трубками-волноводами, которые покрывают хорошо проводящим слоем серебра, так как их сопротивление практически обусловлено только поверхностным слоем. Это нашло широкое применение в радиотехнике сверхвысоких частот.

В настоящее время токи высокой частоты используются для быстрого прогрева и плавления металлов, для поверхностной закалки стальных изделий, для прогрева диэлектриков, сушки древесины, пищевых продуктов, в медицине — для прогревания пораженных органов человеческого тела.

Остановимся на примере поверхностной закалки стальных изделий. При достаточно высокой частоте токи сосредоточиваются у поверхности закаливаемой детали, за короткое время ее прогревают, внутри же металл не достигает температуры закалки. Поверхность детали после закалки приобретает требуемую твердость, благодаря сохранившемуся внутри незакаленному металлу деталь не становится хрупкой.

## 16.13. Получение, передача и распределение электроэнергии

**Историческая справка.** Первый «План электрификации РСФСР» был разработан в конце 1920 г. Государственной комиссией по электрификации России — сокращенно ГОЭЛРО.

За 10-15 лет по плану ГОЭЛРО намечалось соорудить 10 гидроэлектростанций общей мощностью 640 МВт и 20 тепловых электростанций общей мощностью 1,11 ГВт. По плану гидроэлектростанции должны были объединяться в энергетические системы.

Энергетическая система — это объединение отдельных электростанций между собой линиями высокого напряжения. В энергетической системе наилучшим образом разрешаются вопросы равномерной загрузки отдельных станций и бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей.

Первые энергетические объединения в нашей стране были созданы по плану ГОЭЛРО в 1921 г. в Москве (МОГЭС) и Ленинграде («Электроток»).

Развитие государства тесно связано с развитием топливно-энергетического комплек- са. Главным источником энергии являются электростанции.

Первое место по выработке электроэнергии занимают тепловые электростанции, работающие на угле, нефтепродуктах и другом топливе. КПД тепловых электрических станций порядка 40 % и около 70 % у станций с теплоэлектроцентралью (ТЭЦ). На втором месте по производству электроэнергии находятся гидравлические электростанции (ГЭС), использующие энергию падающей воды. КПД этих станций достигает 80 - 90 %.

Атомные электростанции играют исключительно важную роль в тех районах, где нет гидроресурсов, мало топлива, а также при освоении необжитых территорий.

В нашей стране разработаны передвижные ядерные энергоустановки.

**Получение электроэнергии.** Первые генераторы постоянного тока были созданы в 50-х годах XIX в., уже в 70-х годах началось их промышленное производство.

В настоящее время уровень производства и потребления энергии является важнейшим показателем развития производительных сил общества. Главную роль при этом играет электроэнергия - самая универсальная и удобная для использования форма энергии.

Производство электроэнергии осуществляется на трех типах электростанций: тепловые (ТЭС и ТЭЦ), гидро- (ГЭС) и атомные (АЭС).

Источником энергии на ТЭС и ТЭЦ (теплоэлектроцентраль) служат уголь, газ, торф, мазут и т. д.

Источником энергии на ГЭС служит потенциальная энергия воды, поднятой плотиной.

Источником энергии АЭС является ядерное топливо, которое размещено в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) ядерного реактора.

**Передача и распределение электроэнергии.** Передавать ток низкого напряжения (100-200 В) на расстояние более 2 км из-за больших потерь в проводах невыгодно. Для уменьшения потерь необходимо увеличивать напряжение. Но ток высокого напряжения нельзя подводить в дома, на фабрики и заводы, так как прикосновение к проводу, находящемуся под высоким напряжением, опасно для жизни людей. Эта проблема может быть решена, если иметь устройство, которое могло бы ток высокого напряжения преобразовывать в ток низкого напряжения. Для постоянного тока такие преобразования связаны со многими трудностями. Напряжение же переменного тока можно легко изменить с помощью устройства, получившего название ***трансформатор.***

Схема передачи переменного тока на большие расстояния изображена на рис. 16.15. Ток низкого напряжения, вырабатываемый электрогенератором, подается на трансформатор. Трансформатор преобразует ток низкого в ток высокого напряжения, далее по линии электропередач ток поступает к месту по-

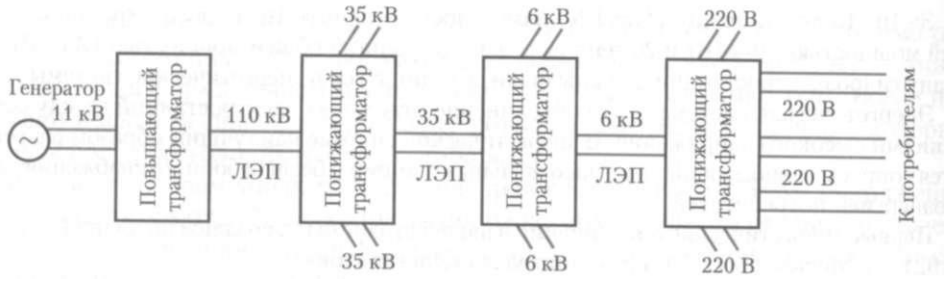



Рис. 16.15

требления электроэнергии. В месте потребления электроэнергии трансформаторы преобразуют ток высокого напряжения в ток низкого напряжения. После преобразования электроэнергия поступает к потребителю.

С потребителями электроэнергии электростанции связаны либо воздушными, либо кабельными линиями электропередач (ЛЭП). Воздушные линии электропередачи — это провода, подвешенные на изоляторах к стальным или железобетонным опорам.

Согласно закону Джоуля - Ленца, потери, возникающие при передаче электроэнергии, зависят от силы тока. По мере увеличения напряжения при одной и той же мощности сила тока в линии уменьшается; следовательно, уменьшаются и потери. Необходимость передачи электроэнергии на большие расстояния под высоким напряжением и при больших передаваемых мощностях приводит к тому, что оборудование ЛЭП становится дорогим, но все же на это приходится идти, так как мощные гидравлические и тепловые электростанции не всегда расположены вблизи крупнейших промышленных районов.

В городах ток высокого напряжения передается по кабельным линиям электропередач, затем его распределяют по понизительным трансформаторным подстанциям.

Перспективными являются кабельные линии передачи больших мощностей, расположенные в трубах, заполненных для уменьшения потерь жидкими водородом (при температуре 20 К) или гелием (4 К). При таких низких температурах сопротивление алюминиевых или медных кабельных проводов уменьшается в тысячи раз, пропорционально сопротивлению уменьшаются потери при передаче электроэнергии.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Электромагнитные колебания* — периодические взаимосвязанные изменения зарядов, токов, напряженности электрического и индукции магнитного полей.

Простейшей системой, в которой наблюдаются свободные электромагнитные колебания, является колебательный контур. Период свободных гармонических колебаний в идеальном контуре определяется *формулой Томсона*

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Полная энергия электромагнитного поля колебательного контура равна

$$W = W_{эл} + W_{м} = {}^{1}/_{2}\omega_0^2 L Q_0^2.$$

## Примеры решения задач

• **Задача 1**. В колебательном контуре, состоящем из индуктивности и емкости, максимальный ток в катушке 1 А, а максимальное напряжение на конденсаторе 1 кВ. Через время $1{,}57 \cdot 10^{-6}$ с, считая от того момента, когда напряжение было равно нулю, энергия в катушке становится равной энергии в конденсаторе. Вычислить период колебаний контура, энергию контура. (Омическое сопротивление считать пренебрежимо малым.)

**Дано:** $I_0 = 1$ А; $U_0 = 1\,000$ В; $t = 1{,}57 \cdot 10^{-6}$ с; $W_{эл} = W_м$.

**Найти:** $T$; $W$.

**Решение.** Найдем период колебаний контура. По условию задачи в заданный момент энергия магнитного поля катушки равна энергии электрического поля в конденсаторе: $^1/_2 LI^2 = {}^1/_2 CU^2$, где ***L*** — индуктивность контура; $I$ — ток в контуре; $C$— емкость конденсатора; $U$— напряжение на пластинах конденсатора. Сумма этих энергий определяет полную энергию контура:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 + \frac{1}{2} CU^2 = CU^2. \quad (1)$$

Выразим полную энергию контура через максимальное напряжение $U_0$:

$$W = \frac{1}{2} CU_0^2. \quad (2)$$

Из (1) и (2) определим, что

$$U = U_0 \sqrt{2}. \quad (3)$$

Используем уравнение гармонического колебания напряжения (отсчет ведем от напряжения, равного нулю)

$$U = U_0 \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где $T$ — период колебаний; $t$ — время. С учетом (3) получим $\frac{2\pi}{T} t = \frac{\pi}{4}$, откуда

$$T = 8t.$$

Вычислим теперь полную (максимальную) энергию контура. Она равна максимальной электрической энергии конденсатора (энергия магнитного поля при этом равна нулю) [см. формулу (2)] или максимальной энергии магнитного поля (энергия электрического поля равна нулю):

$$W = \frac{1}{2} LI_0^2, \quad (4)$$

где $I_0$ — максимальная сила тока в катушке. Из формулы Томсона (16.4) находим

$$\sqrt{LC} = \frac{T}{2\pi}. \quad (5)$$

Перемножим (2) и (4) и извлечем корень:

$$W = \frac{1}{2} I_0 U_0 \sqrt{LC}.$$

С учетом (5) получим

$$W = \frac{I_0 U_0 T}{4\pi}.$$

**Вычисления:**

$$T = 8 \cdot 1{,}57 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 12{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$W = \frac{1 \text{ А} \cdot 10^3 \text{ В} \cdot 12{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{4 \cdot 3{,}14} = 0{,}001 \text{ Дж}.$$

**Ответ:** $T = 12{,}6 \cdot 10^{-6}$ с; $W = 0{,}001$ Дж.

● **Задача 2.** Рамка, содержащая 100 витков площадью поперечного сечения витка 400 см$^2$, вращается в магнитном поле с индукцией $B = 12{,}56 \cdot 10^{-3}$ Тл. Определить ЭДС индукции через 0,01 с после начала движения рамки, если амплитудное значение ЭДС равно 2,5 В.

**Дано:** $N = 100$; $S = 400$ см$^2 = 4 \cdot 10^{-2}$ м$^2$; $B = 12{,}56 \cdot 10^{-3}$ Тл; $t = 0{,}01$ с; $\mathscr{E}_0 = 2{,}5$ В.

**Найти:** $\mathscr{E}$.

**Решение.** ЭДС индукции рамки, вращающейся в однородном магнитном поле с напряженностью $H$ и постоянной угловой скоростью $\omega$, изменяется по закону

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_0 \sin \omega t. \qquad (1)$$

Максимальное (амплитудное) значение ЭДС переменного тока [см. (16.26)]

$$\mathscr{E}_0 = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = BSN\omega, \qquad (2)$$

Из (2) определяем $\omega = \dfrac{\mathscr{E}_0}{BSN}$.

**Вычисления:**

$$\omega = \frac{2{,}5 \text{ В}}{12{,}56 \cdot 10^{-3} \text{ Тл} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 10^2} = 49{,}8 \text{ рад/с}.$$

При данном значении $\omega$ фаза через $t = 0{,}01$ с составит

$$\omega t = 49{,}8 \text{ рад/с} \cdot 0{,}01 \text{ с} = 0{,}498 \text{ рад} = 28^\circ 30'.$$

По формуле (1) определяем мгновенное значение ЭДС индукции через 0,01 с:

$$\mathscr{E} = 2{,}5 \text{ В} \cdot \sin 28^\circ 30' = 1{,}2 \text{ В}.$$

**Ответ:** $\mathscr{E} = 1{,}2$ В.

● **Задача 3.** Трансформатор повышает напряжение с 220 до 3 000 В. Во вторичной обмотке протекает ток 0,1 А. Определить силу тока в первичной обмотке, если КПД трансформатора составляет 96 %.

**Дано:** $U_1 = 220$ В; $U_2 = 3\,000$ В; $I_2 = 0{,}1$ А; $\eta = 0{,}96$.
**Найти:** $I_1$.

Решение. КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1},$$

**откуда**

$$I_1 = \frac{I_2 U_2}{\eta U_1}.$$

Вычисления:

$$I_1 = \frac{0{,}1\ \text{А} \cdot 3\,000\ \text{В}}{0{,}96 \cdot 220\ \text{В}} = 1{,}4\ \text{А}.$$

Ответ: $I_1 = 1{,}4$ А.

• Задача 4. Определить сопротивление вторичной обмотки трансформатора, если при включении первичной обмотки в сеть с напряжением 220 В во вторичной обмотке течет ток 5 А, а напряжение на ее концах составляет 12 В. Коэффициент трансформации равен 0,10. Потерями энергии в первичной обмотке пренебречь.

Дано: $U_1 = 220$ В; $I_2 = 5$ А; $U_2 = 12$ В; $k = 0{,}10$.

Найти: $r_2$.

Решение. Если потерями в первичной обмотке можно пренебречь, то ЭДС индукции $\mathscr{E}_1$ в первичной обмотке равна напряжению: $\mathscr{E}_1 = U_1$. Зная коэффициент трансформации, можно определить ЭДС индукции вторичной обмотки: $k = \mathscr{E}_2/\mathscr{E}_1$. Отсюда $\mathscr{E}_2 = k\mathscr{E}_1 = kU_1$. Для вторичной обмотки, согласно закону Ома,

$$\mathscr{E}_2 = I_2 r_2 + U_2, \quad \text{или} \quad I_2 r_2 = \mathscr{E}_2 - U_2 = kU_1 - U_2.$$

**Тогда**

$$r_2 = \frac{kU_1 - U_2}{I_2}.$$

**Вычисления:**

$$r_2 = \frac{0{,}01 \cdot 220\ \text{В} - 12\ \text{В}}{5\ \text{А}} = 2\ \text{Ом}.$$

**Ответ:** $r_2 = 2$ **Ом.**

### *Задачи для самостоятельного решения*

1. Колебательный контур имеет емкость 26 пФ и индуктивность 0,12 мГн. Какой длины электромагнитные волны в вакууме создает этот контур, когда в нем происходят колебания с собственной частотой?

2. Катушка индуктивностью $3 \cdot 10^{-5}$ Гн присоединена к плоскому конденсатору с площадью пластин 100 см$^2$ и расстоянием между ними 0,1 мм. Чему равна диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами, если контур резонирует на волну длиной 750 м?

**3.** Какой индуктивности катушку надо включить в колебательный контур, чтобы при емкости 2 мкФ получить звуковую частоту 1 ООО Гц? Сопротивлением контура пренебречь.

**4.** Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки индуктивности. Вычислить энергию контура, если максимальный ток в катушке равен 1,2 А, максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора составляет 1 200 В, частота колебаний контура $10^5$ с$^{-1}$ (потерями пренебречь.)

5. **Решить** предыдущую задачу при условии, что дана не частота, а период колебаний контура, равный $10^{-6}$ с.

6. Максимальная энергия магнитного поля колебательного контура равна 10 $^{3}$ Дж при силе тока 0,8 А. Чему равна частота колебаний контура, если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора составляет 1 200 В?

**7.** По условию предыдущей задачи найти не частоту, а период колебаний контура.

**8.** Период колебаний контура, состоящего из индуктивности и емкости, составляет 10"$^{5}$ с. Чему равна максимальная сила тока в катушке, если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора составляет 900 В? Максимальная энергия электрического поля равна $9 \cdot 10^{-4}$ Дж.

9. Виток проволоки площадью 4 000 см$^{2}$ равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0,20 Тл. Определить наибольшее значение ЭДС, если частота вращения витка равна 50 с$^{-1}$.

**10.** В однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл равномерно вращается прямоугольная рамка размером 20 х 30 см из 10 витков проволоки. Найти амплитудное значение ЭДС индукции, если число оборотов рамки в минуту равно 120.

**11.** Определить КПД трансформатора, если он повышает напряжение от ПО до 500 В. В первичной обмотке протекает ток 2,4 А, во вторичной — 0,5 А.

**12.** Определить сопротивление вторичной обмотки трансформатора с коэффициентом трансформации 10, если при включении первичной обмотки в сеть с напряжением 24 В во вторичной обмотке идет ток 2 А, а ее напряжение равно 200 В. Потерями энергии в первичной обмотке пренебречь.

**13.** Первичная катушка трансформатора имеет 10$^{3}$ витков. На ее сердечник надеты четыре вторичные катушки с числами витков 250, 500,1 500,10 000. Какое напряжение возникает на зажимах каждой из этих катушек, если на первичную подать напряжение 120 В?

**Ключевые слова:** *свободные электромагнитные колебания, вынужденные электромагнитные колебания, переменный ток, емкостное сопротивление, индуктивное сопротивление, закон Ома для цепи переменного тока, мощность переменного тока, генератор, трансформатор.*

Глава 17

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

## 17.1. Электромагнитное поле как особый вид материи

Взаимосвязь электрического **и** магнитного полей. В 60-х годах XIX в. Дж. Максвелл разработал теорию электромагнитного поля, согласно которой *переменное электрическое поле порождает переменное магнитное.* Эти поля имеют вихревой характер: силовые линии порождающего поля концентрически охвачены силовыми линиями порождаемого поля. В результате образуется система «переплетенных» между собой электрических и магнитных полей. Некоторое представление о характере переменного электромагнитного поля может

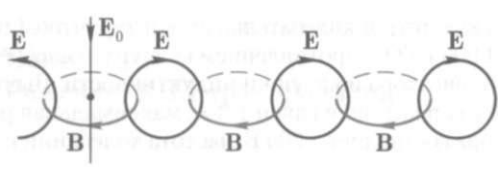



Рис. 17.1

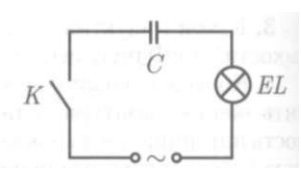



Рис. 17.2

дать рис. 17.1, являющийся как бы мгновенным снимком этого поля. Прямая линия $\mathbf{E}_0$ изображает первичное переменное электрическое поле, окружности **B** в горизонтальной плоскости — вторичные переменные магнитные поля, а окружности **E** в вертикальной плоскости — вторичные переменные электрические поля.

**Магнитное поле возникает вокруг проводников, по которым текут токи. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, откуда следует, что электрические токи, порождающие магнитное поле, также должны быть замкнуты.**

Если по проводнику протекает постоянный ток, т. е. ток проводимости, то линии тока замкнуты.

Рассмотрим случай, когда в электрическую цепь включен конденсатор. Между обкладками конденсатора заряды перемещаться не могут. Это приводит к тому, что линии тока обрываются у поверхности обкладок конденсатора, ток проводимости, текущий по проводнику, соединяющему обкладки конденсатора, оказывается разомкнутым. Если напряжение источника тока является переменным, то при замыкании ключа $S$ (рис. 17.2) конденсатор попеременно заряжается и разряжается, в цепи идет ток, лампочка, включенная в эту цепь, горит. Это свидетельствует о том, что линии тока замкнуты. Между обкладками конденсатора изменяющийся электрический заряд создает переменное электрическое поле, которое Максвелл назвал током смещения.

Ток смещения — переменное электрическое поле, подобно току проводимости, порождает магнитное поле, силовые линии которого всегда замкнуты.

Таким образом,

**электрическое и магнитное поля взаимосвязаны: изменение одного из них порождает другое. Эти поля — проявление единого электромагнитного поля.**

**Энергия электромагнитного поля и его материальность.** Электромагнитное поле — особая форма материи. Оно существует реально, т. е. независимо от нас, от наших знаний о нем. Неотъемлемой характеристикой материи является энергия. Под энергией электромагнитного поля подразумевается сумма энергий электрического и магнитного полей:

$$W = W_{эл} + W_{м}.$$

Соответственно плотность энергии электромагнитного поля складывается из плотностей энергий электрического и магнитного полей:

$$\omega = \omega_{эл} + \omega_{м} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0}. \qquad (17.1)$$

## 17.2. Электромагнитные волны

Электромагнитные **волны.** В общем случае утверждать, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, нельзя. Предположим, что какой-то заряд, покоящийся относительно Земли, создает неоднородное электрическое поле, магнитного поля вокруг заряда нет. Если наблюдатель находится в системе координат, движущейся относительно Земли, то неоднородное электрическое поле, созданное этим зарядом, для него уже переменно во времени. Это переменное электрическое поле порождает магнитное. Таким образом, для этого наблюдателя существуют одновременно и электрическое и магнитное поля.

Индукция **B** магнитного поля, возникающего в результате изменения электрического, пропорциональна скорости изменения напряженности электрического поля: $B \approx \Delta E/\Delta t$. Напряженность **E** электрического поля, возникающего в результате изменения магнитного поля, согласно закону Фарадея, пропорциональна скорости изменения индукции магнитного поля: $E \approx \Delta B/\Delta t$.

Если в какой-либо точке пространства возбудить вихревое электрическое поле, то силовые линии возникающего переменного магнитного поля охватывают силовые линии электрического поля концентрическими окружностями. Меняющееся магнитное поле порождает электрическое поле, силовые линии которого охватывают силовые линии магнитного поля, и т.д.

Значит, переменные электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, они поддерживают друг друга и могут существовать независимо от источника, их породившего, распространяясь в пространстве в виде электромагнитной волны. Другими словами,

> электромагнитные **волны** — это распространяющееся в пространстве **переменное** электромагнитное поле.

Из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны являются поперечными: векторы **E** и **B** взаимно-перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору v — скорости распространения волны. Кроме того, в электромагнитной волне векторы **E** и **B** всегда колеблются в одинаковых фазах, одновременно достигают максимума, одновременно обращаются в нуль (рис. 17.3).

Таким образом,

> электромагнитная волна является волной поперечной.

Скорость распространения волны. Согласно теории Максвелла, скорость распространения электромагнитных волн — величина конечная. Она определяется электрическими и магнитными свойствами среды, в которой распространяется электромагнитная волна:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}}, \qquad (17.2)$$

где $\varepsilon_0$ и $\mu_0$ — электрическая и магнитная постоянные; $\varepsilon$ и ц. — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

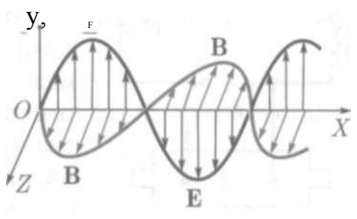


Рис. 17.3

Если электромагнитная волна распространяется в вакууме, то $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$. Вычислим скорость распространения электромагнитной волны в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \Phi/\text{м} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Гн}/\text{м}}} = 3 \cdot 10^8\ \text{м}/\text{с}.$$

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости света в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Длина волны. Расстояние, на которое перемещается электромагнитная волна за время, равное одному периоду колебания, называется *длиной ВОЛНЫ.*

Если $v$ — скорость распространения электромагнитной волны в однородной среде, Т—ее период, $\nu$ —частота, а $\lambda$ —длина, то $\lambda = vT$ или $\lambda = v/\nu$. Для вакуума $\lambda_0 = cT$ или

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}. \qquad (17.3)$$

Так как скорость волны зависит от $\varepsilon$ и $\mu$ среды, то при переходе волны из одной среды в другую изменяются $v$ и $\lambda$, а частота колебаний остается прежней.

Если волна переходит из вакуума в среду с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$ и магнитной $\mu$, то длина волны уменьшается:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

где $\lambda_0$ — длина волны в вакууме.

## 17.3. Вибратор Герца. Открытый колебательный контур

Открытый колебательный контур. В закрытом колебательном контуре электромагнитное поле локализовано в той области пространства, где расположен этот контур, поэтому электромагнитных волн этот контур не излучает. Использование колебательного контура для излучения электромагнитных волн было предложено Г. Герцем. Он ввел в колебательный контур (рис. 17.4) искровой промежуток *1,* на который подавалось переменное напряжение со вторичной обмотки индукционной катушки *2.*

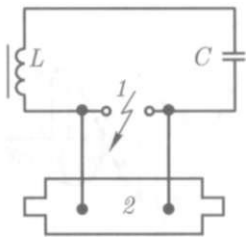


Рис. 17.4

Когда разность потенциалов между обкладками конденсатора становилась достаточно большой, в искровом промежутке возникала искра, замыкающая контур и вместе с тем отключающая («закорачивающая») индукционную катушку *2.* В это время в контуре совершалась серия электромагнитных колебаний. При исчезновении искры контур размыкался и колебания прекращались. Но тогда индукционная катушка вновь заряжала конденсатор; в искровом

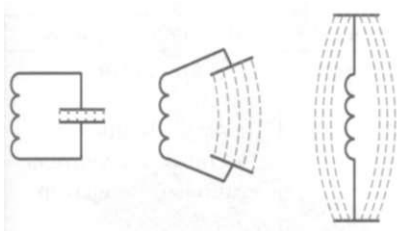


Рис. 17.5

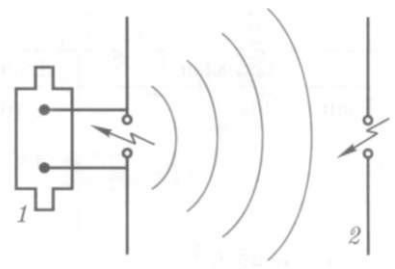



Рис. 17.6

промежутке вновь проскакивала искра, а в контуре совершалась повторная серия электромагнитных колебаний и т. д.

**В** дальнейшем, чтобы увеличить частоту колебаний и тем самым повысить интенсивность электромагнитного излучения контура, Герц уменьшил индуктивность и емкость контура, раздвинув пластины конденсатора (рис. 17.5). Наконец, он реализовал так называемый ***открытый колебательный контур (вибратор Герца)*** — прямолинейный проводник с искровым промежутком посередине, обладающий очень малой емкостью и индуктивностью (*1* на рис. 17.6). Так как $\nu = 1/T$ и '$T = 2\pi\sqrt{LC}$, то с уменьшением ***L*** и Счастота колебаний растет. **В** этом вибраторе переменное электрическое поле уже не было сосредоточено внутри конденсатора, а окружало вибратор снаружи, что существенно повышало интенсивность электромагнитного излучения. Электромагнитное излучение открытого вибратора *1* (рис. 17.6) Герц регистрировал с помощью второго вибратора *2,* настроенного в резонанс с излучателем (резонатора). Когда электромагнитные волны достигали резонатора, в нем возникали электромагнитные колебания, сопровождающиеся проскакиванием искры через искровой промежуток.

Возможность обнаружения электромагнитных волн указывает на то, что они переносят энергию.

Свойства электромагнитных волн. Пользуясь вибратором и резонатором, Герц установил, что электромагнитные волны ***обладают свойствами, присущими любым другим волнам:*** отражаются от преград (металлических), преломляются на границе двух сред (диэлектрических), интерферируют друг с другом.

С помощью вибратора Герцем были получены плоские волны длиной от 0,6 до 10 м и показано, что электромагнитные волны являются поперечными. Он получил стоячие электромагнитные волны и с их помощью определил скорость распространения электромагнитных волн, которая совпала со скоростью света.

Исследованиями русских ученых П. Н. Лебедева, А. А. Глаголевой-Аркадьевой и других было доказано:

все свойства электромагнитных волн совпадают со свойствами света.

Из этого следовал очень важный вывод:

видимый свет представляет собой электромагнитное излучение.

Таблица 17.1

| Излучение | Длина волны, м | Частота волны, Гц | Источник излучения |
|---|---|---|---|
| Радиоволны | $10^3 - 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$ | Колебательный контур<br>Вибратор Герца<br>Массовый излучатель<br>Ламповый генератор |
| Световые волны: | | | |
| инфракрасное излучение | $5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$ | $6 \cdot 10^{11} - 3{,}75 \cdot 10^{14}$ | Лампы |
| видимый свет | $8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$ | $3{,}75 \cdot 10^{14} - 7{,}5 \cdot 10^{14}$ | |
| ультрафиолетовое излучение | $4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$ | $7{,}5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$ | Лазеры |
| Рентгеновское излучение | $2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$ | $1{,}5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$ | Трубки Рентгена |
| Гамма-излучение | Меньше $6 \cdot 10^{-12}$ | Больше $5 \cdot 10^{19}$ | Радиоактивный распад<br>Ядерные процессы<br>Космические процессы |

Дальнейшие исследования подтвердили, что не только видимый свет, но и инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения имеют электромагнитную природу, т. е. электромагнитные волны имеют очень широкий диапазон частот или длин волн.

Обладая широким диапазоном частот или длин волн, электромагнитные волны отличаются друг от друга по способам их генерации и регистрации, а также по своим свойствам. Поэтому электромагнитные волны делятся на несколько видов: радиоволны, световые волны, рентгеновское и гамма-излучение (табл. 17.1). Следует отметить, что границы между различными видами электромагнитных волн довольно условны. Электромагнитные волны всех видов распространяются в пространстве с одной и той же скоростью.

## 17.4. Изобретение радио А. С. Поповым. Понятие о радиосвязи

**Первый** радиоприемник.* Идея использования электромагнитных волн для передачи сигналов на большие расстояния была впервые высказана в 1889 г. А. С. Поповым. Им же в 1895 г. был построен и продемонстрирован в действии первый радиоприемник, основанный на релейной схеме: ничтожно малая энергия электромагнитных волн с помощью специального устройства — ***когерера*** — использовалась для управления местным источником энергии ***(электробатареей),*** питающим регистрирующий аппарат *(электрозвонок).* Уже в 1896 г. Попов осуществил радиотелеграфную связь на расстоянии 250 м, а в 1899 г., применив изобретенную им антенну, — на расстоянии 50 км. В 1900 г. IV Всемирный электротехнический конгресс присудил А.С.Попову Почетный диплом и Золотую медаль за изобретение радио. Так началась эра радио.

Схема первого радиоприемника изображена на рис. 17.7. Электромагнитные колебания, принятые антенной *M,* попадают на когерер *AB.* Когерер (от лат. «ко-



А. С. Попов

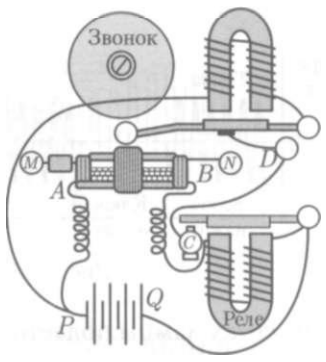



Рис. 17.7

герenцио» — «сцепление») представляет собой устройство, способное обнаруживать электромагнитные волны. Это трубка, в которой находятся мелкие металлические опилки, обладающие большим сопротивлением, ток через них не идет. Но когда на опилки попадает электромагнитная волна, то опилки как бы «сцепляются» друг с другом, сопротивление их уменьшается; через них может проходить электрический ток. Если по трубке постучать, то сопротивление опилок возрастает, ток через них не идет. Электромагнитная волна, изменяя сопротивление когерера, делает его проводником электрического тока. Благодаря когереру, замыкающему цепь батареи *PQ,* ток течет через обмотку реле, притягивающего якорь, контакт реле **C** замыкается. Якорь, замыкая контакт реле, позволяет току течь через обмотку звонка. Звонок притягивает свой якорь, молоточек ударяет по чашечке, слышится звук. Одновременно с этим контакт звонка *D* разрывает цепь, ток через звонок прекращает течь. Якорь звонка возвращается в первоначальное положение, ударяя по когереру и увеличивая его сопротивление. Приемник снова готов к принятию электромагнитных волн.

Важным моментом в развитии радио было изобретение в 1906 г. электронных ламп, позволивших создать источники незатухающих электромагнитных колебаний. Это полностью решило вопрос о передаче по радио речи, музыки.

Радиопередатчик. Основой радиопередатчика является генератор незатухающих колебаний, собранный на лампах или транзисторах. Генератор вырабатывает колебания высокой частоты, называемой несущей (рис. 17.8). Если передатчик излучает незатухающую синусоидальную волну, то в приемной ***антенне*** регистрируются гармонические колебания, которые не несут никакой информации. Для передачи сигналов, речи, музыки необходимо менять характер высокочастотных колебаний, например амплитуду. Этот процесс называется ***модуляцией.*** Так, телеграфная модуляция состоит в прерывании излучения с помощью ключа, т. е. посылке коротких (точка) и длинных (тире) сигналов — азбука Морзе (рис. 17.9).

Для того чтобы передавать звуковые колебания в цепь генератора незатухающих колебаний, включают ***микрофон*** (рис. 17.10). Под действием звуковых волн, падающих на микрофон со звуковой частотой, изменяется сопротивление микрофона, а следовательно, и ток в первичной обмотке трансформатора. Это приводит к появлению переменной ЭДС во вторичной обмот-

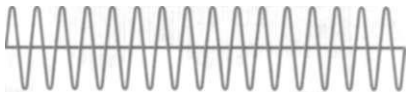


Рис. 17.8

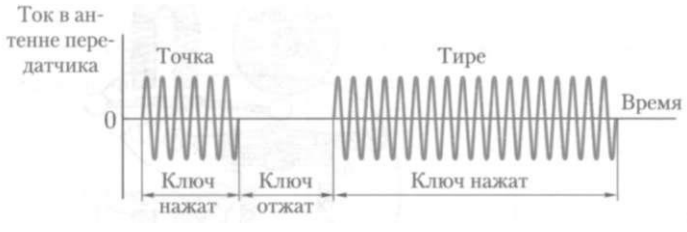



Рис. 17.9

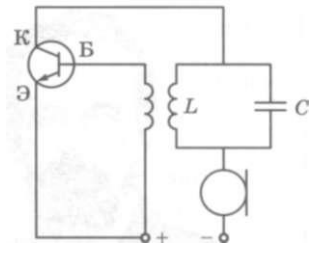



Рис. 17.10

ке, т. е. на сетку лампы подается переменное напряжение звуковой частоты. Амплитуда высокочастотных колебаний, генерируемых в контуре лампы, меняется вместе с низкочастотным напряжением на сетке, а следовательно, меняется и интенсивность радиоволн, излучаемых антенной. Пока звука нет, по цепи микрофона протекает постоянный ток (рис. 17.11). При появлении звуковых колебаний меняется ток в цепи микрофона, амплитуда высокочастотных колебаний изменяется по закону звуковых колебаний. Это явление называют ***амплитудной модуляцией.***

Радиоприемник. Радиоприемник состоит в основном из *следующих элементов:* антенны, колебательного контура, усилителя, детектора, динамика. К антенне радиоприемника одновременно поступают модулированные сигналы от множества передающих станций. Чтобы из множества сигналов выделить интересующую нас информацию, в приемнике используют колебательный контур. В контур включен конденсатор переменной емкости, который позволяет изменять собственную частоту контура. Так производится настройка приемного контура в ***резонанс*** с принимаемыми электромагнитными колебаниями. В колебательном контуре появляется ***модулированный слабый ток*** высокой частоты (рис. 17.12, *а),* который поступает сначала в усилитель, а затем в ***детектор,*** где происходит разделение высокочастотной несущей и звуковых колебаний, т.е. *детектирование.* Детектором является двухэлектродная электронная лампа или полупроводниковый диод, обладающий односторонней проводимостью. После прохождения через диод высокочастотный модулированный ток будет пульсирующим (рис. 17.12, *б).* Для выделения низкочастотного сигнала служит ***фильтр,*** состоящий из параллельно соединенных конденсатора и сопротивления. Для тока низкой (звуковой) частоты конденсатор представляет большое сопротивление, поэтому такой ток идет через сопротивление (рис. 17.12, г), после чего он усиливается и передается на динамик. Ток высокой частоты идет через конденсатор (рис. 17.12, *в).*

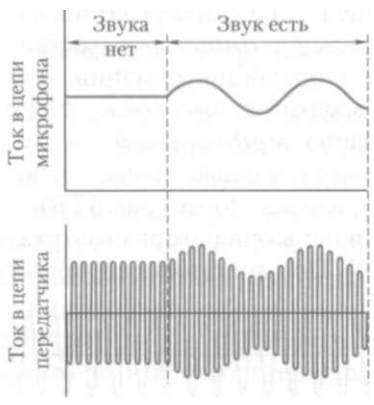



Рис. 17.11

Функциональная схема современного радиопередатчика и радиоприемника изображена на рис. 17.13.

Генератор *1* незатухающих колебаний вырабатывает высокочастотные колебания. Звуковые колебания с помощью микрофона преобразуются в электрические колебания. Колебания от генера-

1ремя

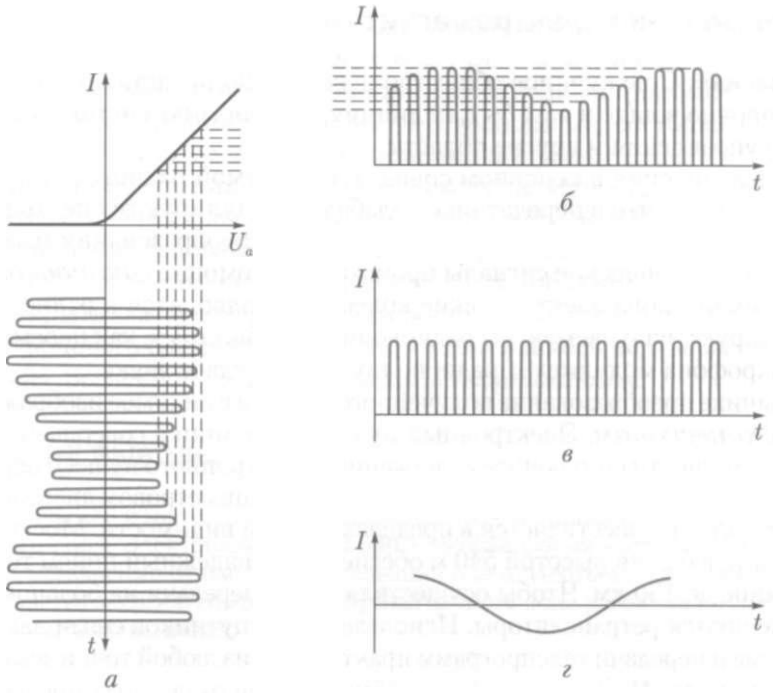



Рис. 17.12

тора *1* и звуковые колебания поступают в модулятор *2.* В нем под действием звуковых колебаний происходит изменение либо амплитуды (амплитудная модуляция), либо частоты (частотная модуляция) колебаний, вырабатываемых генератором. Для передачи речи и музыки модуляция осуществляется звуковыми частотами $(10 — 13) * 10^3$ Гц.

После усилителя *3* модулированные колебания поступают в передающую антенну ***4,*** которая, являясь открытым колебательным контуром, излучает электромагнитные волны в эфир. Непосредственно передавать электромагнитные колебания звуковой частоты нельзя, так как электромагнитные волны различных частот по-разному распространяются в атмосфере и по-разному взаимодействуют с веществом.

На расстоянии от радиопередатчика находится радиоприемник. Электромагнитные волны поступают в антенну радиоприемника 5 и в контуре ***5—6*** вызывают электромагнитные колебания. Принимаемые колебания высокой частоты далее поступают в усилитель 7, а затем в детектор ***8.*** Далее низкочастотные колебания усиливаются в усилителе ***9*** и подаются на динамик. Информация, поступившая в микрофон, воспроизводится динамиком. Для радиовещания используются все диапазоны радиоволн.

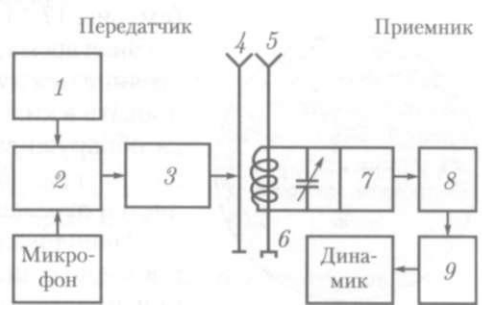



Рис. 17.13

## 17.5. Применение электромагнитных волн

Телевидение. Современное общество невозможно представить без телевидения. Оно прочно вошло в наш быт, медицину, астрономию, системы автоматизированного управления и другие области.

Схема телевидения в основном совпадает со схемой радиовещания. Разница заключается в том, что в передатчике колебания модулируются не только звуковыми сигналами, но и сигналами изображения. Преобразования изображения предметов в электрические сигналы происходят с помощью *иконоскопа.* Получаемые от иконоскопа электрические колебания подводятся к радиопередатчику и модулируют излучаемую им радиоволну подобно тому, как переменный ток в цепи микрофона модулирует радиоволну при передаче звука.

В приемнике преобразование полученного сигнала в видимое изображение производится *кинескопом.* Электронный пучок в приемнике совершает по экрану движение, в точности синхронное с движением электронного пучка в передатчике. Телевизионные приемники работают в метровом и дециметровом диапазонах. Прием этих сигналов осуществляется в пределах прямой видимости. Московская Останкинская телебашня высотой 540 м обеспечивает надежный прием телепередач на расстояние до 130 км. Чтобы осуществлять телепередачи на большие расстояния, применяются ретрансляторы. Использование спутников связи дает возможность приема и передачи телепрограмм практически из любой точки земного шара.

Радиолокация. ***Радиолокация*** — обнаружение различных предметов и измерение расстояния до них с помощью радиоволн. В основе радиолокации лежит явление отражения УКВ от предметов.

***Радиолокатор {радар)*** представляет собой радиопередатчик и радиоприемник, имеющие общую антенну, снабженную переключателем с приема на передачу. Эта антенна создает остронаправленное излучение — радиолуч. Излучение производится короткими импульсами продолжительностью $10^{-6}$ с. Между двумя последовательными импульсами антенна автоматически переключается на прием электромагнитной волны, отраженной от исследуемого объекта.

В момент посылки радиосигнала датчик времени начинает смещать электронный луч. Радиосигнал поступает в антенну, излучается в пространство и одновременно создает на экране электронно-лучевой трубки отклонение электронного луча вдоль вертикали, изображенное в левой части рис. 17.14 над нулевым делением шкалы. Отраженный от предмета радиосигнал принимается той же антенной, проходит через приемник и на экране электронно-лучевой трубки дает вертикальное отклонение луча на некотором расстоянии от первого отклонения (см. рис. 17.14).

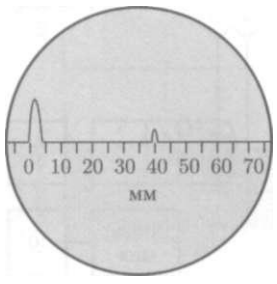


Рис. 17.14

Зная время движения луча по горизонтали, можно расстояние между вертикальными отклонениями проградуировать в километрах. Направление, в котором находится обнаруживаемый объект, определяется положением антенны радиолокатора, при котором на мониторе появляется отраженный радиосигнал.

Радиолокация широко применяется как в военных, так и в мирных целях: задачи воздушной и морской навигации, определение расстояния до Луны и планет Солнечной системы, наблюдения за метеоритами.

Радиоастрономия. В отличие от радиолокации, исследующей тела с помощью отраженных от них радиоволн, *радиоастрономия исследует небесные тела по их собственному радиоизлучению.* Радиоастрономические наблюдения производятся радиотелескопами — антенной системы и чувствительного радиоприемника с усилителем.

Источниками излучения в радиоастрономии являются галактики, межзвездная галактическая среда, звезды, Солнце, Луна, планеты и др.

Современные исследования позволили обнаружить спектральные линии многих химических элементов неорганических и органических молекул, что позволило приоткрыть завесу над процессами образования звезд и планетных систем. Открытие фонового (*реликтового*) излучения явилось подтверждением модели «горячей» Вселенной. Эти исследования продолжаются.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Электрическое и магнитное поля являются проявлениями единого целого — электромагнитного поля. Электромагнитное поле — особая форма материи. Оно существует реально, т.е. независимо от нас, от наших знаний о нем. Неотъемлемой характеристикой материи является энергия. Энергия электромагнитного поля равна сумме энергий электрического и магнитного полей:

$$W = W_{эл} + W_{м}.$$

• *Плотность энергии* электромагнитного поля равна

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

• *Электромагнитные волны* — это распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. Электромагнитные волны являются поперечными. Скорость распространения электромагнитных волн — величина конечная, она определяется электрическими и магнитными свойствами среды:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu}}.$$

В вакууме скорость электромагнитной волны равна скорости света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

• Идея практического использования электромагнитных волн для передачи информации принадлежит А. С. Попову — изобретателю радио.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Чему равна плотность энергии электромагнитного поля? 2. Что представляет собой электромагнитная волна? 3. От чего зависит скорость распространения электромагнитной волны? 4. Что называют длиной электромагнитной волны? 5. Что такое открытый колебательный контур? 6. На какие виды делятся электромагнитные волны? 7. Как осуществляются генерирование и прием электромагнитных волн? 8. Из каких основных частей состоят и как работают передатчик и приемник радиоволн? 9. Как осуществляется телевизионная передача? 10. В чем заключается принцип радиолокации?

**Ключевые слова:** ***электромагнитное поле, электромагнитные волны, радиопередатчик, радиоприемник, телевидение, радиолокация, радиоастрономия.***

РАЗДЕЛ V

# ОПТИКА

Оптика — раздел физики, в котором рассматриваются закономерности излучения, поглощения и распространения света. Различают геометрическую и физическую оптику. Геометрическая оптика не затрагивает вопросов природы света. Ее основными законами являются прямолинейное распространение света, отражение и преломление его. На основании законов геометрической оптики рассчитываются и конструируются оптические приборы — от линз до сложных объективов в огромных астрономических инструментах.

Физическая оптика изучает проблемы, связанные с природой света и световых явлений.

**Историческая справка.** С конца XVII в. в научном мире шла борьба между корпускулярной и волновой теориями света. Автор первой **(И.** Ньютон) считал *свет потоком корпускул* (от лат. *corpuskulum* — тельце), выбрасываемых светящимся телом и летящих в пространстве прямолинейно.



Х. Гюйгенс

Волновую теорию света предложил современник Ньютона голландский ученый Х.Гюйгенс (1629-1695).

На основании современных представлений свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу (корпускулярно-волновой дуализм): с одной стороны, он обладает волновыми свойствами (явления интерференции, дифракции, поляризации), с другой — представляет собой поток частиц — фотонов, обладающих нулевой массой покоя и движущихся со скоростью, равной скорости света в вакууме. Корпускулярно-волновой дуализм есть проявление наиболее общей взаимосвязи двух основных форм материи, изучаемых физикой, — вещества и поля.

## Глава 18

# ПРИРОДА СВЕТА

### 18.1. Скорость распространения света

Электромагнитная природа света. ***Свет*** — электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом ($\lambda$ = 0,38 - 0,76 мкм). В физике часто называют светом и невидимые электромагнитные волны ($\lambda$ = 0,01 - 340 мкм).

В 1873 г. Дж. Максвелл вывел уравнения, устанавливающие в любой точке пространства и в любой момент времени связь между напряженностью **E** электрического поля и индукцией **B** магнитного поля, плотностей электрических токов **j** и зарядов. Из теории Максвелла вытекало, что изменения электрического и магнитного полей взаимосвязаны. На основе этой теории было сформулировано важнейшее понятие в физике — ***электромагнитное поле.*** В уравнения Максвелла вошла скорость, с которой должны распространяться в пространстве изменяющиеся электрическое и магнитное поля, т.е. электромагнитная волна, распространяющаяся в среде со скоростью

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \qquad (18.1)$$

где c — скорость света в вакууме; $v$ — скорость света в среде, имеющей относительную диэлектрическую проницаемость e и относительную магнитную проницаемость $\mu$.

На основании теоретических исследований Максвелл сделал вывод:

**I** свет имеет электромагнитную природу.

Экспериментальное подтверждение электромагнитной теории света было получено в опытах Герца, показавшего, что электромагнитные волны, подобно свету на границе раздела двух сред, испытывают отражение и преломление. Помимо этого, тождественность природы световых и электромагнитных волн подтверждалась одинаковой скоростью их распространения.

Из уравнений Максвелла для электромагнитного поля, определяющих связь между **E** и **B,** получена формула (18.1), связывающая скорость распространения света и электромагнитных волн в веществе с его электрическими и магнитными свойствами.

***Амплитуды*** гармонических колебаний частоты $\nu$ (частота волны), совершаемых векторами **E** и **B** распространяющейся электромагнитной плоской монохроматической волны, описываются выражениями

$$E = E_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi_0); \qquad (18.2)$$

$$B = B_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi_0), \qquad (18.3)$$

где $E_0$ и $B_0$ — максимальные (амплитудные) значения векторов **E** и **B;** $\varphi_0$ — начальная фаза. Векторы **E** и **B** всегда взаимно-перпендикулярны, а также перпендикулярны направлению распространения волны (рис. 18.1).

**I** Электромагнитные волны поперечны.

Из рис. 18.1 видно, что векторы **E** и **B** изменяются со временем по гармоническому закону. Они одновременно достигают максимального и минимального (нулевого) значений. За время, равное периоду колебаний T, векторы имеют максимальные значения в моменты времени T/4 и 3 T/4 и нулевые значения в моменты времени

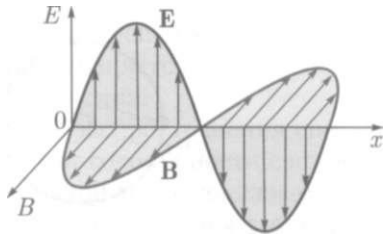



Рис. 18.1

О, *T/2* и **Т.** *Длиной* **волны** X **называется** *расстояние, которое электромагнитная* **волна** *проходит за* **время, равное** *периоду* **Т,** *т. е. за* **время** *полного колебания* **векторов** **E** *и* **B:**

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \qquad (18.4)$$

Понятие электромагнитной природы света не только объяснило наблюдаемые световые явления, но и позволило предсказать такое явление, как давление света, которое экспериментально было обнаружено русским физиком П.Н.Лебедевым (1899). Это стало истинным триумфом электромагнитной природы света. Вот что писал английский физик Д.Томсон: «Я всю свою жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот опыты Лебедева заставили меня сдаться». Итак,

> свет — это электромагнитные волны, которые могут распространяться как **в** среде, так **и в** вакууме.

Опыты Ремера **и** Майкельсона. Первую попытку определить скорость света предпринял Г.Галилей (1607), но она оказалась неудачной. Трудности измерения скорости света связаны с тем, что она очень велика. Только в 1675 г. датский астроном О. Ремер, наблюдая затмение спутников Юпитера, показал, что ***скорость распространения света — величина конечная.*** Схема метода Ремера представлена на рис. 18.2. Расстояни расстояния от Земли (3) до Солнца примерно в 5 раз. Метод Ремера основан на наблюдении затмения спутника Юпитера $U_0$. Ремер определил, что если наблюдать затмение в тот момент, когда Юпитер и Земля находятся на наименьшем расстоянии друг от друга (положения $Ю_1$ и $З_1$), то затмение наступает раньше, чем в те моменты, когда планеты наиболее удалены друг от друга (положения $Ю_2$ и $З_2$). Запаздывание затмения связано с тем, что при наибольшем удалении планет друг от друга свет должен пройти добавочное расстояние, равное диаметру орбиты Земли. Зная время запаздывания затмения и диаметр орбиты Земли, можно определить скорость света. В то время Ремер не мог получить достаточно точного значения скорости света, так как диаметр земной орбиты не был измерен достаточно точно. Современные данные дают значение скорости света по методу Ремера, близкое к $3 \cdot 10^8$ м/с.

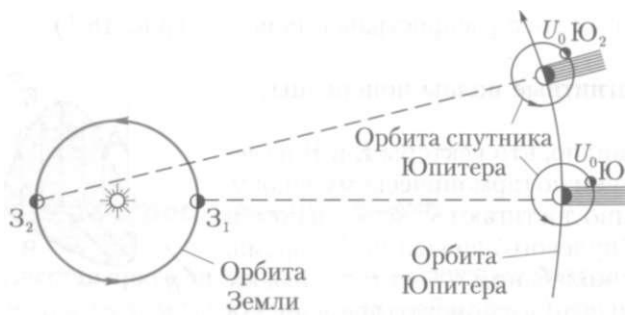



Рис. 18.2

В дальнейшем было предложено еще несколько методов измерения скорости света. Впервые в земных условиях скорость света ($\approx 3 \cdot 10^8$ м/с) была измерена французским физиком И.Физо в 1849 г. Впоследствии метод Физо был усовершенствован американским физиком А. Майкельсоном. Схема опыта Майкельсона дана на рис. 18.3.

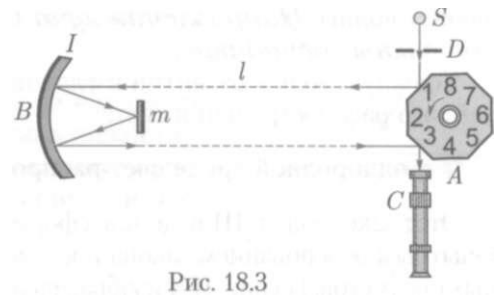


Рис. 18.3

Для измерения скорости света Майкельсон воспользовался двумя горными вершинами (Антонио и Вильсон), расстояние $l$ между которыми было тщательно измерено. На вершине одной горы был установлен источник света $S$. Свет от него, проходя через щель $D$, падал на восьмигранную зеркальную призму $A$. Отраженный от зеркальной грани призмы свет попадал на вогнутое зеркало $B$, установленное на вершине другой горы. Отражаясь от него, свет падал на зеркало $m$ и, отражаясь, снова на зеркало $B$, после чего попадал на вторую грань зеркальной призмы $A$. Отраженный от призмы $A$ свет улавливался с помощью зрительной трубы $C$. Вращение призмы $A$ происходило с такой скоростью, чтобы в зрительную трубу $C$ непрерывно было видно изображение щели $D$. Это возможно в том случае, если за время поворота призмы на 1/8 оборота свет проходит расстояние $2l$. Майкельсон также получил значение, близкое к 3 • КЗ$^8$ м/с.

Кроме того, Майкельсоном была определена скорость света в вакууме и других средах. Из этих опытов были сделаны важные выводы:

**1)** скорость света **в** вакууме больше, чем **в** других средах;
2) скорость света не зависит от скорости источника, т. е. свет не подчиняется классическому правилу сложения скоростей.

Это опытное положение — независимость скорости света от скорости источника — лежит в основе теории относительности. В природе не существует скорости большей, чем скорость света в вакууме. По современным данным, скорость света в вакууме $c = (299792{,}5 \pm 0{,}4) \cdot 10^3$ м/с. Итак,

электромагнитная волна в вакууме распространяется со скоростью с = = 3-10$^8$ м/с.

## 18.2. Законы отражения и преломления света

Закон прямолинейного распространения света. Если электромагнитная волна распространяется в однородной среде и длина волны пренебрежимо мала по сравнению с размерами области, в которой она распространяется, то распространение волны происходит по законам геометрической оптики.

В геометрической оптике рассматриваются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о свете как совокупности световых лучей. ***Луч*** — это линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны. Если волна распространяется в однородной и изотропной среде, то луч представляет собой прямую, перпендикулярную

фронту волны. ***Направления луча и переноса энергии электромагнитной волны совпадают.***

Большую роль в развитии взглядов на природу света сыграл закон прямолинейного распространения света:

**в** однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Этот закон еще в III в. до н.э. сформулировал Эвклид в своем труде «Оптика». Опытным обоснованием закона послужило явление образования теней от различных предметов. На рис. 18.4 изображен источник света *S*, линейные размеры которого малы. От тела *A*, преграждающего свету путь от источника до экрана, на экране образуется тень. Тень имеет резко очерченные границы, если источник *S* ***точечный,*** т. е. если его размеры пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до освещаемого предмета. Если источник не точечный, то тень получается нерезкой, она имеет размытый край, который называют ***полутенью.*** Закон прямолинейного распространения света с позиций волновой теории был обоснован Френелем (1818).

Распространение света **в** веществе. Электромагнитные волны могут распространяться не только в вакууме, но и в различных средах, при этом происходит взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Взаимодействие электромагнитной волны с веществом сводится к взаимодействию с электронами вещества. Электромагнитная волна характеризуется напряженностью **E** электрического и индукцией **B** магнитного полей. Из теории электромагнитных волн следует, что $B = E/c$. Силы, действующие на электроны вещества со стороны электрического и магнитного полей, относятся как

$$\frac{eE}{evB} = \frac{c}{v},$$

где c — скорость света; *v* — скорость движения электрона. Для электронов в атомах и электронов проводимости в металлах $(c/v) \geqslant 10^2$, откуда следует, что магнитные силы малы по сравнению с электрическими, поэтому ***вектор напряженности электрического поля называют световым.***

Посмотрим, как проходит свет через границу раздела двух сред — двух диэлектриков (рис. 18.5). На границе раздела происходят явления отражения и преломления света.

Законы отражения. Угол между направлением падающего луча *1* и нормалью *NN]* к границе раздела называют ***углом падения*** *a*, угол между направлением отраженного луча *2* и нормалью $NN_1$ — ***углом отражения*** $\beta$. Экспериментальным путем установлено:

**I)** падающий **и** отраженный лучи **и** нормаль $NN_1$ к границе раздела лежат в одной плоскости;
2) угол падения а равен углу отражения $\beta$.

Это утверждение называют законом отражения. Как опытный факт оно было известно еще Евклиду в III в. до н.э.

Законы преломления. Угол $\gamma$ между преломленным лучом *3* и нормалью к границе раздела называют ***углом преломления*** (см. рис. 18.5).

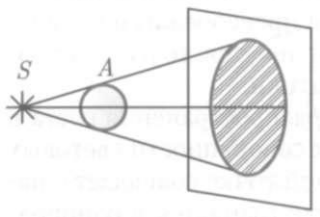



**Рис. 18.4**

Снеллиусом экспериментально для преломления света было установлено:



Рис. 18.5

**1) падающий *1* и преломленный *3* лучи и нормаль $NN_1$ к границе раздела лежат в одной плоскости;**

**2) отношение синуса угла падения $\alpha$ к синусу угла преломления $\gamma$ равно отношению скоростей распространения света в этих средах:**

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

**Здесь $v_1$ и $v_2$ — скорости распространения света в средах, характеризуемых соответственно показателями преломления $n_1$ и $n_2$. Это соотношение можно переписать в виде**

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \qquad (18.5)$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$ — *относительный показатель преломления* второй среды (по отношению к первой).

Соотношение (18.5) называется *законом преломления света,* согласно которому

**во сколько раз скорость света в первой среде больше или меньше скорости света во второй.**

Если первой средой является вакуум, то $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{c}{v}$, где $\frac{c}{v} = n$ — ***абсолютный показатель преломления.*** Показатель преломления показывает, во сколько раз скорость распространения света в вакууме больше, чем в данной среде.

Абсолютный показатель преломления для некоторых диэлектриков приведен в табл. П.15 (см. прил.).

Зная показатели преломления двух сред, по формуле (18.5) можно найти их относительный показатель преломления. При сравнении двух сред среду, обладающую большим показателем преломления, называют *оптически более плотной.*

Законы отражения и преломления света справедливы для однородных и изотропных сред.

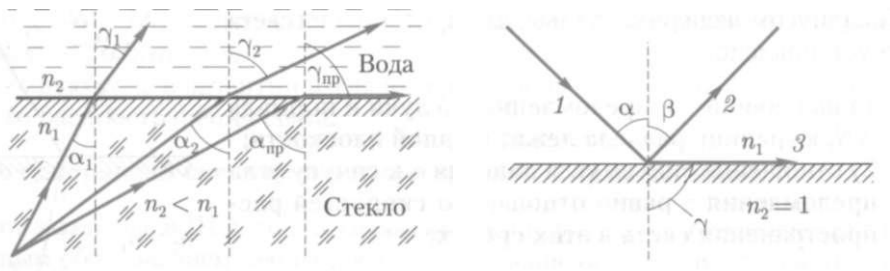
**Частота колебаний электромагнитной волны не изменяется ни при отражении, ни при преломлении света.**

## 18.3. Полное отражение

Полное отражение. Пусть свет распространяется из более плотной среды в менее плотную. Из рис. 18.6, *а* видно, что в оптически более плотной среде падающий луч составляет с нормалью, восставленной к границе раздела, угол меньший, чем луч, идущий в менее плотной среде. Если увеличивается угол падения,








*а* *б*

Рис. 18.6

то увеличивается и угол преломления. В случае, показанном на рис. 18.6, *а*, $n_2 < n_1$, поэтому угол преломления всегда больше угла падения. При некотором угле падения он достигает значения $\pi/2$, т. е. такой преломленный луч распространяется вдоль границы раздела двух сред. При дальнейшем увеличении угла падения луч во вторую (т.е. менее плотную) среду не переходит и полностью отражается в первую среду. Это явление называют ***полным отражением.*** Угол падения $\alpha_{пр}$, при котором весь свет начинает полностью отражаться в первую среду, называют предельным ***углом полного отражения.***

Применяя закон преломления, рассмотрим прохождение света из вещества с показателем преломления $n_1$ в воздух, т.е. в вещество $n_2 = 1$ (рис. 18.6, б). Согласно формуле (18.5), если $n_2 = 1$ и $\gamma = \pi/2$, то при явлении полного отражения имеем $\sin\alpha_{пр} \Big/ \sin\frac{\pi}{2} = \frac{1}{n_1}$, откуда $\sin\alpha_{пр} = \frac{1}{n}$. В общем случае

$$\sin\alpha_{пр} = n_{12}. \qquad (18.6)$$

Предельный угол полного внутреннего отражения можно определить, если известны показатели преломления двух сред. Явление полного внутреннего отражения можно наблюдать в природе: яркий блеск капель росы, снежинок, ледяных сосулек. Это явление используется в *оборотных* (рис. 18.7, а) и *поворотных призмах* (рис. 18.7, *б*). Принцип действия равнобедренных прямоугольных призм ясен из рисунков.

**Световоды.*** Широкое техническое применение явление полного внутреннего отражения нашло в устройствах, называемых ***световодами.*** Световод представляет собой большое число тонких стеклянных нитей, диаметр которых порядка 20 мкм, а длина около 1 м каждая. Эти нити параллельны между собой и расположены вплотную. Каждая нить окружена тонкой оболочкой из стекла, показатель преломления которого меньше, чем самой нити. Световод имеет два торца, взаимное расположение концов нитей на обоих торцах его строго одинаково.

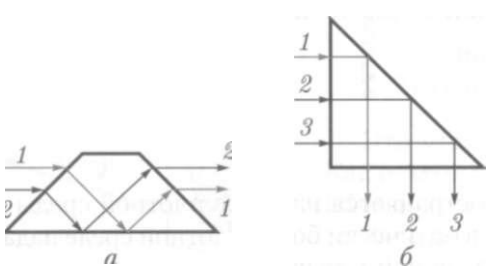



Рис. 18.7

Если у одного торца световода поместить какой-либо предмет и осветить

его, то на другом конце световода возникнет изображение этого предмета. Изображение получается вследствие того, что в торец каждой из нитей попадает свет от какой-либо малой области предмета. Испытывая множество полных отражений, свет выходит из противоположного торца нити, передавая отражение данной малой области предмета. Так как расположение нитей друг относительно друга строго одинаково, то на другом конце появляется соответствующее изображение предмета. Четкость изображения зависит от диаметра нитей. Чем меньше диаметр каждой нити, тем более четким является изображение предмета. Потери световой энергии на пути следования светового луча обычно невелики.

## 18.4. Линзы

**Световые лучи.** Как известно, предельным случаем волновой оптики при стремлении длины волны к нулю $(\lambda \to 0)$ является геометрическая оптика. В геометрической оптике пренебрегают явлениями интерференции, дифракции и поляризации света.

Методы геометрической оптики позволяют получать изображения объектов, как совокупности изображений его отдельных точек. Наибольшее значение геометрическая оптика имеет для расчета и конструирования оптических приборов — от очковых линз до астрономических приборов.

Еще в середине XII в. были известны эмпирические правила построения изображений, даваемых линзами. В XIII в. появились очки. По некоторым данным, около 1590 г. З.Янсон (Нидерланды) построил первый двухлинзовый микроскоп. Астрономические наблюдения с помощью телескопа, построенного Г. Галилеем, позволили сделать ряд открытий.

**Линзы.** ***Линзой*** называют шлифованное стекло или любое другое прозрачное вещество, ограниченное сферическими поверхностями. В частном случае одна из поверхностей линзы может быть плоской. Линзы бывают: 1) ***собирающие,*** у которых толщина в середине больше, чем у краев (рис. 18.8, *а);* 2) ***рассеивающие,*** у которых толщина в середине меньше, чем у краев (рис. 18.8, *б).* Это применимо для линз, имеющих больший коэффициент преломления, чем среда, из которой падают лучи.

Линзы характеризуют: ***главной оптической осью*** $O_1O_2$ — линией, соединяющей центры кривизны поверхностей линзы, ***оптическим центром*** $C$ — точкой, лежащей на пересечении главной оптической оси и линии, соединяющей концы параллельных радиусов $r_1$ и $r_2$, проведенных из обоих центров кривизны.

Всякую прямую, проходящую через оптический центр линзы, называют ее ***побочной оптической осью.*** Через оптический центр линзы луч проходит, не преломляясь.

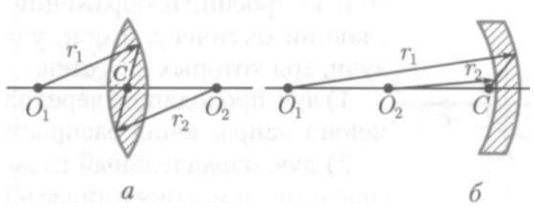
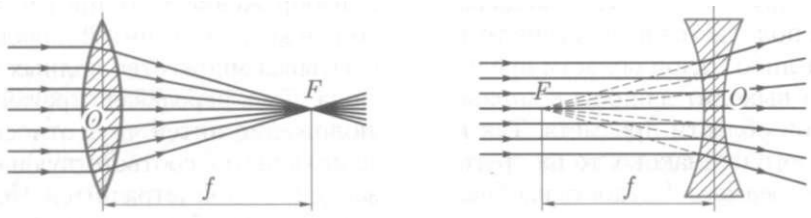



Рис. 18.8




*а* *б*

Рис. 18.9

Линзы, у которых радиусы кривизны образующих их поверхностей велики по сравнению с их толщиной, называют ***тонкими.*** Если это условие не выполняется, то линза является ***толстой.***

Линза изменяет направления падающих на нее лучей. Собирающая линза преобразует параллельный пучок лучей в сходящийся. Рассеивающая линза превращает параллельный пучок лучей в расходящийся (рис. 18.9).

Если на тонкую собирающую линзу параллельно главной оптической оси направить пучок световых лучей, то все лучи пересекутся в одной точке *F* на главной оптической оси, называемой *ГЛАВНЫМ* ***фокусом*** линзы (рис. 18.9, *а).* У линзы два фокуса. Если на линзу свет падает слева, то фокус, находящийся слева от собирающей линзы, называют *передним,* а находящийся справа — *задним.*

Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса называют *ГЛАВ-* ***ным фокусным расстоянием*** *f.* Эта величина является основной характеристикой линзы. Для собирающих линз главное фокусное расстояние — величина положительная, для рассеивающих — отрицательная. Линзу характеризуют также оптической силой. ***Оптическая сила —*** величина, обратная фокусному расстоянию линзы:

$$\Phi = \frac{1}{f}. \qquad (18.7)$$

Для собирающей линзы $\Phi > 0$, для рассеивающей $\Phi < 0$.

Единица оптической силы — ***диоптрия*** (дптр) $(м^{-1})$, Диоптрия равна оптической силе линзы с главным фокусным расстоянием 1 м.

Для рассеивающих линз передний фокус является мнимым, и для его построения берут не сами лучи, а их продолжение (рис. 18.9, *б).* Схематические обозначения собирающей и рассеивающей линз даны соответственно на рис. 18.10, *а, б.*

Построение изображений **в** линзе. В случае протяженных предметов построение изображения сводится к построению изображений его отдельных точек. При построении изображений точек, лежащих вне главной оптической оси, удобно использовать лучи, ход которых известен:

1) луч, проходящий через оптический центр (не меняет направления распространения);

2) луч, параллельный главной оптической оси (после преломления в линзе идет через задний фокус);

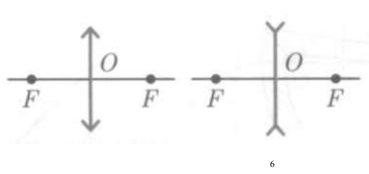



Рис. 18.10

**3)** луч, проходящий через передний фокус линзы (после преломления в ней идет параллельно главной оптической оси).

При построении изображения точки $A$, лежащей на главной оптической оси линзы (рис. **18.11),** нужно знать ход луча $AA'$, падающего на линзу под произвольным углом. Для этого нужно провести ***побочную оптическую ось*** $O_1O_2$, параллельную падающему лучу $AA'$, и ***фокальную плоскость*** $FF_1$**.** Точка пересечения побочной оси $O_1O_2$ с фокальной плоскостью определяет положение побочного фокуса $F_1$, в котором соберутся лучи, параллельные побочной оси $O_1O_2$ Следовательно, луч $AA'$ после преломления в линзе пойдет через этот фокус и точка $A''$ пересечения его с главной оптической осью даст изображение светящейся точки $A$.

Формула линзы. Главное фокусное расстояние тонкой собирающей линзы определяется по формуле ***(основная формула линзы)***

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}, \tag{18.8}$$

где $d$ — расстояние от предмета А **В** до оптического центра линзы (рис. **18.12);** $f$ — расстояние от оптического центра линзы до изображения предмета $A_1B_1$ на экране.

Формулу **(18.8)** можно переписать в виде

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=(n_{21}-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right), \tag{18.9}$$

где $n_{21}=n_2/n_1$ — относительный показатель преломления вещества линзы и окружающей среды; $r_1$ и $r_2$ — радиусы кривизны поверхностей линзы.

В формуле **(18.9)** перед членами, содержащими $r_1$ и $r_2$, ставится знак «плюс» для выпуклых поверхностей и «минус» — для вогнутых. Из **(18.9)** следует, что если двояковыпуклая линза $(r_1>0$ и $r_2>0)$ находится в оптически более плотной среде, чем вещество линзы $(n_2<n_1)$, то она является рассеивающей. Двояковогнутая линза может быть собирающей, например если ее поместить в воду.

***Линейным увеличением*** тонкой линзы называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета (см. рис. **18.12):**

$$\Gamma=\pm\frac{A_1B_1}{AB}.$$

Как следует из подобия треугольников $ABO$ и $A_1B_1O$,

$$\Gamma=\frac{f}{d}. \tag{18.10}$$

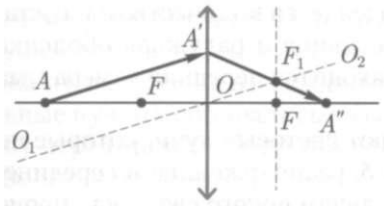



Рис. 18.11

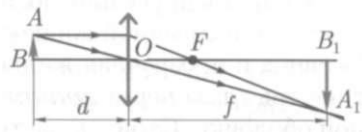



Рис. 18.12

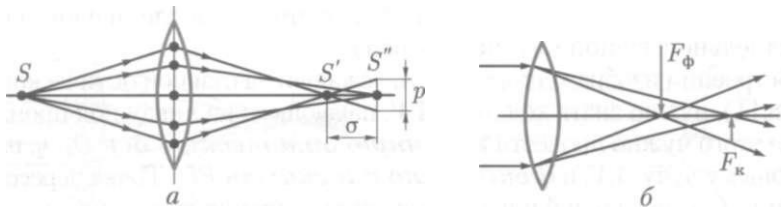



Рис. 18.13

Погрешности изображений.* Изображения предметов, полученных с помощью линз, имеют ряд дефектов:

• ***сферическая аберрация*** — лучи, падающие на края линзы, преломляются сильнее, чем лучи центральные, поэтому изображение светящейся точки получается в виде светящегося диска (рис. 18.13, *а).* Диаметр этого диска *p* является *мерой поперечной сферической аберрации,* а расстояние *а* между изображениями $S'$ и $S''$ точки *S — мерой продольной сферической аберрации;*

• ***хроматическая аберрация*** — различные цветные лучи, которые входят в состав белых лучей, обладают различными показателями преломления и поэтому по-разному преломляются в линзе (рис. 18.13, *б).* Сильнее преломляются фиолетовые лучи, слабее — красные. Поэтому главный фокус $F_ф$ фиолетовых лучей лежит ближе к линзе, главный фокус $F_к$ красных лучей — дальше от нее. В результате даже центральные лучи не сходятся в одной точке, а дают изображение в виде диска с цветной каймой;

• ***астигматизм*** возникает, когда лучи, идущие от предмета, проходят через линзу под большим углом к оптической оси. В этом случае теряется подобие между предметом и его изображением.

Для устранения этих недостатков создают оптические системы, состоящие из двух или нескольких линз различной формы и различных сортов стекла. В современных оптических приборах как объектив, так и окуляр представляют собой сложные оптические системы, состоящие из нескольких линз.

## 18.5.* Глаз как оптическая система

Глаз человека как оптическая система. Горизонтальный разрез глаза представлен на рис. 18.14. Внешнюю оболочку глазного яблока *1* называют *склерой.* Эта оболочка защищает глаз от различных внешних воздействий. К ней прилегает *сосудистая оболочка 8.* Переднюю прозрачную часть склеры *6* называют *роговой оболочкой,* или *роговицей.* За роговицей на некотором расстоянии расположена *радужная оболочка 3,* которая может иметь различный цвет — от светло-голубого до черного (он определяется количеством и составом содержащегося в этой оболочке пигмента). Роговица и радужная оболочка не прилегают друг к другу плотно. Между ними находится передняя камера глаза ***4,*** заполненная прозрачной жидкостью.

Роговица и прозрачная жидкость пропускают световые лучи, которые попадают внутрь глаза через *зрачок* — отверстие ***5,*** расположенное в середине радужной оболочки. Стоит попасть внутрь глаза лучам яркого света, как происходит рефлекторное сужение зрачка. При слабом освещении зрачок расширяется.

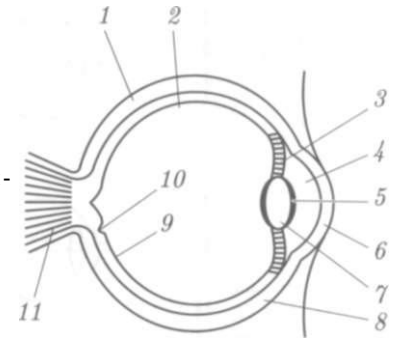


Рис. 18.14

Непосредственно за зрачком находится прозрачный хрусталик 7. Хрусталик представляет собой эластичную двояковыпуклую линзу, кривизна которой может изменяться. Пройдя через хрусталик, а затем через прозрачное, словно чистейший хрусталь, *стекловидное тело* 2, заполняющее всю внутреннюю часть глазного яблока, лучи попадают на *сетчатку* 9.

Сетчатая оболочка покрывает всю внутреннюю поверхность глаза, за исключением его передней части. Сетчатая оболочка представляет собой светочувствительную поверхность глаза. Через оболочку глаза в задней его части входит *зрительный нерв* И. В месте вхождения зрительного нерва находится нечувствительное к свету слепое пятно. Недалеко от входа зрительного нерва на поверхности сетчатки имеется так называемое *желтое пятно* 10 — наиболее чувствительное к свету. Глаз — оптическая система, образованная роговицей, жидкостью передней камеры и хрусталиком.

Основной элемент оптической системы глаза — двояковыпуклая линза — хрусталик. С помощью хрусталика изображение внешнего предмета проецируется на сетчатку. Так как кривизна поверхности хрусталика может изменяться, то изображение предмета в нормальном глазе всегда попадает на поверхность сетчатки. Процесс изменения кривизны хрусталиков называют *аккомодацией*. Аккомодация глаза — приспособление глаза к ясному видению предметов, находящихся на различных расстояниях.

Оптическая система глаза аналогична линзе, оптическая сила которой $\Phi = 58{,}5\ \text{м}^{-1}$. На сетчатке глаза, состоящей из светчувствительных клеток, имеющих форму колбочек и палочек, образуется действительное и обратное изображение предмета. Оптический центр глаза расположен на расстоянии около 5 мм от роговицы. Размер изображения предмета на сетчатке глаза определяется *углом зрения*. Вершина этого угла находится в оптическом центре глаза, а лучи направлены на крайние точки предмета. *Расстояние наилучшего зрения* — это такое расстояние от предмета до глаза, при котором угол зрения максимален. Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения — $d_{\text{н}} \approx 0{,}25\ \text{м}$. Разрешающая способность глаза характеризуется минимальным углом зрения, при котором точки предмета видны раздельно. Разрешающая способность глаза $\approx 1'$.

Дефекты зрения и их коррекция. Не каждый глаз может так аккомодироваться, чтобы изображение предмета оказалось точно на поверхности сетчатки. В одних случаях фокус глаза в спокойном состоянии оказывается перед сетчаткой, в других — за ней. В первом случае хрусталик преломляет лучи сильнее, чем хрусталик нормального глаза (рис. 18.15, *а*). Такой глаз называют близоруким, так как он не может отчетливо видеть удаленные предметы. Для того чтобы лучи, идущие от каждой точки удаленного предмета (т.е. почти параллельные пучки), собирались на сетчатке, их нужно сделать расходящимися, поэтому перед таким глазом помещают рассеивающую линзу (рис. 18.15, *б*).

Во втором случае хрусталик недостаточно преломляет лучи (рис. 18.15, *в*). Такой глаз называют *дальнозорким,* так как он не может отчетливо видеть близко расположенные предметы. Чтобы привести фокус на сетчатку, надо па-

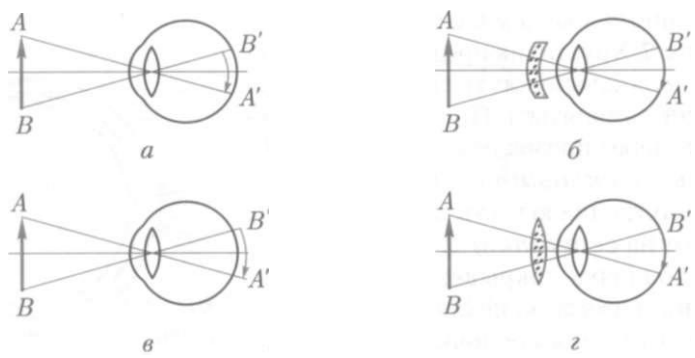



Рис. 18.15

раллельный пучок лучей света, падающий на хрусталик, превратить в сходящийся. Для этого перед глазом помещают собирающую линзу (рис. 18.15, г). Такие рассеивающие и собирающие линзы, используемые для улучшения зрения, называют очками. Оптическая сила очков выражается в диоптриях.

## 18.6. Оптические приборы

***Оптическими приборами*** называют устройства, предназначенные для получения изображений различных объектов. К оптическим приборам относятся лупа, фотоаппарат, микроскоп, телескоп и т.д.

Лупа. Простейшим прибором, с помощью которого можно увеличивать угол зрения, является ***лупа.*** Лупа представляет собой короткофокусную линзу. При рассмотрении предмета $AB$ его помещают между лупой и фокусом лупы (рис. 18.16). $= AB/d_н$женным изом предме$\operatorname{tg}\varphi = AB/F$,од углом зрения $\varphi_0$ таким, что $\operatorname{tg}\varphi_0 =$ Глаз, вооруженный луп

***Угловым увеличением*** оптического прибора называют величину

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_0} = \frac{d_н}{F} \quad \text{или} \quad \Gamma = d_н D. \qquad (18.11)$$

Чем меньше фокусное расстояние лупы $F$, тем большее угловое увеличение она дает, или угловое увеличение лупы пропорционально ее оптической силе. Лупы с $F < 2$ см не применяют, так как они искажают изображения.

Микроскоп. Для получения большого углового увеличения используют оптические системы, состоящие из нескольких линз, т. е. ***микроскоп.***

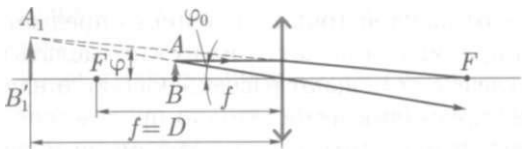



Рис. 18.16

Простейший микроскоп состоит из двух короткофокусных собирающих линз: $C_1$ и $C_2$ (рис. 18.17). Если предмет $AB$ поместить перед линзой $C_1$(объективом) на расстоянии немного большем, чем фокусное $F_1$, то объектив даст увеличенное действительное и обратное изображение предмета $A'B'$. Вторую линзу $C_2$ (окуляр), обращенную к глазу наблюдателя, располагают так, чтобы изображение, даваемое объективом, находилось между окуляром и фокусом $F_2$ окуляра со стороны объектива. В этом случае окуляр действует как лупа и дает увеличенное, мнимое и обратное (по отношению к предмету) изображение предмета $A''B''$, которое и воспринимается глазом наблюдателя. Плоскость изображения, даваемого микроскопом, устанавливается на расстоянии наилучшего зрения от глаза наблюдателя.

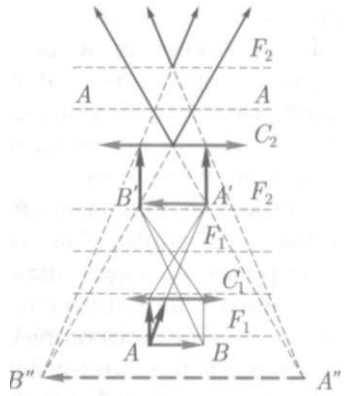


Рис. 18.17

В плоскости $AA$ концентрация выходящих лучей максимальна — это так называемый зрачок выхода. В этой плоскости располагается глаз наблюдателя.

Обычно и объектив, и окуляр состоят из нескольких различных линз. Вся система линз объектива заключается в общую оправу, которая может ввинчиваться в тубус (трубу) микроскопа с нижней стороны. Система линз окуляра также заключается в оправу и может вставляться в тубус микроскопа с верхней стороны.

Если окуляр предназначен для измерения малых объектов, то в его оправу вставляют микрометрическую шкалу, т.е. шкалу с очень мелкими делениями (не более 0,1 мм), в той плоскости окуляра, где получается действительное изображение предмета, даваемого объективом.

Таким образом, рассматривая предмет в микроскоп, мы видим его совмещенным с микрометрической шкалой. Тубус микроскопа прикрепляют к штативу, с помощью кремальерного винта его можно поднимать или опускать. Для более точной настройки имеется микрометрический винт. Прикрепленный к штативу предметный столик служит для установки рассматриваемого объекта. Предметный столик можно перемещать и вращать с помощью регулировочных винтов. Непосредственно под столиком укреплена переменная диафрагма, служащая для регулировки яркости рассматриваемой картины. Под столиком для освещения объекта снизу закрепляют зеркальце.

Качество микроскопа характеризуют двумя величинами: увеличением и разрешающей способностью. Линейным увеличением микроскопа называют отношение линейного размера изображения объекта к линейному размеру рассматриваемого объекта (см. рис. 18.17): $\Gamma = \dfrac{A''B''}{AB}$ и определяется по формуле

$$\Gamma = \delta d_н D_1 D_2, \qquad (18.12)$$

где $\delta$ — расстояние между фокусами объектива и окуляра; $d_н$ — расстояние наилучшего зрения; $D_1 D_2$ — оптическая сила объектива и окуляра соответственно.

Наименьшее расстояние $\varepsilon$ между двумя точками рассматриваемого объекта, которые еще видны раздельно с помощью микроскопа, называют ***разрешаемым расстоянием микроскопа.*** Величину $\alpha = 1/\varepsilon$, обратную разрешаемому расстоянию, называют разрешающей способностью микроскопа. Если расстоя-

ние между точками меньше, чем $\varepsilon$, то точки неразличимы и сливаются в одну. Максимальное значение разрешающей способности данного типа приборов ограничено явлением дифракции света. Размеры предметов, различимых с помощью микроскопа, должны быть не меньше длины световой волны осветителя. Если размеры предмета меньше длины световой волны, то свет огибает его по законам дифракции.

Телескоп. Оптический прибор, с помощью которого можно детально рассматривать удаленные объекты, называют *телескопом.* Телескопы, используемые в астрономии, подразделяют на *рефракторы,* где увеличение угла зрения достигается с помощью системы линз, и *рефлекторы,* главную часть которых представляет параболическое зеркало.

Первый телескоп-рефрактор, точнее зрительную трубу, изобрел датский оптик И. Липперсгей. Его изобретение, как имеющее военное значение, было засекречено датским правительством. Но весть о приборе, приближающем далекие предметы, широко распространилась по Европе. Узнал о ней и великий итальянский ученый Г. Галилей. Независимо от датского оптика он построил телескоп еще более совершенной конструкции.

Простейшим телескопом является зрительная труба. Ход лучей в телескопе показан на рис. 18.18.

**С** помощью объектива $C_1$ получают действительное изображение астрономического объекта, лучи от любой точки которого идут практически параллельно. Действительное, обратное и уменьшенное изображение $A_1B_1$ объекта $AB$ получается почти в фокальной плоскости объектива. Окуляр $C_2$ в телескопе располагают таким образом, чтобы его передний фокус совпадал с задним фокусом объектива. Следовательно, изображение $A_1B_1$ объекта $AB$ находится почти в фокальной плоскости окуляра $C_2$, окуляр дает изображение $A'_1B'_2$. Как видно из рис. 18.18, угол $\varphi$ значительно превышает угол $\varphi_0$. Это и обусловливает увеличение телескопа. Угловое увеличение телескопа $\Gamma = \operatorname{tg}\varphi/\operatorname{tg}\varphi_0$. В силу малости углов $\varphi$ и $\varphi_0$ это отношение можно заменить следующим:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_0} = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{F_{об}}{F_{ок}}. \qquad (18.13)$$

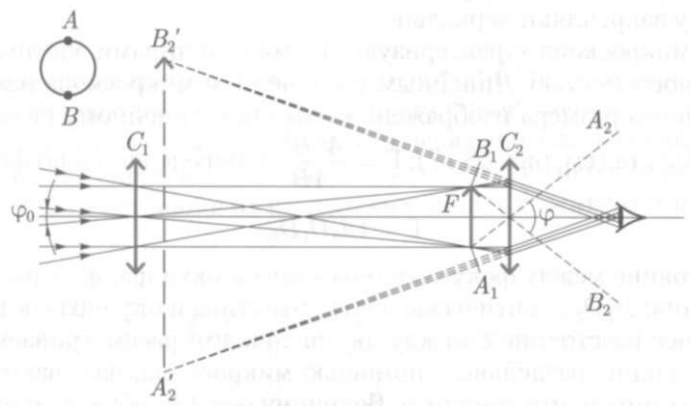



Рис. 18.18

Анализируя формулу **(18.13),** можно сделать вывод, что для получения значительных угловых увеличений нужно использовать длиннофокусные объективы и короткофокусные окуляры.

Чем больше диаметр телескопа, тем больше его разрешающая способность.



## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Свет* — это электромагнитные волны, которые могут распространяться как в среде, так и вакууме.

• Электромагнитные волны характеризуются длиной волны $\lambda$ и частотой $\nu$:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

• Электромагнитные волны в вакууме распространяются со скоростью

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

• Предельным случаем волновой оптики при стремлении длины волны к нулю $(\lambda \to 0)$ является геометрическая оптика. В геометрической оптике физические явления описываются на основе представлений о *световом луче как линии, вдоль которой распространяется энергия световой волны.* В однородной среде свет распространяется прямолинейно.

• *Законы отражения света:*

**1)** падающий и отраженный лучи и нормаль к границе раздела лежат в одной плоскости;

2) угол падения равен углу отражения.

• *Законы преломления света:*

**1)** падающий и преломленные лучи и нормаль к границе раздела лежат в одной плоскости;

2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скоростей распространения света в этих средах:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{или} \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21}.$$

• При прохождении света из оптически более плотной среды в менее плотную наблюдается полное отражение:

$$\sin\alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

• *Линзой* называют шлифованное стекло или любое другое прозрачное вещество, ограниченное сферическими поверхностями.

Собирающая линза преобразует параллельный пучок лучей в сходящийся, рассеивающая линза — в расходящийся.

• *Оптическая сила линзы* — величина, обратная фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{F}.$$

• Главное фокусное расстояние тонкой собирающей линзы определяется по формуле *(основная формула линзы)*

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

• *Линейное увеличение тонкой линзы* — отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

• *Глаз* — оптическая система, образованная роговицей, жидкостью передней камеры и хрусталиком. Оптическая система глаза аналогична линзе, оптическая сила которой Ф = = 58,5 дптр.

• *Лупа* представляет собой короткофокусную линзу. Угловое увеличение лупы пропорционально ее оптической силе

$$\Gamma = d_{\text{п}} D.$$

• *Микроскоп* служит для получения сильно увеличенных изображений малых предметов. Простейший микроскоп состоит из двух короткофокусных собирающих линз.

• *Линейное увеличение оптической системы* равно произведению линейных увеличений объектива и окуляра:

$$\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2.$$

• *Разрешаемое расстояние микроскопа* — наименьшее расстояние $z$ между двумя точками рассматриваемого объекта, которые еще видны раздельно с помощью микроскопа. Величину $\alpha = 1/\varepsilon$, обратную разрешаемому расстоянию, *называют разрешающей способностью микроскопа.*

• *Телескопы,* используемые в астрономии, подразделяют *на рефракторы,* где увеличение угла зрения достигается с помощью системы линз, и *рефлекторы,* главную часть которых представляет параболическое з

Угловое увеличение телескопа: $\Gamma = \dfrac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}$.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Какую природу имеет свет? 2. Дайте определение длины световой волны. 3. С какой скоростью свет распространяется в вакууме? 4. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света. 5. Что такое световой луч? 6. Что называют углом падения? углом отражения? 7. Сформулируйте законы отражения света, законы преломления света. 8. Что называют абсолютным (относительным) показателем преломления? 9. Что называют предельным углом полного отражения? 10. В чем различие собирающих и рассеивающих линз? И. Какая линза называется тонкой? 12. Что такое фокусное расстояние линзы, оптическая сила линзы? 13. Как осуществляется построение изображения предметов в линзах? 14. Напишите формулу тонкой линзы. 15. Почему глаз — оптическая система? 16. Какую линзу называют лупой? Чему равно угловое увеличение лупы? 17. Из каких оптических элементов состоит микроскоп? От чего зависит увеличение микроскопа? 18. Дайте понятие разрешающей способности оптического прибора. 19. Из каких оптических элементов состоит телескоп-рефрактор? Напишите выражение для углового увеличения телескопа-рефрактора.

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** На горизонтальном дне озера глубиной 1,8 м лежит плоское зеркало. На каком расстоянии $s$ от места вхождения луча в воду этот луч снова выйдет на поверхность воды после отражения от зеркала? Угол падения луча 30°.

**Дано:** $h$ = 1,8 м; $\alpha$ = 30°; $n_{21}$ = 1,33.

**Найти:** $s$.

Решение. Построим ход луча. Пусть луч света падает на поверхность водоема в точку *A* под углом $\alpha$ (рис. 18.19). На границе раздела двух сред луч преломляется. Угол преломления равен $\beta$. По закону преломления, $\sin\alpha/\sin\beta = n_{21}$.

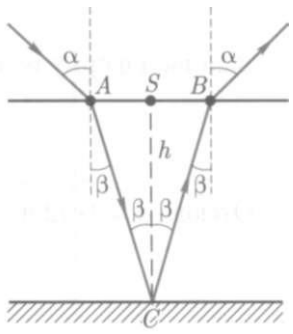


Рис. 18.19

Преломленный луч, отразившись в точке *C* от плоского зеркала, лежащего на дне водоема, выйдет из воды в точке *B*. Рассмотрим $\Delta ABC$. В этом треугольнике

$$s = AB = 2h\,\mathrm{tg}\,\beta, \quad \mathrm{tg}\,\beta = \sin\beta/\cos\beta.$$

Найдем из (18.5) $\sin\beta = \sin\alpha/n_{21}$, тогда

$$s = \frac{2h\sin\alpha}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2\alpha}}.$$

Вычисления:

$$s = \frac{2\cdot 1{,}8\ \text{м}\cdot 0{,}5}{\sqrt{1{,}33^2 - 0{,}5^2}} = 1{,}46\ \text{м}.$$

Ответ: *S* — 1,46 м.

• Задача 2. Луч света выходит из диэлектрика в вакуум. Предельный угол равен 42°. Определить скорость света в диэлектрике.

Дано: $\alpha = 42°$, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Найти: $v$.

Решение. Скорость света в диэлектрике определяется из соотношения $v = c/n$, где *n* — показатель преломления диэлектрик, ко**торый определяется из условия:** $\sin\alpha = 1/n$. **Следовательно,**

$$v = c\sin\alpha.$$

Вычисления:

$$v = 3\cdot 10^8\ \text{м/с}\cdot 0{,}669 = 2{,}01\cdot 10^8\ \text{м/с}.$$

Ответ: $v$ = 2,01 * $10^8$ м/с.

• Задача 3. На каком расстоянии от предмета нужно поместить экран, чтобы двояковыпуклая линза с радиусами кривизны поверхностей R = 0,2 м и показателем преломления *n* = 1,5 давала действительное изображение предмета, увеличенное в два раза?

Дано: $R_1 = R_2 = 0{,}2$ м; $n = 1{,}5$; $\Gamma = 2$.

Найти: $f + d$.

Решение. Изображение предмета действительное и увеличенное, следовательно, предмет *AB* помещен между главным фокусом *F* и двойным фокусным расстоянием *2F*. Учитывая это, построим чертеж и определим соотношение между $d$ и $f$ (рис. 18.20). Из подобия треугольников *ABO* и $A'B'O$ и условия задачи имеем, $f/d = 2$, откуда

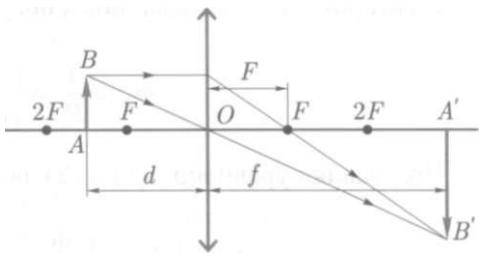


Рис. 18.20

$$f = 2d. \qquad (1)$$

Запишем формулу линзы (18.8) с учетом (1):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{2d}.$$

Отсюда d=3F/2 и с учетом (1)

$$f + \frac{d}{2}.$$

Из (18.9) определим значение $F$.

$$\frac{1}{F} = (1{,}5 - 1)\left(\frac{1}{0{,}2\text{ м}} + \frac{1}{0{,}2\text{ м}}\right) = 0{,}2\text{ м}.$$

Окончательно получаем $f + d = \dfrac{9 \cdot 0{,}2\text{ м}}{2} = 0{,}9\text{ м}.$

Ответ: f+d = 0,9м.

• Задача 4. Двояковыпуклая линза из стекла (п = 1,5) имеет оптическую силу $5\text{ м}^{-1}$. Когда эту линзу погружают в жидкость с показателем преломления $n_2$ = = 1,67, она действует как рассеивающая. Определить оптическую силу и фокусное расстояние линзы в жидкости. Построить изображение точки, находящейся на главной оптической оси на тройном фокусном расстоянии от линзы $(d_1 = 3F_1)$.

**Дано:** $n = 1{,}5$, $n_1 = 1$, $n_2 = 1{,}67$; $\Phi_1 = 5$ м; $d_1 = 3$.

**Найти:** $\Phi_2$, $F_2$, $f_1$, $f_2$.

**Решение. В случае когда линза находится в воздухе, $n_1$ = 1 и формула линзы принимает вид**

$$\Phi_1 = \frac{1}{F_1} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \qquad \textbf{(1)}$$

**где $R_1$ и $R_2$ - радиусы кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу; $F_1 = 1/\Phi = 0{,}2$ м; $\Phi_1$ — оптическая сила линзы. Отсюда**

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{\Phi_1}{n-1}.$$

**Во втором случае, когда линза погружена в жидкость, $n_1$ = 1,67 и**

$$\Phi_2 = \frac{1}{F_2} = \left(\frac{n}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \qquad (2)$$

Подставляя уравнение (1) в (2), получим

$$\Phi_2 = \left(\frac{n}{n_2} - 1\right)\frac{\Phi_1}{n-1} = \Phi_1 \frac{(n-n_2)}{n_2(n-1)}; \quad F_2 = \frac{1}{\Phi_2}.$$




*а* *б*

Рис. 18.21

Вычисления:

$$\Phi_2 = \frac{5\ \text{м}^{-1}(1{,}5-1{,}67)}{1{,}67\cdot 0{,}5} = -1{,}015\ \text{м}^{-1};$$

$$F_2 = \frac{1}{-1{,}015\ \text{м}^{-1}} = -0{,}99\ \text{м}.$$

Знак «минус» указывает, что линза, погруженная в жидкость, действует как рассеивающая.

Построим изображения точки **5** в собирающей (рис. 18.21, а) и рассеивающей (рис. 18.21, *б)* линзах.

В первом случае изображение $S'$ точки действительное. По формуле линзы (18.8) определим $f_1$ — расстояние от изображения до линзы:

$$f_1 = \frac{F_1 d_1}{d_1 - F_1},$$

где $d_1$ — расстояние от предмета до линзы.

Так как по условию задачи $d_1 = 3F_1$, то

$$f_1 = \frac{F_1 \cdot 3F_1}{3F_1 - F_1} = \frac{3F_1}{2}$$

Во втором случае линза — рассеивающая. Изображение $S'$ мнимое, поэтому в (18.8) $F_2$ и $f_2$ возьмем со знаком «минус». Определим из (18.8) значение $f_2$:

$$f_2 = \frac{F_2 d_1}{F_2 + d_1} = \frac{3F_1F_2}{F_2 + 3F_1}.$$

Вычисления:

$$f_1 = 1{,}5\cdot 0{,}2 = 0{,}3\ \text{м};\quad f_2 = \frac{3\cdot 0{,}2\cdot 0{,}99}{0{,}99+0{,}6} = 0{,}37\ \text{м}.$$

**Ответ:** $\Phi_2 = -1{,}015\ \text{м}^{-1}$; $F_2 = -0{,}99$ м; $f_1 = 0{,}3$ м; $f_2 = 0{,}37$ м.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Человек, стоящий на берегу озера, видит Луну в небе в направлении, составляющем угол **60°** с горизонтом. На расстоянии **0,9** м от себя человек видит отражение Луны в озере. Определить рост человека.

2. Тонкий пучок света направлен в воздухе на поверхность некоторой жидкости под углом падения **40°.** Угол преломления при этом равен **24°.** Каков будет угол преломления при угле падения **80°?**

3. Луч света направлен из воздуха в стекло (n = **1,5).** Найти углы падения и преломления, если угол между отраженным и преломленным лучами равен **90°.**

**4.** Вычислить предельный угол полного отражения для плексигласа и алмаза.

**5.** Луч света направлен в сероуглероде на границу с воздухом под углом **39°.** Выйдет ли луч в воздух?

6. Предельный угол полного отражения для спирта **47°.** Найти показатель преломления спирта.

**7.** Найти фокусное расстояние рассеивающей (двояковогнутой) линзы, если расстояние от линзы до предмета **12** см, а до изображения **5,5** см.

8. Главное фокусное расстояние линзы равно **10** см. Предмет находится на расстоянии **12** см от линзы. Найти расстояние от изображения до линзы.

9. Изображение предмета, находящегося на расстоянии **0,25** м от двояковыпуклой линзы, получилось действительным, обратным и увеличенным в три раза. Каково фокусное расстояние линзы?

10. Главное фокусное расстояние собирающей линзы равно ***F.*** На каком расстоянии от линзы нужно поместить предмет, чтобы увеличение было больше **2,** но меньше **3?**

11. Двояковыпуклая стеклянная линза имеет радиусы кривизны поверхностей **0,3** и **0,5** м. Определить оптическую силу линзы и главное фокусное расстояние. Как изменятся искомые величины, если линзу погрузить в воду? в сероуглерод? Построить изображение точки, находящейся на главной оптической оси на двойном фокусном расстоянии от линзы.

12. Двояковыпуклая линза из стекла обладает оптической силой **5** дптр. Где помещен предмет, если его мнимое изображение получено на расстоянии **0,25** м от линзы? Где будет находиться изображение, если линзу и предмет поместить в воду? Дать схему лучей в обоих случаях.

13. Стеклянная двояковогнутая линза с оптической силой **3,33** дптр отстоит от предмета на расстоянии **0,2** м. Нарисовать ход лучей с соблюдением масштаба и определите расстояние от линзы до изображения. Как изменится ход лучей и где будет изображение, если линзу и предмет поместить в сероуглерод?

**Ключевые слова:** *законы отражения, закон преломления, полное отражение, закон прямолинейного распространения света, линза, лупа, микроскоп, телескоп.*

## Глава 19

# ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

## 19.1. Интерференция света. Когерентность световых лучей

**Интерференция света.** ***Интерференцией*** называют явление, возникающее при наложении двух (или нескольких) световых волн одинакового периода в однородной изотропной среде, в результате чего происходит перераспределение энергии волн в пространстве.

Необходимым условием интерференции волн является их когерентность, т.е. равенство их частот и постоянная во времени разность фаз[1]. Когерентные световые волны можно получить только от одного источника.

Для этого нужно каким-либо образом разделить один луч на два, пустить их по разным оптическим путям, а затем снова соединить их. Тогда разность фаз определится разностью хода лучей. При постоянной разности хода разность фаз также постоянна.

Принцип суперпозиции. Для световых волн, как и для любых других, справедлив принцип суперпозиции. Поскольку свет имеет электромагнитную природу, применение этого принципа означает, что результирующая напряженность электрического (магнитного) поля двух световых волн, проходящих через одну точку, равна векторной сумме электрических (магнитных) полей каждой из волн в отдельности.

При сложении плоских когерентных волн амплитуда результирующего колебания

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1), \qquad (19.1)$$

где $(\varphi_2 - \varphi_1)$ — разность фаз слагаемых волн.

Анализ уравнения (19.1) позволяет сделать следующие выводы:

1) если $\varphi_2 - \varphi_1 = 0, 2\pi, 4\pi, ..., 2k\pi$, где $k = 1, 2, 3$, то $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$ и $A = A_1 + A_2$;

2) если $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi, 3\pi, 5\pi, ..., (2k\pi + 1)\pi$, то $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ и $A = |A_1 - A_2|$.

В первом случае происходит усиление результирующего колебания, во втором — ослабление. Если при этом $A_1 = A_2$, то $A_{max} = 2A_1$, а $A_{min} = 0$. Во втором случае происходит полное гашение света светом.

Обычно эти условия формулируются не через разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$, а через разность хода волн 6. Известно, что фазе $\varphi = \pi$ соответствует пройденной волной путь, равный половине длины волны $\lambda/2$. Тогда *условие максимумов* можно сформулировать следующим образом:

максимальное усиление результирующего колебания наступает, если разность хода слагаемых волн равна четному числу полуволн или целому числу длин волн:

$$\delta = 2k(\lambda/2) = k\lambda. \qquad (19.2)$$

Аналогично формулируется *условие минимумов:*

ослабление результирующего колебания происходит, если разность хода слагаемых волн равна нечетному числу полуволн:

$$\delta = (2k + 1)\lambda/2. \qquad (19.3)$$

Значения *к* — 1, 2, 3,... называют *порядком интерференционного максимума (минимума).*

На рис. 19.1 показано, как происходит интерференция волн, имеющих равные амплитуды. Если разность хода равна нечетному числу полуволн (рис. 19.1, *а*), то амплитуды $A_1$ и $A_2$ имеют разные знаки, результирующая амплитуда $A$ − 0 и

[1] Этому условию удовлетворяют монохроматические волны, т. е. волны одной строго определенной частоты (длины волны) и постоянной амплитуды.

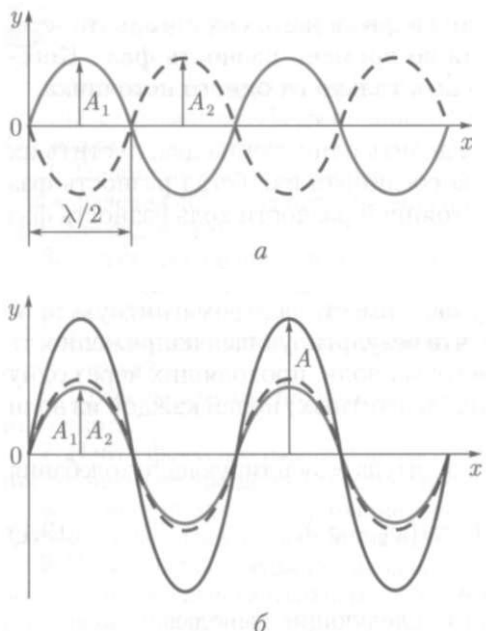



Рис. 19.1

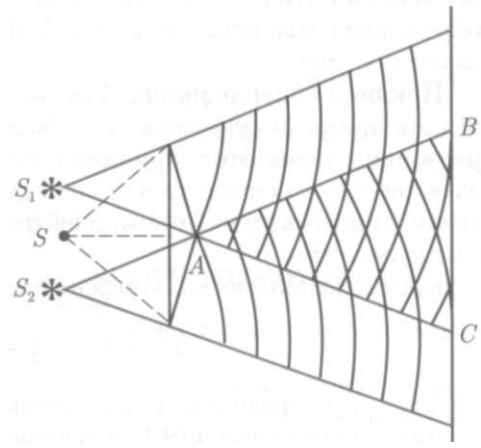



Рис. 19.2

происходит гашение волн. Если разность хода равна четному числу полуволн (рис. **19.1, *б*),** то амплитуды $A_1$ и $A_2$ имеют одинаковые знаки, $A = A_1 + A_2 = 2A_1$ и происходит усиление света.

Известно, что излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых отдельными атомами. Продолжительность излучения отдельного атома составляет $10^{-8}$ с. За это время в вакууме образуется цуг волн (последовательность горбов — впадин) протяженностью около **3** м, т. е.

$$\delta = ct = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 10^{-8} \text{ с} = 3 \text{ м}.$$

Поскольку тело одновременно излучает большое количество атомов, возбуждаемые ими цуги волн, накладываясь друг на друга, претерпевают случайные скачкообразные изменения, т. е. они не являются когерентными и устойчивой картины интерференции не наблюдается. Для наблюдения устойчивой картины интерференции необходима согласованность волн по времени и длине.

Метод получения когерентных световых волн.* Для получения когерентных световых пучков применяют различные искусственные приемы. Физическая сущность всех приборов (зеркала Френеля, бипризмы Френеля, щели Юнга и т.д.) для наблюдения интерференции света одна и та же: свет от одного источника идет к экрану двумя различными путями.

Схема наблюдения интерференции света с помощью бипризмы Френеля изображена на рис. **19**.2. В этой схеме для раздвоения волны, идущей от источника *S*, использовано преломление света. Волна, идущая от источника *S*, раздваивается путем преломления в двух половинах бипризмы и доходит до экрана двумя различными путями. На экране в области *A B C* наблюдается интерференция двух систем когерентных волн, как бы исходящих из двух источников $S_1$ и $S_2$, которые являются мнимыми изображениями источника *S*.

## 19.2. Интерференция в тонких пленках

Наиболее типичным и распространенным примером интерференции света является интерференция в тонких пленках (мыльная пленка, тонкая стеклянная пластинка и т.д.).

На рис. 19.3 показана тонкая пленка толщиной $d$, на нее под углом $\alpha$ к нормали падает параллельный пучок лучей. Рассмотрим результат интерференции в лучах, отраженных от пленки. Луч $SA$, попадая в точку $A$, частично отражается $(AE)$, частично преломляется $(AB)$. Преломленный луч $AB$ испытывает отражение от нижней поверхности пленки в точке $B$ и, преломляясь в точке $C$, выходит из пленки $(CD)$. Лучи $AE$ и $CD$ когерентны, так как образованы из одного луча $SA$.

Найдем оптическую разность хода $\delta$ лучей $AE$ и $CD$.

> Оптический путь равен геометрическому пути, умноженному на показатель преломления среды, в которой распространяется свет.

Из точки $C$ проведем нормаль $CK$ к лучам $AE$ и $CD$. Оптические пути лучей $AE$ и $CD$ от нормали $(Ж$ до места их наложения (в фокусе линзы) одинаковы. Так как луч $AE$ проходит в первой среде, показатель преломления которой $щ = 1$ (воздух), оптический путь $AK$, а луч $CD$ во второй среде с показателем преломления $n$ (пленка) — оптический путь $(AB+BC)n$, то $\delta = (AB+BC)n - AK$. Из рис. 19.3 следует, что $AB = BC = d/\cos\gamma$, а $AK = AC\sin\alpha$, но $AC = 2d\,\mathrm{tg}\,\gamma$, тогда $AK$ — $= 2d\,\mathrm{tg}\,\gamma\sin\alpha$. Выполнив эти тригонометрические преобразования, получим, что разность хода двух лучей

$$\delta = \frac{2dn}{\cos\gamma} - 2d\,\mathrm{tg}\,\gamma\sin\alpha = \frac{2dn}{\cos\gamma} - \frac{2d\sin\gamma\sin\alpha}{\cos\gamma}$$

**Но** $\sin\alpha = n\sin\gamma$**; следовательно,**

$$\delta = \frac{2dn\left(1-\sin^2\gamma\right)}{\cos\gamma} = 2dn\cos\gamma = 2d\sqrt{n^2 - n^2\sin^2\gamma} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}.$$

Для получения окончательной разности хода необходимо учесть, что

> **световые волны, отражаясь от оптически более плотной среды (от среды с большим показателем преломления), изменяют фазу на $\pi$, т. е. получают дополнительную разность хода, равную $\lambda/2$.**

Оптическая разность хода лучей

$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}.$$

Разность хода зависит от толщины $d$ пленки, показателя преломления $n$ материала, угла падения $\alpha$ лучей и длины волны $\lambda$ падающего света. Итак, результат интер-

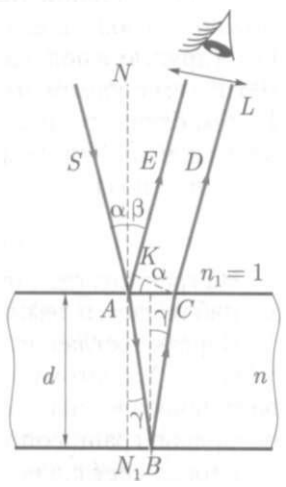


Рис. 19.3

ференции в тонких пленках определяется следующими условиями, выраженными через оптическую разность хода.

*Условие максимума:*

$$2k\frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}. \qquad (19.4)$$

*Условие минимума:*

$$(2k+1)\frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}. \qquad (19.5)$$

Анализируя выражения (19.4) и (19.5), приходим к выводам:

**1) если на тонкую пленку падает монохроматическое излучение** (например, $\lambda = 6{,}7\cdot10^{-7}$ м — красный цвет), **то она в отраженном свете будет либо красной** (19.4), **либо темной** (19.5);
2) **если на тонкую пленку падает белый свет (сложный), то она будет иметь окраску, соответствующую $\lambda$, для которой выполняется условие** (19.4).

Однородная окраска при угле падения а наблюдается в том случае, когда толщина пленки всюду одинакова, в противном случае постоянной окраски не будет и только части пленки, имеющие одинаковую толщину, будут казаться окрашенными в один цвет.

Интерференционная картина наблюдается и в проходящем свете, но так как в проходящем свете нет потери полуволны, то вся картина интерференции изменится на обратную.

## 19.3.* Полосы равной толщины. Кольца Ньютона

**Полосы** равной толщины. Интерференционные полосы в воздушном клине можно наблюдать, если положить одну плоскопараллельную стеклянную пластину на другую, а под один из концов верхней пластинки положить небольшой предмет таким образом, чтобы между ними образовался воздушный клин (рис. 19.4). В этом случае разность хода лучей определяется формулами (19.4) и (19.5). Допустим, что лучи *1-4* падают на клин нормально **i**($\sin\alpha = 0$) и показатель преломления воздуха $n$ = 1,тогда

$$\delta = 2d + \lambda/2. \qquad (19.6)$$

На границе, где стеклянные пластины соприкасаются, $d \approx 0$ и $\delta = \lambda/2$, поэтому наблюдается темная полоса (минимум).

Первая светлая полоса (A; = 1) возникает при $\delta = \lambda$, так как $\delta = 2k(\lambda/2) = 2\cdot1\times$ $\times(\lambda/2) = \lambda$, поэтому $\delta = 2d + \lambda/2 = \lambda$. Отсюда получим, что в этом месте толщина воздушного клина $d = \lambda/4$. Именно такой воздушный промежуток проходит параллельно грани соприкосновения, и светлая полоса имеет вид прямой линии.

Вторая светлая полоса находится там, где толщина воздушного клина достигает значения $d = {}^3/_4\lambda$, так как при этом $\delta = 2\cdot2\,(\lambda/2) = 2d + \lambda/2$.

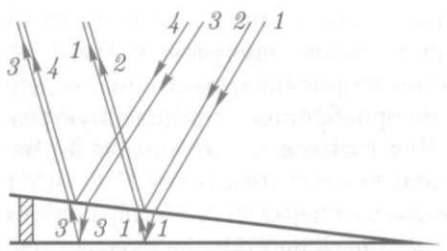



Рис. 19.4

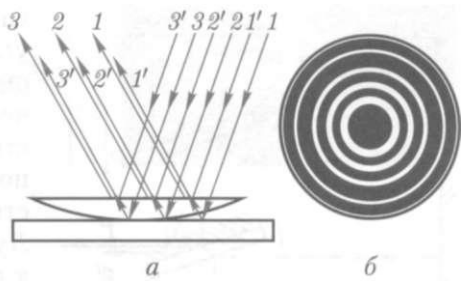



Рис. 19.5

Эти полосы, каждой из которых соответствует своя вполне определенная толщина клина или параллельной пластинки, называют *полосами равной толщины.* Полосы равной толщины могут быть прямыми линиями, концентрическими окружностями и иметь любую другую форму в зависимости от расположения точек, соответствующих $d = \text{const}$. Угол клина должен быть очень малым, иначе полосы равной толщины ложатся друг на друга и их нельзя различить.

**Кольца Ньютона.** Полосы равной толщины можно получить, если положить плосковыпуклую линзу с большим радиусом кривизны $(R = 10 - 100\ \text{м})$ на плоскопараллельную пластинку (рис. 19.5, *а).* В этом случае полосы равной толщины имеют вид колец, которые называют кольцами Ньютона (рис. 19.5, *б).*

Если на линзу падает монохроматический свет, то волны, отраженные от верхней и нижней границ этой воздушной прослойки, интерферируют между собой и их разность хода зависит от толщины этого воздушного клина. В отраженном свете при этом наблюдается следующая картина: в центре — черное пятно, окруженное чередующимися концентрическими светлыми и темными интерференционными кольцами убывающей ширины (см. рис. 19.5, *б).* В проходящем свете картина обратная: все светлые кольца заменяются темными, а в центре — светлое пятно.

## 19.4. Использование интерференции в науке и технике

Интерференция широко используется в различных областях науки и техники. В настоящее время эталон длины установлен, как определенное число (избранных) длин световых волн. Используя интерференцию, можно определить длины волн, показатели преломления, микроскопические размеры тел, микронеровности на поверхности деталей.

Интерференция в рентгеновской области электромагнитных излучений является основой рентгеноструктурного анализа кристаллических решеток твердых растворов, сплавов и чистых веществ. Для этих целей служат различные по конструкции приборы, называемые ***интерферометрами.*** В каждом интерферометре измеряемый параметр является переменной величиной, а все остальные — постоянные.

Интерферометр Майкельсона.* Первый интерферометр был предложен А. Майкельсоном. Принцип действия интерферометра Майкельсона (рис. 19.6) до сих пор широко применяется в различных типах этих приборов. Прибор состоит из двух зеркал $M_1$ и $M_2$ и полупрозрачной посеребренной пластинки $P_1$

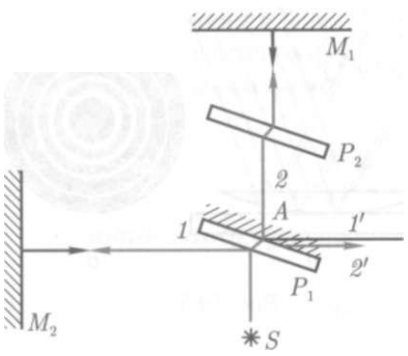



Рис. 19.6

Свет от источника $S$ падает на пластинку $P_1$ под углом 45° и разделяется на два луча, поэтому он относится к группе двулучевых. Пути лучей, как видно из рисунка, различны, вследствие чего они приобретают определенную разность хода. Луч *1*, отражаясь от зеркала $M_2$, частично проходит сквозь пластинку $P_1$ (луч $1'$) Луч *2*, отражаясь от зеркала $M_1$, возвращается к пластинке $P_1$, дважды проходя сквозь стеклянную пластинку $P_2$, параллельную $P_1$. Пластинка $P_2$ отличается от пластинки $P_1$ тем, что она не покрыта слоем серебра. Луч *2* частично отражается от пластинки $P_1$ (луч $2'$). Лучи $1'$ и $2'$ когерентны. Результат их интерференции зависит от оптической разности хода луча *1* от точки *A* до зеркала $M_2$ и луча *2* от точки *A* до зеркала $M_1$. Из-за наличия пластинки $P_2$ их оптические пути одинаковы, поэтому ее называют *компенсатором*. Таким образом, оптическая разность хода лучей $1'$ и $2'$ равна $\delta = 2n_1(l_1 - l_2)$, где $l_1$ и $l_2$ — расстояния от точки *A* до соответствующих зеркал; $n_1$ - показатель преломления воздуха. Если $l_1 = l_2$, то наблюдается максимум интерференции. Смещение одного из зеркал на расстояние $\lambda/4$ даст разность хода лучей $\lambda/2$, что приводит к возникновению минимума. Таким образом, по изменению интерференционной картины можно судить о малых перемещениях одного из зеркал и использовать интерферометр для точных измерений длины. Помещая вместо одного из зеркал какую-либо деталь, можно по форме полос или колец контролировать качество ее обработки.

**Просветление оптики.** Особое место в применении интерференции занимает просветленная оптика. При прохождении света через линзы или призмы от каждой из поверхностей световой поток частично отражается. В сложных оптических системах, где много линз или призм, проходящий световой поток уменьшается значительно; кроме того, появляются блики. Так, было установлено, что в перископах подводных лодок отражается до 50 % входящего в него света. Для устранения этих дефектов оптических систем и применяется метод просветленной оптики. Сущность метода заключается в том, что оптические поверхности покрываются тонкими пленками, создающими интерференционные явления.

Обычно толщина просветляющей пленки $d = \lambda/4$ падающего света. Тогда отраженный свет имеет разность хода, равную $\lambda/2$, что соответствует условию минимума при интерференции. Таким образом достигается четкое изображение, уничтожаются блики. Просветляющие покрытия наносятся на поверхности линз и призм путем химической обработки (травление в кислоте), путем нанесения пленок фторидов при испарении в вакууме или механически.

## 19.5. Дифракция света

**Дифракция.** Свет представляет собой волновой процесс и для него при определенных условиях должно наблюдаться явление ***дифракции*** (отклонение от

первоначального направления). Например, свет, идущий от небольшого яркого источника через отверстие (рис. 19.7, *а*), по правилам геометрической оптики должен дать на экране резко ограниченное светлое изображение отверстия на темном фоне. Но если расстояние от отверстия до экрана значительно превосходит размеры отверстия

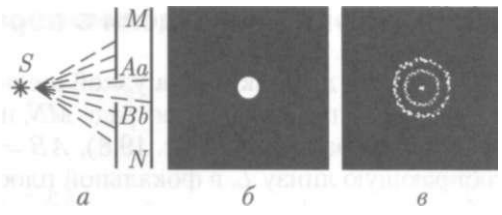



Рис. 19.7

(в несколько тысяч раз), то в результате дифракции света на экране образуется более сложная картина, которая состоит из совокупности светлых и темных полос или линий, форма которых зависит от формы отверстия. На рис. 19.7, *б, в* показаны дифракционные картины для случаев, когда диаметр отверстия сравним с расстоянием до экрана и когда диаметр отверстия в тысячи раз меньше расстояния до экрана.

Точно так же при освещении непрозрачных предметов, когда расстояние между предметом такого рода и экраном значительно превосходит размеры предмета, наблюдается явление дифракции света — на экране вместо тени получается сложная картина. Края тени окаймляются рядом светлых и темных полос, а внутри тени могут наблюдаться области, куда свет заходит.

Явления, рассмотренные выше, могут быть объяснены с помощью метода, предложенного О.Френелем, с применением принципа Гюйгенса-Френеля.

Принцип Гюйгенса - Френеля. Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку фронта волны можно рассматривать как самостоятельный источник колебаний. Френель дополнил этот принцип, введя представления о том, что волновое возмущение в любой точке пространства можно рассматривать как результат интерференции вторичных волн от фиктивных источников, на которые разбивается волновой фронт. Френель впервые высказал предположение, что

**эти фиктивные источники когерентны и могут интерферировать в любой точке пространства, в результате чего элементарные волны могут гасить или усиливать друг друга.**

Для того чтобы определить результат дифракции в некоторой точке пространства, Френель предложил разбивать волновую поверхность на отдельные участки *(зоны Френеля),* расположенные таким образом, чтобы волны, посылаемые двумя соседними зонами в данную точку пространства, приходили в противофазе. Математические операции показывают, что площади зон равновелики, а следовательно, содержат одинаковое количество когерентных источников света. Таким образом,

**колебания, возбуждаемые в данной точке пространства двумя соседними зонами, противоположны по фазе и при наложении должны взаимно ослаблять друг друга.**

Следует заметить, что разности фаз $\pi$ соответствует разность хода $\delta = \lambda/2$.

## 19.6. Дифракция на щели в параллельных лучах

Изучение дифракции на узкой щели. Пусть на узкую щель, расположенную в плоской непрозрачной преграде *MN,* нормально падает плоская монохроматическая световая волна (рис. 19.8), $AB = a$ — ширина щели. За щелью поместим собирающую линзу *L,* в фокальной плоскости которой расположен экран *Э* для наблюдения дифракционной картины.

В соответствии с принципом Гюйгенса - Френеля освещенную щель можно рассматривать как множество точечных когерентных источников света, так что от каждой точки щели распространяются световые когерентные волны по всем направлениям.

Выберем сначала направление, параллельное главной оптической оси линзы и совпадающее с первоначальным направлением лучей. Линза соберет лучи этого направления в своем главном фокусе *F.* Все эти лучи до точки *F* проходят одинаковые оптические пути, поэтому сюда они придут в одинаковой фазе и, интерферируя, усилят друг друга. Следовательно, в главном фокусе линзы всегда наблюдается максимум света, который имеет вид ярко освещенной полосы, идущей параллельно щели.

Рассмотрим теперь лучи, идущие под углом $\varphi$ к первоначальному направлению распространения. Эти лучи линза соберет в своем побочном фокусе *P.* Лучи когерентны, поэтому они интерферируют.

Чтобы узнать, каков результат интерференции вторичных волн, произведем следующие построения. Проведем перпендикуляр *AC к* направлению распространения вторичных волн (см. рис. 19.8). Он является новым фронтом волны, и от этого фронта до рассматриваемой точки *P* вторичные волны не наберут разности хода, так как оптические пути вторичных волн одинаковы (линза не вносит добавочной разности фаз между вторичными волнами). На самом деле вторичные волны, распространяясь от щели *AB* под рассматриваемым углом $\varphi$, наберут определенную разность хода. Между лучами, идущими от крайних точечных источников *A и B,* образуется разность хода $\delta = BC$. Из рис. 19.8 следует, что

$$BC = a\sin\varphi. \tag{19.7}$$

Зоны Френеля. Воспользуемся методом зон Френеля. Для определения числа зон Френеля поступим следующим образом: на $BC = \delta$ отложим отрезки, равные половине длины волны, и через эти точки проведем плоскости, параллельные *AC.* Эти плоскости разделят щель на зоны Френеля, которые в данном случае представляют собой полоски, параллельные краям щели. Из такого построения ясно, что разность хода лучей, идущих от двух соседних зон Френеля, равна $\lambda/2$.

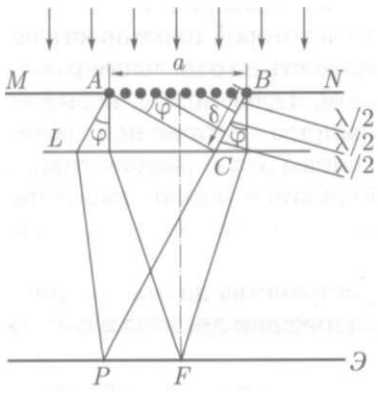


Рис. 19.8

Число зон, укладывающихся в щели, зависит от длины волны и угла $\varphi$. В направлениях, которым соответствует четное число зон Френеля, укладывающихся в щели, имеет место минимум света. Вторичные волны, идущие от двух соседних зон, погасят друг друга, так как разли-

чаются по фазе на $\pi$, Следовательно, условие минимумов интенсивности света имеет вид

$$BC = a\sin\varphi = 2k(\lambda/2),$$

или

$$a\sin\varphi = k\lambda, \qquad (19.8)$$

где $a$ = 1, 2, 3,...

В направлениях, которым соответствует нечетное число зон Френеля, укладывающихся в щели, наблюдаются максимумы света, так как действие одной зоны остается некомпенсированным. Следовательно, условие максимумов имеет вид

$$BC = a\sin\varphi = (2k+1)\lambda/2, \qquad (19.9)$$

где $k$ =1,2,3.

При неизменной ширине щели максимумы света различной длины волны приходятся на различные углы. Если щель освещается белым светом, то нулевой (центральный) максимум — белый. По обе стороны от нулевого максимума располагаются цветные максимумы первого порядка. Действительно, согласно формуле (19.9), красный свет ($\lambda = 0{,}76$ мкм) отклонится на больший угол, чем фиолетовый ($\lambda = 0{,}4$ мкм). Между ними расположатся остальные цвета спектра.

## 19.7. Дифракционная решетка

Дифракционная решетка. Обратимся теперь к случаю, когда имеется очень большое число одинаковых очень узких щелей, расположенных на одинаковых весьма малых расстояниях (рис. 19.9, ***а)***. Такую систему называют ***дифракционной решеткой.*** Назовем щель и расположенную рядом с ней непрозрачную

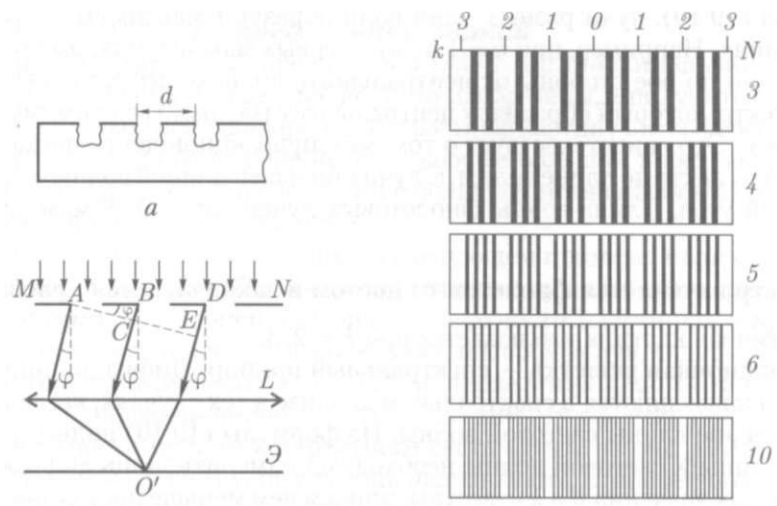



Рис. 19.9

часть элементом решетки. Ширину $d$ одного элемента решетки называют ***постоянной решетки.*** Наличие многократно повторяющихся в строгом порядке элементов решетки вносит в явление дифракции новые качества. Дифракционные картины, образуемые отдельными щелями, накладываются друг на друга на экране. Если каждая из налагающихся дифракционных картин имеет в данном месте экрана минимум, то и суммарная картина, очевидно, тоже имеет минимум. Если каждая из налагающихся дифракционных картин имеет в данном месте экрана некоторую освещенность, то в суммарной картине может быть и большая освещенность, и полное ее отсутствие.

Пусть на решетку $MN$ падает плоскопараллельный пучок когерентных волн (рис. 19.9, *б*). Выберем некоторое направление вторичных волн под углом $\varphi$ относительно нормали к решетке. Лучи, идущие от крайних точек $A$ и $B$ двух соседних щелей, имеют разность хода $\delta = BC$. Такая же разность хода и у вторичных волн, идущих от соответственно расположенных пар точек соседних щелей. Если эта разность хода кратна целому числу длин волн, то при интерференции возникнут главные максимумы, для которых выполняется условие $BC = k\lambda$, или

$$d\sin\varphi = k\lambda, \qquad (19.10)$$

где $k = 0,1, 2,...$ — порядок главных максимумов. Они расположатся симметрично относительно центрального максимума $(k = 0, \varphi = 0)$. Между главными максимумами образуются минимумы, число которых зависит от числа TV всех щелей решетки. Чем больше $N$, тем более резки главные максимумы. На рис. 19.9, *в* представлены дифракционные спектры, полученные от решеток с разным числом щелей, но с одинаковыми значениями $d$.

Все проведенные рассуждения относятся к случаю, когда на решетку падает монохроматический свет. При освещении дифракционной решетки белым светом происходит его разложение в спектр. Только центральные полосы, или нулевые максимумы $(k = 0)$, остаются белыми, остальные максимумы имеют радужную окраску и располагаются симметрично относительно центрального. Как следует из (19.10), лучи разных длин волн образуют максимумы в различных направлениях. Например, при $k = 1$ в двух первых максимумах, расположенных симметрично по обе стороны от центрального, происходит разложение белого света в спектр, который обращен к центральному (белому) максимуму фиолетовым концом. Это свидетельствует о том, что дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр по длине волн, т. е. лучи с большей длиной волны отклоняются на больший угол. Длина волны фиолетовых лучей равна 0,38 мкм, красных - 0,76 мкм.

Спектр начинается фиолетовым цветом и заканчивается красным.

Аналогичная картина наблюдается при $k = 2, 3,...$

Дифракционная решетка — спектральный прибор. Дифракционные решетки широко применяются в спектральном анализе в тех случаях, когда необходимо определение длины световой волны. Из формулы (19.10) видно, что для измерения длины $\lambda$ световой волны необходимо измерить лишь дифракционный угол $\varphi$, так как значения $d$ и $k$ известны, причем чем меньше постоянная решетки $d$, тем ярче выражены главные максимумы и можно точнее измерить длину волны $\lambda$.

Так как дифракционные решетки являются спектральным прибором, они характеризуются разрешающей силой, т. е. способностью разделять близкие спектральные линии с длинами волн $\lambda_1$ и $\lambda_2$. Различать две спектральные линии можно в том случае, если они не сливаются в один максимум, более широкий, чем ширина каждой из линий $\lambda_1$ и $\lambda_2$. За меру разрешающей способности решетки принимают

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = kN. \qquad (19.11)$$

Эта формула показывает, что разрешающая способность дифракционной решетки определяется числом штрихов на ней и порядком спектра. В современных дифракционных решетках число штрихов составляет около 2 ООО на 1 мм, а общее число штрихов достигает значения $1 \cdot 10^6$.

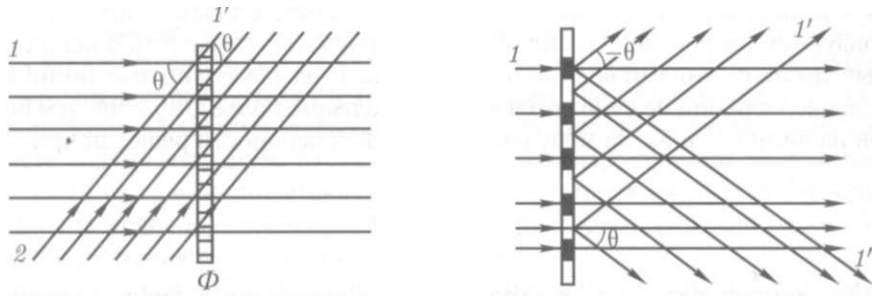
Явление дифракции широко используется в науке и технике. В настоящее время наша промышленность выпускает спектрографы с дифракционными решетками для спектрального анализа. Детальное изучение интерференции и дифракции легло в основу новой отрасли физики — *голографии.*

## 19.8.* Понятие о голографии

Голография. Термин ***«голография»*** происходит от двух греческих *слов: «графо» — пишу, «олос» — полный,* что значит «полная запись». В данном случае речь идет об особом методе регистрации на фотопластинке волнового фронта излучения, идущего от предмета, и затем восстановления этого фронта для получения мнимого или действительного изображения предмета. Для этого фотографируют интерференционную картину двух частей волны, которые когерентны между собой. Одна часть волны поступает на фотопластинку непосредственно и называется ***опорной волной,*** а другая часть направляется для освещения изучаемого объекта и после отражения от него поступает на ту же пластинку. Эту часть волны называют ***предметной волной.***

Принцип голографии был предложен в 1947 г. английским физиком Д. Табором. Однако в то время лазеры еще не были изобретены, а получить с помощью тепловых источников неподвижную и контрастную картину интерференции очень трудно. Только лазерное излучение, обладающее большой пространственной и временной когерентностью в сочетании с большой интенсивностью, дало голографии возможность быстро развиться.

Принцип голографии рассмотрим на следующем примере. Если осветить фотографическую пластинку *Ф* двумя когерентными пучками света (рис. 19.10, *а),* направив *опорный 1* перпендикулярно поверхности пластинки, а *предметный 2* — под углом 9, то световые колебания, интерферируя, дадут на пластинке систему интерференционных полос. После проявления пластинка будет представлять собой дифракционную решетку. Осветим эту решетку перпендикулярным ее поверхности пучком когерентного света (луч *1* на рис. 19.10, *б).* Часть света пройдет через решетку, не изменив направления, и, кроме того, возникнут два параллельных пучка света $1'$ и $1''$, распространяющихся под углами $\theta$ и $-\theta$ к поверхности пластинки. Эти углы в точности такие же, как и угол, под которым освещалась пластинка ранее предметным пучком, а интенсивность пучка $1'$,




*а* *б*

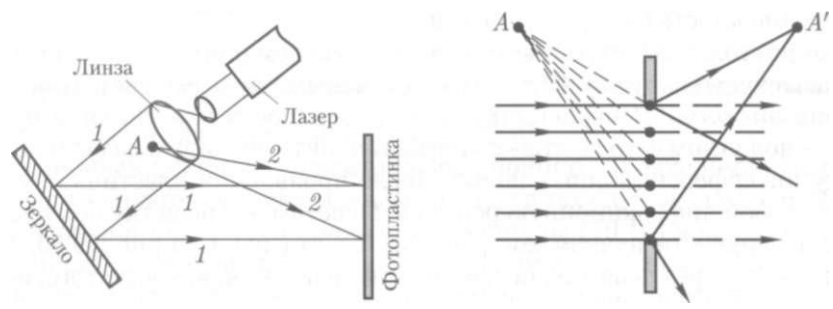
Рис. 19.10

идущего под углом $-\theta$, такая же, как и у падавшего на пластинку предметного пучка. Пластинка «запомнила», под каким углом и с какой интенсивностью на нее падал предметный пучок. Восстановление предметного светового пучка опорным дает возможность записать, а потом восстановить свет, отраженный любым предметом.

На рис. **19.11,** *а* показана схема одной из простейших установок для получения голограммы точки. Одна часть опорной волны *1,* идущей от лазера, попадает на точечный объект *A* и рассеивается от него в виде предметной волны ***2,*** другая часть зеркалом направляется на фотопластинку, где волны *1* и ***2*** интерферируют. Интерференционная картина, зафиксированная на фотопленке, и является голограммой точки *A*.

Для того чтобы получить изображение точки *A* по ее голограмме, надо на голограмму направить то же опорное излучение, с помощью которого она была снята, изображение точки получается в результате дифракции опорной волны. При этом плоская опорная волна, прошедшая через голограмму, образованную одной точкой, в результате дифракции разделяется на три волны (рис. **19.11,** *б*): одну — плоскую, распространяющуюся в первоначальном направлении, и две сферические — расходящуюся, дающую мнимое изображение $A'$ точки *A,* и сходящуюся, дающую действительное изображение *A*.

Любой предмет можно представить как совокупность точек, поэтому каждая точка предмета образует на фотопластинке свою голограмму. Таким образом на голограмме предмета окажутся записанными голограммы всех его точек. Разность




*а* *б*

Рис. 19.11

фаз между опорной волной и волной, идущей от данной точки предмета, различна для различных точек, поэтому от голограммы можно получить почти не искаженное объемное изображение предмета. Так как рассеянные предметом волны попадают совместно с опорной волной во все точки голограммы, то все ее участки содержат информацию о предмете. Если фотопластинка с голограммой разбилась, то любой ее осколок, освещенный опорным пучком, восстановит изображение предмета.

**Использование голографии.** В настоящее время голография применяется для записи и хранения объемных информационных материалов, в кино, на телевидении и т. д. Сейчас трудно оценить все возможности применения голографии, но несомненно, что она является одним из перспективнейших методов современной физики.

## 19.9. Поляризация поперечных волн

**Поляризация механических волн.** Ранее были рассмотрены явления интерференции и дифракции света, подтверждающие его волновую природу. С волновой точки зрения объясняется и явление поляризации, которое можно наблюдать только у поперечных волн. Сущность этого явления проще всего рассмотреть на поперечных механических волнах.

В продольной волне (например, звуковой) направление колебаний полностью определяется направлением распространения волны. В поперечной волне колебания совершаются перпендикулярно направлению распространения. Заданное направление распространения волны еще не определяет направления колебаний, так как направлений, перпендикулярных данному, бесчисленное множество (рис. 19.12).

Рассмотрим опыт. Пусть по шнуру в направлении $SO$ распространяется поперечная волна, на пути которой поставлена преграда с щелью (рис. 19.13, *а*). Очевидно, что волна через щель пройдет только в том случае, когда направление щели $AB$ совпадает с направлением колебаний, т. е. если щель расположена вертикально. Если щель повернуть на 90°, т.е. расположить ее горизонтально, то колебания через щель не пройдут (рис. 19.13, *б*). Это свидетельствует о том, что в шнуре происходили поперечные колебания в заданном направлении. Продольные колебания проходят через щель при любом угле поворота.

Если в поперечной волне колебания совершаются только в одном каком-либо определенном направлении, то волну называют ***плоско-поляризованной,*** или ***поляризованной.***

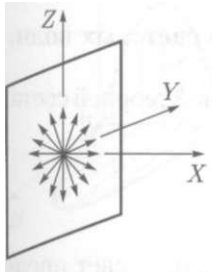



Рис. 19.12

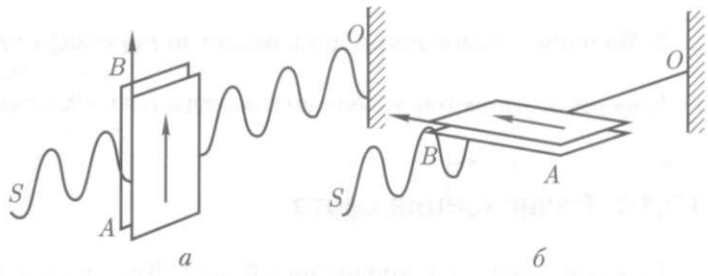



Рис. 19.13

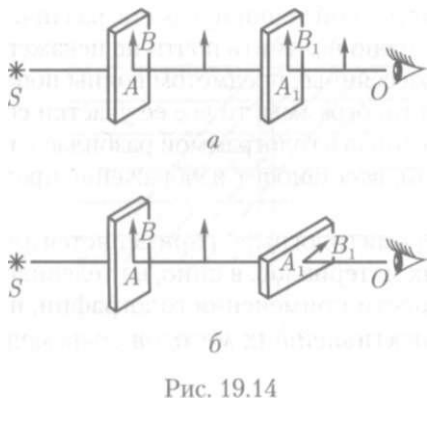



Рис. 19.14

Поляризация световых волн. Рассмотренный опыт говорит о том, что щель можно использовать для анализа поперечных механических колебаний. Чтобы установить, является ли световая волна поперечной, надо иметь такое устройство, которое могло бы выполнять роль указанной выше щели, т.е. поляризовать неполяризованную волну и анализировать состояние поляризованной волны (определять направление ее колебаний). Роль такой щели могут выполнять некоторые кристаллы, например турмалин. Вырезанные из него определенным образом илосхопараллелътгыеттастанки, как следует из опыта, способны пропускать световые колебания только одного направления. Следовательно, турмалиновые пластинки могут быть использованы для выяснения характера (поперечности) световых волн.

Поясним, почему турмалин и некоторые другие кристаллы могут поляризовать свет. Как известно,

кристаллы — тела анизотропные, их оптические свойства различны по различным направлениям.

У турмалина анизотропия проявляется в том, что он сильно поглощает излучение с колебаниями одного определенного направления, а излучения с колебаниями в перпендикулярном ему направлении почти не поглощает. Это свойство кристаллов называют *дихроизмом.*

Таким образом, проанализировать состояние световых колебаний в световой волне и убедиться в их поперечности можно с помощью двух турмалиновых пластинок. На рис. 19.14, ***а*** пластинки расположены таким образом, что направления пропускаемых ими световых колебаний параллельны друг другу, при этом вторая пластинка пропускает без изменения световую волну, прошедшую через первую. При повороте второй турмалиновой пластинки на 90° (19.14, ***б)*** она полностью гасит колебания, прошедшие через первую пластинку. Первая пластинка, превращающая естественный свет в плоскополяризованный, называется ***поляризатором,*** вторая, определяющая направление колебаний (гасящая поляризованную волну), — ***анализатором.*** Из опыта видно, что поляризатор и анализатор являются взаимозаменяемыми приборами.

Явление поляризации доказывает поперечный характер световых волн.

Поперечность световых волн подтверждается и электромагнитной теорией света.

## 19.10. Поляризация света

Естественный и поляризованный свет. Как было отмечено ранее, свет представляет собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в виде попе-

речных электромагнитных волн длиной $(3{,}8-7{,}6)\cdot 10^{-7}$ м. Электромагнитная волна характеризуется векторами напряженности электрического поля **E** и индукции магнитного поля **B.** Векторы **E** и **B** расположены во взаимно-перпендикулярных плоскостях и колеблются в одинаковых фазах (на рис. 19.15 волна распространяется в направлении оси *X).* Колебания этих векторов в изотропной среде происходят перпендикулярно направлению распространения колебаний — к лучу.

Во многих случаях (при физиологических и фотохимических воздействиях, люминесценции, фотоэффекте и т.д.) действие световых волн на вещество в основном определяется вектором напряженности электрического поля **E,** так как большинство явлений, наблюдаемых в веществе под действием света, связано с воздействием на электроны.

Поэтому рассматривая далее колебания светового луча, будем понимать под ним колебания вектора **E.**

Электромагнитные волны, излучаемые светящимся телом, складываются из отдельных волн, которые испускаются его атомами (элементарными вибраторами). Вследствие того что атомы беспрерывно меняют свою пространственную ориентацию, направление колебаний вектора **E** результирующей световой волны непрерывно меняется.

Если в световой волне колебания вектора **E** происходят по всевозможным направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, то свет называют *естественным* (рис. 19.16, *а).*

Световые колебания, как и любые колебания, происходящие в одной плоскости, можно разложить по правилу параллелограмма на два колебания, происходящие в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. Следовательно, естественный луч света мы можем представить как луч, в котором колебания происходят в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, например в плоскости чертежа, которую считаем совпадающей с плоскостью падения (колебания условно отмечаются черточками), и в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (колебания отмечаются точками). На рис. 19.16, *б луч* естественного света условно изображен как прямая, на которой расположено одинаковое число черточек и точек.

Если колебания вектора **E** происходят только в одном направлении, перпендикулярном лучу, то свет называют ***плоскополяризованным.*** Прямая с черточками (рис. 19.16, *в)* или точками (рис. 19.16, *г)* изображает луч плоскополяризованного света. Частично поляризованный луч света изображен на рис. 19.16, *д, е.*

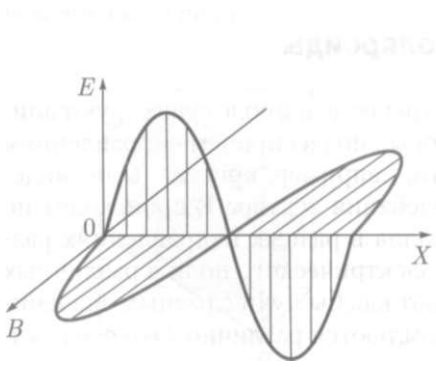



Рис. 19.15

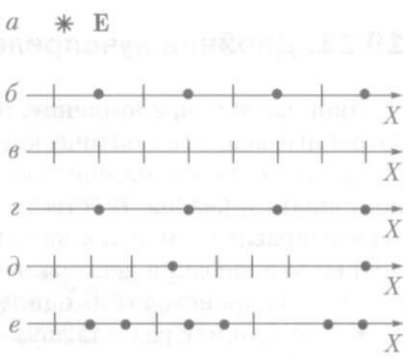



Рис. 19.16

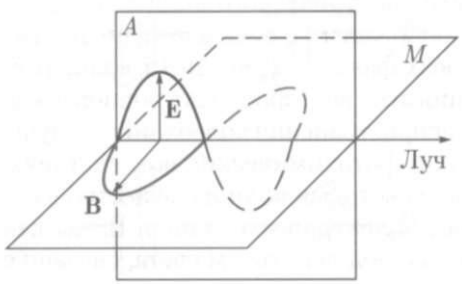



Рис. 19.17

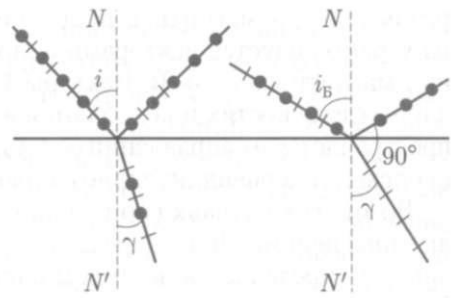



Рис. 19.18

Плоскость *A,* проходящую через направление колебаний вектора **E** и луч (рис. 19.17), называют ***плоскостью колебаний.***

*Плоскость M,* проходящую через луч и перпендикулярную направлению колебаний вектора **E,** т. е. плоскость, в которой колеблется вектор **B,** называют ***плоскостью поляризации.*** Плоскости колебаний и поляризации всегда взаимно-перпендикулярны.

Поляризация света при его отражении и преломлении. Поляризованный свет может быть получен при его отражении и преломлении от границы раздела двух диэлектриков. Если угол падения света на границу раздела двух диэлектриков не равен нулю, отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными (рис. 19.18, ***а).*** В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения, в преломленном луче — колебания, параллельные плоскости падения. При угле падения, удовлетворяющем условию

$$\operatorname{tg} i_Б = n, \tag{19.12}$$

где $n$ — относительный показатель преломления двух сред, отраженный луч поляризован полностью (рис. 19.18, *б),* а преломленный — только частично. Соотношение (19.12) называют ***законом Брюстера,*** угол $i_Б$ — ***углом Брюстера,*** или ***углом полной поляризации.*** Из закона Брюстера и закона преломления $\sin i_Б / \sin \gamma = n$ следует, что при падении луча на диэлектрик под углом полной поляризации отраженный и преломленный лучи взаимно-перпендикулярны.

## 19.11. Двойное лучепреломление. Поляроиды

Двойное лучепреломление. Как отмечалось ранее, в природе существуют анизотропные вещества, оптические свойства которых по различным направлениям различны. К таким материалам можно отнести, например, кристаллы исландского шпата и кварца. В естественном луче колебания вектора **E** происходят по всем направлениям, а так как свойства кристалла в разных направлениях различны, то колебания вектора напряженности электрического поля в различных плоскостях происходят не одинаково, возникают как бы лучи с разным значением **E —** на границе раздела двух сред они преломляются различно. Это означает, что колебания, происходящие в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, которые характеризуются двумя компонентами вектора напряженности элект-

рического поля ($\mathbf{E}_x$ и $\mathbf{E}_y$), фактически имеют разные показатели преломления. При этом наблюдается раздвоение луча, или двойное лучепреломление: естественный свет, войдя в кристалл исландского шпата, раздваивается на два луча, поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Для одного из лучей выполняются законы преломления и поэтому этот луч называют ***обыкновенным,*** для другого — не выполняются и луч называют ***необыкновенным.***

Направления, вдоль которых двойного лучепреломления нет и оба луча (обыкновенный и необыкновенный) распространяются с одинаковыми скоростями, называют ***оптическими осями кристалла.*** Если такое направление одно, то кристаллы называют *одноосными.* Плоскость, проходящую через падающий луч и оптическую ось кристалла, называют главным *сечением кристалла.*

Обыкновенные и необыкновенные лучи являются одновременно лучами поляризованными; обыкновенный луч поляризован в плоскости главного сечения, а необыкновенный — в плоскости, перпендикулярной плоскости главного сечения.

**Призма Николя.** Двоякопреломляющие кристаллы непосредственно не используют как поляризаторы, так как пучки обыкновенных и необыкновенных лучей выходят из кристалла под очень малым углом друг к другу или даже перекрываются. Чтобы «развести» эти лучи, пользуются различными поляризующими призмами. Наибольшее распространение получила *призма Николя,* или *николь.* Она состоит из кристалла исландского шпата, имеющего форму параллелепипеда (рис. 19.19). Кристалл разрезается наклонно по плоскости *BEDP* на две части, а затем склеивается канадским бальзамом. Показатель преломления канадского бальзама 1,549. Показатель преломления исландского шпата для обыкновенных лучей 1,658. Для необыкновенных лучей показатели преломления исландского шпата различны для различных направлений: для лучей, идущих параллельно длинным ребрам призмы, он равен 1,515.

Пусть естественный луч падает на нижнюю грань призмы (рис. 19.20) в плоскости главного сечения (плоскости чертежа) под таким углом, что преломленные лучи, раздвоившись, идут почти параллельно продольным ребрам. Необыкновенный луч, дойдя до слоя канадского бальзама, вступает в него как в среду более преломляющую и продолжает путь, не отклоняясь, так как слой канадского бальзама очень тонок. Обыкновенный луч встречает слой бальзама как среду менее преломляющую и, так как угол его падения больше предельного угла, испытывает полное отражение и поглощается зачерненной гранью призмы. Из призмы выходит один только необыкновенный луч. Направление колебаний вектора **E** показано на рис. 19.20.

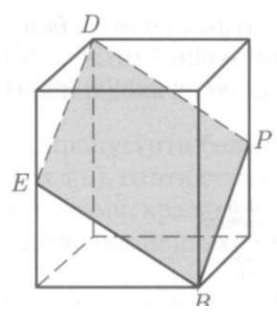



Рис. 19.19

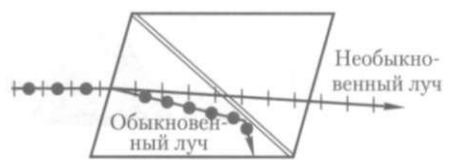



Рис. 19.20

Поляроиды. Используя дихроизм таких двоякопреломляющих кристаллов, как, например, герапатит, изготовляют поляризационные светофильтры (поляроиды). Они представляют собой целлулоидную пленку, покрытую тонким слоем кристалликов герапатита, ориентированных определенным образом. Эти пленки ведут себя подобно пластинкам, вырезанным из кристалла турмалина: в них происходит двойное лучепреломление и, так же как в пластинке турмалина, один из поляризованных лучей поглощается в самом герапатите, а другой выходит наружу.

Такие устройства, как поляроиды и призмы, могут работать как поляризаторы и анализаторы. Опыт показывает, что некоторые кристаллы и растворы органических соединений при прохождении через них поляризованного луча поворачивают плоскость его поляризации, причем угол поворота плоскости колебаний вектора E пропорционален пути, пройденному светом в этом веществе. Вещества, вращающие плоскость поляризации, называют *оптически активными.* К их числу принадлежат кварц, раствор сахара в воде и др.

Явление поляризации широко используют в народном хозяйстве. Оно применяется для определения концентрации растворов оптически активных веществ, для определения мест упругих напряжений, возникающих в результате механических нагрузок, при изучении быстро протекающих процессов, таких, например, как звукозапись и воспроизведение звука.

## 19.12. Дисперсия света

Дисперсия света. Если пропустить пучок белого света через стеклянную призму, то на экране возникнет полоска с непрерывно меняющейся окраской, которая называется *призматическим,* или ***дисперсионным, спектром*** (рис. 19.21). Разложение белого света в спектр при прохождении через призму — проявление дисперсии. ***Дисперсией*** называют зависимость скорости света в веществе от длины волны, или зависимость показателя преломления вещества от длины волны.

Почему же белый свет, проходя через призму, разлагается в спектр? С точки зрения волновой теории всякий колебательный процесс можно характеризовать частотой колебаний, амплитудой и фазой. Амплитуда колебаний (точнее, ее квадрат) определяет энергию колебаний. Фаза играет основную роль в явлениях интерференции. Цвет всех лучей связан с длиной волны.

Дисперсия света характерна для всех сред, кроме вакуума.

В вакууме скорость распространения электромагнитных волн любой длины одна и та же $(3 \cdot 10^8$ м/с), а в веществе зависит от длины волны. Поэтому отличаются и показатели преломления $n = c/v$ для различных волн, входящих в состав

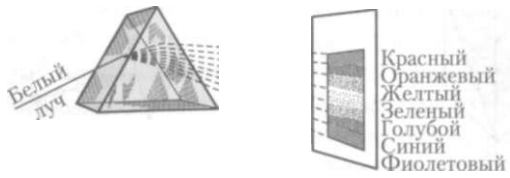



Рис. 19.21

Таблица 19.1

| Длина волны $\lambda$, мкм | Показатель преломления $n$ | | |
|---|---|---|---|
| | флюорит | кварц | каменная соль |
| 0,2 | 1,50 | 1,65 | 1,75 |
| 1,6 | 1,43 | 1,53 | 1,53 |
| 3,2 | 1,41 | 1,47 | 1,51 |

белого света. Проходя через призму, составные части белого луча испытывают различное преломление и выходят расходящимся цветным пучком.

Явление дисперсии света наблюдается не только при прохождении света через призму, но и во многих других случаях. Так, например, преломление солнечного света в водяных каплях, образующихся в атмосфере, сопровождается разложением его на цветные лучи; этим объясняется образование радуги.

*Дисперсию **называют** нормальной, если показатель преломления **возрастает** с уменьшением длины **волны.*** Коэффициент преломления некоторых веществ в зависимости от длины волны приведен в табл. 19.1.

При сравнении спектров, полученных с помощью призм с равными преломляющими углами, но изготовленных из различных веществ, установлено, что цветные лучи не только отклонены на разные углы, что обусловлено разными значениями $n$ для одной и той же $\lambda$, но и их спектры растянуты на большую или меньшую длину из-за различия в значении дисперсии для разных веществ.

Сложение спектральных цветов. Первые экспериментальные исследования дисперсии света принадлежат Ньютону, который показал, что белый свет является сложным и состоит из семи цветов: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового. Собирая линзой в одно место вышедшие из призмы цветные лучи, Ньютон получил на экране вместо окрашенной белую полоску. Следовательно, при соединении цветных лучей спектра образуется белый цвет. Белый цвет можно получить при смешении двух (или более) цветов. Такие цвета называют *дополнительными.* Примером дополнительных цветов являются желтые и синие лучи. Смешивая в различной пропорции излучение трех основных цветов, какими являются красный, зеленый и фиолетовый, можно получить любую окраску лучей.

Цвета тел. В окраске тел наблюдается большое разнообразие. Цвет тела обусловлен его окраской, свойствами его поверхности, оптическими свойствами источника света и среды, через которую свет распространяется.

Цвет прозрачного тела определяется составом того света, который проходит через него.

Если пропустить белый свет через окрашенные стекла (например, красное, зеленое и др.), то эти стекла преимущественно пропустят те цвета, в которые они окрашены сами: красные — красный; зеленые — зеленый и т. д. На этом основано применение различных световых фильтров.

Цвет непрозрачного тела определяется смесью цветов, которые оно отражает.

Некоторые тела кажутся нам только желтыми, другие — синими и т.д. Это значит, что тело преимущественно отражает желтые (синие) лучи. Тело, отражающее в большом количестве все цветные лучи, будет казаться белым. Тело, поглощающее почти все падающие на него лучи, будет казаться черным.

В природе не существует ни абсолютно белых, ни абсолютно черных тел.

Способность тел поглощать определенные цветные лучи называют ***избирательным поглощением.*** От него и зависит окраска тел.

Если падающий на окрашенную поверхность свет по своему составу отличается от дневного, то эффекты освещения могут быть совершенно другими. Даже переход от дневного света к искусственному значительно меняет соотношение цветов и оттенков предметов и особенно художественных произведений. Желтые и зеленые цвета кажутся при вечернем освещении более тусклыми, а синий цвет — почти черным.

## 19.13.1° Виды спектров

Призматический спектр. Между спектрами, получаемыми в дифракционной решетке и в призме, имеется существенное различие.

Дифракционная решетка разлагает падающий свет непосредственно в зависимости от длин волн, поэтому по углам, образованным направлениями соответственных дифракционных максимумов, можно вычислить длину волны. Призма разлагает падающий пучок света в зависимости от значения коэффициента преломления. Поэтому для определения длины волны света необходимо знать зависимость $n = f(\lambda)$, т. е. учитывать свойства веществ, из которого сделана призма.

Дифракционный спектр. Порядок расположения составных цветов в спектре призмы и в спектре дифракционной решетки различен. В дифракционной решетке синус угла отклонения пропорционален длине волны. В результате красные лучи, имеющие большую длину волны, отклонятся дифракционной решеткой сильнее, чем фиолетовые лучи. В призме же коэффициент преломления в прозрачных веществах падает с увеличением длины волны. Коэффициент преломления красных лучей меньше, чем фиолетовых, поэтому призма отклоняет их слабее, чем фиолетовые.

Спектр Солнца и звезд. В зависимости от температуры атмосферы Солнца и звезд они различаются по цвету: самые горячие звезды имеют температуру порядка $10^5$ К, голубые — порядка $3 \cdot 10^4$ К, желтые — порядка $6 \cdot 10^3$ К, самые холодные, красные, — порядка $3 * 10^3$ К.

Спектры звезд отличаются интенсивностью и числом линий различных химических элементов и соединений. В спектрах очень горячих звезд выделяются яркие линии излучения гелия и азота, а в спектрах наиболее холодных — сильные полосы поглощения различных молекулярных соединений.

**В** атмосферах всех звезд преобладающими являются водород и гелий.

Источником энергии, получаемой звездами и Солнцем, служат термоядерные реакции превращения водорода в гелий в их недрах при температуре порядка 10 млн К.

Рассматривая с помощью спектроскопа спектр Солнца, можно заметить, что его сплошной спектр перерезан многочисленными темными линиями, находя-

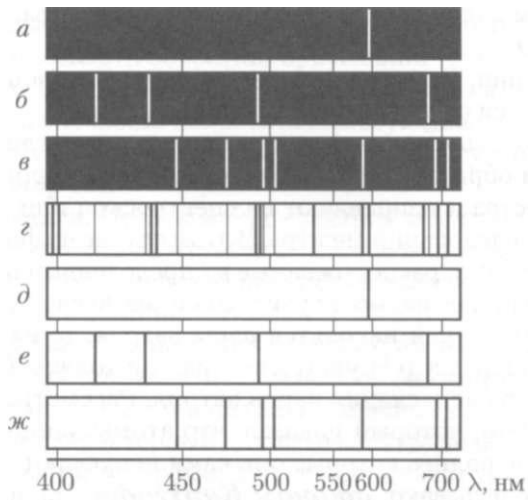



Рис. 19.**22**

щимися в различных частях спектра (рис. 19.22, *г*). Первым описал эти темные линии немецкий ученый И. Фраунгофер, поэтому эти линии называются *фраунгоферовыми.* Объяснение фраунгоферовых линий в спектре Солнца дал Г. Кирхгоф. Если атомы поглощают именно те волны, которые они могут испускать, то каждое вещество, которое имеется в солнечной или земной атмосфере, само поглощает характерные для него лучи. Поэтому и появляются темные линии на фоне сплошного солнечного спектра. Устанавливая положение темных линий в спектре, можно определить, через какие вещества проходили солнечные лучи в атмосфере Солнца.

Установлено, что в солнечной атмосфере имеются водород, натрий, кальций, железо и другие вещества, встречающиеся и на Земле. Интересно отметить, что в спектре Солнца помимо известных элементов обнаружили элемент, который на Земле еще не был известен. Его назвали гелием (от греч. «гелиос» — Солнце). Только спустя 26 лет гелий был найден и на Земле.

## 19.14. Спектры испускания. Спектры поглощения

Спектр испускания. Если свет от раскаленного твердого тела пропустить через призму, то на экране за призмой получим непрерывный ***сплошной спектр*** испускания.

Если источником света является газ или пар, то картина спектра существенно меняется. Наблюдается совокупность ярких линий, разделенных темными промежутками. Такие спектры называют ***линейчатыми.*** Примерами линейчатых спектров могут служить спектры натрия, водорода и гелия (рис. 19.22, *а, б, в*).

Вид спектров светящихся газов зависит от химической природы газа.

Каждый газ или пар дает свой, характерный только для него спектр. Поэтому спектр светящегося газа позволяет сделать заключение о его химическом соста-

ве. Если источником излучения служат молекулы вещества, то наблюдается ***полосатый спектр.***

Спектр поглощения. Все эти три вида спектров — сплошной, линейчатый и полосатый — являются спектрами испускания.

Помимо спектров испускания существуют спектры поглощения, которые получают следующим образом. Белый свет от источника пропускают через пары исследуемого вещества и направляют на спектроскоп или иной прибор, предназначенный для исследования спектра. В этом случае на фоне сплошного спектра видны темные линии, расположенные в определенном порядке. Их число и характер расположения позволяют судить о составе исследуемого вещества. Например, если на пути лучей находятся пары натрия, то на сплошном спектре возникает темная полоса в том месте спектра, где должна была располагаться желтая линия спектра испускания паров натрия. Рассмотренное явление было объяснено Кирхгофом, который показал, что атомы данного элемента поглощают те же световые волны, которые они сами испускают.

Это утверждение называют ***законом Кирхгофа.*** На рис. 19.22, *д-ж* приведены спектры поглощения натрия, водорода и гелия. На рис. 19.22, *г* показан спектр поглощения Солнца.

Чтобы объяснить происхождение спектров, необходимо знать строение атома (см. подразд. 22.6).

Приборы для получения и исследования спектра. Для исследований видимой части спектра служат приборы, называемые ***спектроскопами.*** Один из наиболее простых изображен на рис. 19.23.

Двухтрубный спектроскоп состоит из коллиматора *1,* столика с призмой ***3*** и зрительной трубой ***2,*** которая перемещается относительно призмы микрометрическим винтом. Коллиматор *1* состоит из трубы, имеющей щель ^, установленную в главном фокусе линзы 5 (рис. 19.23). Поэтому лучи, падающие от источника на линзу 5 и проходящие через щель, выходят из нее параллельным пучком. Лучи из линзы 5 падают на переднюю грань призмы ***3,*** разлагаются в призме и выходят из нее системой лучей разных цветов и направлений в зависимости от длины волны, причем все лучи одного цвета параллельны друг другу. Затем лучи поступают в зрительную трубу через объектив *6.*

Так как выходящие из призмы лучи одного цвета параллельны, но не совпадают по направлению с лучами других цветов, в фокальной плоскости объектива 6 возникает ряд параллельных различно окрашенных изображений щели ***4.*** Эти изображения рассматриваются через окуляр **7.**

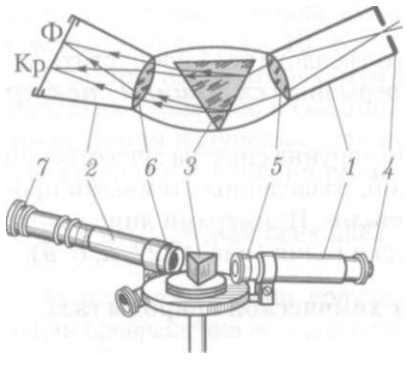


Рис. 19.23

В двухтрубных спектроскопах для определения относительного расположения спектральных линий окуляр зрительной трубы снабжен нитью. Поворотом трубы вокруг призмы совмещают нить окуляра с различными частями спектра. Смещение трубы ***2*** отсчитывается с помощью лимба и горизонтальной миллиметровой линейки, прилегающей к лимбу.

Прибор, регистрирующий спектр на фотопластинке, называют ***спектрографом.***

Более совершенные спектроскопы снабжены третьей трубой, с помощью которой в фокальной плоскости объектива зрительной трубы проецируется шкала длин световых волн. Такой прибор называют ***спектрометром.***

Если в фокальную плоскость поместить щелевую диафрагму, то из всего спектра можно выделить узкий пучок монохроматических лучей. Этот прибор называют ***монохроматором.***

Спектральный анализ. Исследование спектров испускания и спектров поглощения позволяет установить качественный состав вещества. Количественное содержание определенного элемента в соединении производится путем измерения яркости его спектральных линий.

Метод исследования, позволяющий по спектрам испускания и поглощения судить о химическом составе вещества, называют ***спектральным анализом.***

Например, светящиеся газы и пары дают линейчатые спектры, при этом каждый газ или пар имеет характерный для него спектр. Зная длины волн, испускаемых различными газами и парами, по спектру можно установить наличие тех или иных элементов в исследуемом веществе. Если в исследуемом веществе имеется в определенном месте спектра желтая линия, то можно утверждать, что в состав вещества входит натрий. Если в спектре находится одна или несколько линий, которые не соответствуют линиям ни одного из известных элементов, можно утверждать, что обнаружен новый элемент.

Метод спектрального анализа чрезвычайно чувствителен. С его помощью можно обнаружить наличие интересующего элемента даже в том случае, когда количество этого элемента не превышает $10^{-10}$ г, что не может быть обнаружено химическими методами.

Спектральный анализ чрезвычайно важен в различных областях науки, например в астрономии, где является единственным источником всех наших сведений о химическом составе небесных тел. С помощью спектрального анализа был изучен состав Солнца, звезд и туманностей, открыто 25 элементов таблицы Менделеева.

В настоящее время спектральный анализ широко применяется также в геологии, металлургии, химии и других областях науки и техники.

## 19.15. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучения

Ультрафиолетовое излучение. В 1801 г. немецким физиком И. В. Риттером и английским физиком У. Волластоном были открыты невидимые лучи, названные ультрафиолетовыми. Эти лучи занимают спектральную область между фиолетовым концом видимого света и рентгеновскими лучами, в диапазоне длин волн от 400 до 10 нм.

Источниками ультрафиолетового излучения являются тела, накаленные до температуры порядка 3 000 К. Примером могут служить ртутно-кварцевые, ксеноновые, газоразрядные и другие лампы. Естественными источниками ультрафиолетового излучения являются Солнце, звезды, туманности и другие космические объекты.

Ультрафиолетовые лучи обладают очень сильным биологическим действием, поэтому их значение в природе огромно. Излучение в интервале 0,38-0,32 мкм оказывает укрепляющее, закаливающее воздействие, способствует образованию

витамина *D* в организме человека. Излучение в интервале 0,32-0,28 мкм вызывает загар, а в интервале 0,28 - 0,25 мкм оказывает бактерицидное действие. Большие дозы могут вызвать повреждение глаз и ожог кожи.

Ультрафиолетовое излучение очень сильно поглощается земной атмосферой, поэтому его исследование производится в высокогорных районах. Для регистрации этого излучения используются обычные фотоматериалы и различные люминесцирующие вещества, преобразующие ультрафиолетовое излучение в видимое.

Инфракрасное излучение. Инфракрасное излучение было открыто английским ученым В. Гершелем в 1800 г. и занимает спектральную область между красным концом видимого света и коротковолновым радиоизлучением в диапазоне длин волн от 0,76 мкм до 1 - 2 мм. Это излучение несет большую энергию, вызывая сильное нагревание тел, на которые оно попадает, поэтому его часто называют ***тепловым.***

Источниками инфракрасного излучения являются лампы накаливания с вольфрамовой нитью, электрическая угольная дуга и различные газоразрядные лампы. Мощным естественным источником является Солнце, около 50 % излучения его лежат в инфракрасной области.

Инфракрасные лучи проникают в поверхностные ткани человека и животных и оказывают положительное влияние на течение всех биологических процессов. Это излучение широко используется в сельском хозяйстве при устройстве парников. Лучи, отражаясь от парника, вызывают дополнительное нагревание почвы ***(парниковый эффект).*** Инфракрасное излучение применяют для сушки материалов, овощей, фруктов. Созданы приборы, в которых инфракрасное изображение объекта преобразуется в видимое. Инфракрасные локаторы и дальномеры обнаруживают объекты в темноте, если их температура выше температуры окружающей среды. Инфракрасные лазеры используют для наземной и космической связи.

## 19.16. Рентгеновские лучи. Их природа и свойства

Рентгеновские лучи. В 1895 г. В. Рентген, наблюдая процессы в газоразрядных трубках, открыл загадочные лучи, которые теперь называют ***рентгеновскими лучами.*** Они были обнаружены благодаря их способности вызывать свечение флуоресцирующих веществ. Эти лучи вызывали зеленоватое свечение стекла газоразрядной трубки в том месте, где на него падал поток быстрых электронов из катода. Рентгеновские лучи способны проникать через тела, непрозрачные для обычного света, например черную бумагу, картон, тонкие слои металла. Они вызывают почернение фотографической пластинки и потерю заряда электроскопа вследствие ионизации воздуха.



В. Рентген

Дифракция рентгеновских лучей. Возникло предположение, что рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, которые излучаются при резком торможении электронов. Подтверждением этого предположения могло бы быть явление дифракции, присущее всем видам волн. Однако попытки получить диф-

ракционную картину на узких щелях с помощью рентгеновских лучей потерпели неудачу. В 1912 г. М. Лауэ для наблюдения дифракции рентгеновских лучей предложил использовать кристаллы. Кристаллы представляют собой упорядоченную структуру, характеризующуюся межплоскостными расстояниями (расстояниями между узлами кристаллической решетки) порядка нескольких нанометров, и являются естественной пространственной дифракционной решеткой. Опыты, проведенные М. Лауэ и другими физиками, показали, что *рентгеновские лучи — это электромагнитные волны* $8 \cdot 10^{-8}$ *до* $1 \cdot 10^{-12}$ *м, длины которых соответствуют размеру атома, т. е. от до* вских лучей на плоских узких щелях нельзя, так как получить щель такого размера практически невозможно.

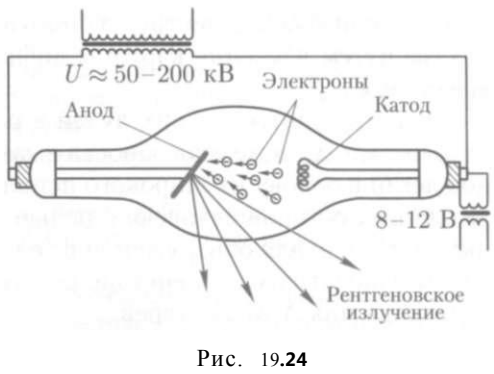


Рис. 19.24

Рентгеновская трубка. Получают рентгеновские лучи в специальных приборах, называемых *рентгеновскими трубками* (рис. 19.24). Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон, давление в котором порядка 0,1 МПа. Источником электронов служит катод, выполненный из вольфрама в виде спирали. Поток электронов, испускаемых раскаленным катодом при термоэлектронной эмиссии, ускоряется в сильном электрическом поле, созданном источником высокого напряжения. Ускоренный поток электронов падает на массивный анод, расположенный под углом порядка 45°. Такая геометрия анода позволяет управлять направлением распространения лучей. Электроны в поле приобретают кинетическую энергию $E_к = mv^2/2 = eU$. Попав на анод, они тормозятся при движении в веществе анода.

**В** результате торможения быстрых электронов возникает тормозное рентгеновское излучение.

Тормозное рентгеновское излучение имеет сплошной непрерывный спектр, так как электроны, бомбардирующие анод, имеют различные скорости. При их торможении возникают лучи различных длин волн.

Максимальная энергия рентгеновского излучения не может превышать энергии электрона, которую тот получил в ускоряющем поле.

Применение рентгеновских лучей. В науке и технике широко используются такие свойства рентгеновских лучей, как их большая проникающая способность, действие на фотопластинки, способность вызывать ионизацию в веществе, сквозь которое они проходят.

Так, *рентгеновская дефектоскопия* — способ определения наличия, местонахождения и размеров внутренних дефектов в материалах и изделиях — основана на различии ослабления рентгеновских лучей при их прохождении сквозь участки изделия различной плотности и протяженности. В рентгеновской дефектоскопии наиболее распространенным является фотографический метод с получением изображения на рентгеновской пленке.

С помощью рентгеноструктурного анализа исследуют атомную структуру вещества путем изучения картины дифракции и рассеяния рентгеновских лучей веществом.

Свойство рентгеновских лучей в различной степени поглощаться разными элементами, а также способность вызывать свечение люминесцирующих экранов легли в основу их широкого использования в медицине для просвечивания различных органов человека с целью диагностики, для лечения злокачественных опухолей, для обнаружения в теле различных включений, например осколков. Физиологическое действие рентгеновских лучей впервые исследовал русский академик А. М. Бехтерев.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Устойчивая картина интерференции света наблюдается при наложении когерентных волн друг на друга. Волны усиливают $(\delta = k\lambda)$ или ослабляют $\left[\delta = \frac{(2k+1)\lambda}{2}\right]$ друг друга в зависимости от разности хода между ними.

Наиболее распространенным примером интерференции света является интерференция в тонких пленках. Когерентные волны образуются при отражении световых волн от двух поверхностей пленки. Так как разность хода интерферирующих лучей зависит от толщины пленки, показателя преломления материала, угла падения лучей и длины волны падающего света, то при освещении пленки белым светом образуется цветная картина интерференции.

• *Свет* представляет собой электромагнитные волны, и для него при определенных условиях наблюдается явление *дифракции.* Это явление объясняется с помощью *принципа Гюйгенса — Френеля.* Согласно этому принципу, фиктивные источники когерентны и испускаемые ими волны могут интерферировать в любой точке пространства. Для того чтобы определить результат дифракции в некоторой точке пространства, Френель предложил разбивать волновую поверхность на отдельные участки (зоны). Пользуясь методом зон Френеля, можно рассчитать дифракционные картины от щели и дифракционной решетки.

Угол, определяющий направление на главный дифракционный максимум спектра, полученного с помощью решетки, находят из соотношения

$$d \sin \varphi = k\lambda.$$

Дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр по длинам волн. С ее помощью можно измерять длины световых волн.

• *Голография* — особый метод регистрации на фотопластинке волнового фронта излучения, идущего от предмета, и затем восстановления этого фронта для получения изображения предмета. Голография применяется для записи и хранения большого информационного материала, в кино, на телевидении и т.д. Она является одним из перспективных методов современной физики.

• Поперечность световых волн была доказана экспериментально при наблюдении прохождения света через анизотропные среды — кристаллы.

Действие света на вещество определяется в основном вектором напряженности **E** электрического поля.

Если колебания вектора **E** происходят во всевозможных направлениях, в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, то свет называют естественным. Если колебания происходят только в одном направлении, то свет называют поляризованным. Поляризованный свет можно получить при преломлении и отражении от границ раздела двух диэлектриков. Свет может поляризоваться при прохождении через анизотропную среду.

• *Явление поляризации* доказывает поперечный характер световых волн. Поперечность световых волн подтверждается и электромагнитной теорией света.

• Зависимость показателя преломления вещества от длины волны называют дисперсией света. Результатом дисперсии является разложение призмой белого света в спектр. Дисперсия характерна для всех сред, кроме вакуума.

Дисперсию называют нормальной, если показатель преломления возрастает с уменьшением длины волны.

• Вид *спектров испускания* зависит от химической природы и состояния тела. Спектр раскаленного твердого тела — сплошной. Спектры газов или паров — линейчатые. Спектры молекул — полосатые.

• *Спектры поглощения* получаются при прохождении и поглощении излучения в веществе. Атомы данного вещества поглощают те световые волны, которые они сами испускают. По спектрам поглощения определяют химический состав Солнца и звезд.

• Лучи, которые имеют длины волн меньшие, чем фиолетовые, преломляются больше фиолетовых лучей и лежат за фиолетовой частью спектра, называют *ультрафиолетовыми.* Их обнаруживают по химическому действию.

Лучи, которые имеют длины волн больше, чем красные, преломляются меньше красных лучей и лежат за красным концом спектра, называют *инфракрасными.* Их обнаруживают по тепловому действию.

• Спектры звезд крайне разнообразны. Почти все они — спектры поглощения. Цвет и спектр звезд связаны с их температурой. Источником энергии, получаемой большинством звезд и Солнцем, служат ядерные реакции превращения водорода в гелий.

• *Рентгеновское излучение* возникает при резком торможении быстрых электронов. Его спектр сплошной. Максимальная энергия рентгеновского излучения не может превышать энергию электрона, которую он получил в ускоряющем поле.

Характеристическое рентгеновское излучение имеет линейчатый спектр. Частоты его линий характеризуют вещество анода.

Рентгеновское излучение используют в медицине и технике, научных исследованиях.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Что называют интерференцией света? **2.** Какие волны называют когерентными? **3.** Сформулируйте условие максимумов и минимумов интерференции. **4.** Что такое оптический и геометрический путь света? **5.** Как объяснить цвета тонких пленок? **6.** Что такое просветленная оптика? **7.** Что называют дифракцией света? При каких условиях она наблюдается? **8.** Объясните дифракцию на одной щели. **9.** Сформулируйте условие главных максимумов при дифракции на решетке. **10.** Что понимают под разрешающей способностью дифракционной решетки? **11.** Какой свет называют естественным? поляризованным? **12.** Сформулируйте закон Брюстера. **13.** Какие способы получения поляризованного света вам известны? **14.** Что называют дисперсией света? **15.** Что такое спектр? **16.** Какие существуют линии спектров излучения? **17.** Какие вещества дают сплошной спектр? **18.** Какие вещества дают линейчатый, полосатый спектры? **19.** Расскажите об ультрафиолетовом излучении и его свойствах. **20.** Расскажите об инфракрасном излучении и его свойствах. **21.** Что называют спектральным анализом? **22.** Что такое фраунгоферовы линии? **23.** Каковы природа и свойства рентгеновских лучей?

## Примеры решения задач

• Задача **1.** На мыльную пленку, находящуюся в воздухе, под углом 61°10' падает параллельный пучок монохроматических лучей $\lambda$ = 0,52 мкм. При какой наименьшей толщине пленки станут видны интерференционные полосы, если наблюдение ведется в отраженном свете?

**Дано:** $\lambda = 0{,}52 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha = 61°10'$; n=1,33.
**Найти:** *d*.

**Решение.** Запишем условие максимума (19.4):

$$2k\frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2},$$

где *d* — толщина пленки в точке наблюдения; *n* — показатель преломления пленки; $\alpha$ — угол падения лучей света; $\lambda$ — длина волны падающего света. Слагаемое $\lambda/2$ учитывает потерю полуволны при отражении света от мыльной пленки (т.е. от границы раздела воздух — пленка).

Приняв *K*—\, так как толщина пленки наименьшая, найдем

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}.$$

**Вычисления:**

$$d = \frac{0{,}52 \cdot 10^{-6}\ \text{м}}{4\sqrt{1{,}33^2 - \sin^2 62°10'}} = \frac{0{,}52 \cdot 10^{-6}\ \text{м}}{4\sqrt{1{,}33^2 - 0{,}876^2}} = 0{,}13 \cdot 10^{-6}\ \text{м} = 0{,}13\ \text{мкм}.$$

**Ответ:** *d*= 0,13 мкм.

• **Задача** 2. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на миллиметр, падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 0{,}5$ мкм). Определить наибольший порядок спектра, который можно наблюдать при нормальном падении лучей на решетку.

**Дано:** $\lambda = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ м; $N = 500\ \text{мм}^{-1} = 5 \cdot 10^5\ \text{м}^{-1}$
**Найти:** $k_{\max}$.

**Решение.** Условие главных максимумов

$$d\sin\varphi = k\lambda.$$

Максимальному *к* соответствует $\sin\varphi = 1$, поэтому

$$d = k_{\max}\lambda.$$

Тогда

$$k_{\max} = \frac{d}{\lambda},$$

где $d = 1/N$.

**Вычисления:**

$$d = \frac{1 \cdot 10^{-3}\ \text{м}}{500} = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{м},$$

$$k_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{-6}\ \text{м}}{0{,}5 \cdot 10^{-6}\ \text{м}} = 4.$$

**Ответ:** $k_{\max} = 4$.

• **Задача 3.** Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы лучи, отраженные от поверхности озера, были максимально поляризованы?

**Дано:** $n = 1{,}33$.

**Найти:** $\gamma$.

**Решение.** Отраженный луч максимально поляризован, если для угла $i$ его падения выполняется условие Брюстера **(19.6):**

$$\operatorname{tg} i_{\text{Б}} = n,$$

где $n$ — относительный показатель преломления двух сред. Солнце находится к горизонту под углом

$$\gamma = \pi/2 - i_{\text{Б}}.$$

Тогда

$$i_{\text{Б}} = \operatorname{arctg} n = \operatorname{arctg} 1{,}33 \approx 53°; \quad \gamma = 90° - 53° = 37°.$$

**Ответ:** $\gamma = 37°$.

## Задачи для самостоятельного решения

1. Какую наименьшую толщину должна иметь мыльная пленка, чтобы отраженные лучи имели красную окраску (X = 0,63 мкм)? Белый луч падает на пленку под углом 30°.

2. На тонкую пленку ($n$ = 1,33) под углом 50° падает параллельный пучок белого света. При какой толщине пленки отраженный свет имеет максимум для длины волны 0,5 мкм?

**3.** На тонкую пленку с показателем преломления 1,5, расположенную в воздухе, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda$. Определить, какой должна быть наименьшая толщина пленки, чтобы в отраженном свете она казалась темной. Какой цвет будет иметь пленка, если ее толщина равна $1{,}66\lambda$?

4. На пластинку с щелью шириной 0,7 мм падает нормально к ней монохроматический свет с длиной волны 0,7 мкм. Определить ширину центральной светлой полосы, если экран удален от щели на расстояние 1 м.

5. На непрозрачный экран с щелью шириной 10 мкм падает параллельный пучок монохроматического света. Угол отклонения второго дифракционного максимума 7°10'. Определить длину волны падающего света.

6. На щель шириной 2 мкм падает перпендикулярно монохроматический свет с длиной волны X = 0,589 мкм. Найти все углы, в направлении которых наблюдаются максимумы света.

7. На дифракционную решетку нормально к ней падает монохроматический свет. Максимум второго порядка наблюдается под углом 30° к нормали. Сколько спектров различных порядков дает дифракционная решетка?

**8.** При нормальном падении света на дифракционную решетку оказалось, что под углом 35° совпадают максимумы спектральных линий с длинами волн 0,576 и 0,384 мкм. Определить период решетки и порядок спектров, к которым относятся эти линии. Известно, что для второй спектральной линии максимальный порядок спектра, даваемый решеткой, равен пяти.

9. Луч света, проходящий через слой волны, падает на кварцевую пластинку, частично отражается, частично преломляется. Определить, каким должен быть угол падения, чтобы преломленный луч был перпендикулярен отраженному.

10. При переходе луча света из первой среды во вторую предельный угол оказался равным 61°. Под каким углом на границу раздела этих сред должен падать луч, идущий из второй среды в первую, чтобы отраженный луч был полностью поляризован? Сделать чертеж.

**Ключевые слова:** *интерференция, дифракция, принцип Гюйгенса - Френеля, поляризация, поляроид, дисперсия, спектр, излучение.*

РАЗДЕЛ VI

# ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

За сравнительно короткий срок вопросы атомной и ядерной физики из теоретических и экспериментальных стали практическими и промышленными. На их основе построены атомная, рентгеновская, радиоспектроскопия, созданы квантовые генераторы, построены атомные реакторы, атомные электростанции и корабли.

Одновременно с физикой атомного ядра начала быстро развиваться физика элементарных частиц. Первые успехи в этой области связаны с изучением космических лучей. Было открыто большое количество элементарных частиц. Обнаружена универсальная взаимопревращаемость их.

**Историческая справка.** Электромагнитному излучению присущи как волновые, так и квантовые свойства — чем больше длина волны излучения, тем больше оно обнаруживает волновые свойства; чем меньше длина волны, тем отчетливее проявляются квантовые свойства излучения.

Связь между волновыми и корпускулярными свойствами электромагнитного излучения определяется формулой Планка $E = h\nu$, или $E = hc/\lambda$.

Такие явления, как тепловое излучение, фотоэлектрический эффект, могут быть поняты исходя лишь из квантовой теории излучения и поглощения электромагнитного излучения.

Явление внешнего фотоэффекта было обнаружено Г.Герцем, исследовано А.Г.Столетовым и объяснено А. Эйнштейном.



Э.Резерфорд

Новый этап в развитии физики связан с открытием в 1887 г. электрона. Выяснилось, что атомы не элементарны, а представляют собой сложные системы, в состав которых входят электроны.

Решающую роль для понимания структуры атома сыграли опыты английского физика Э. Резерфорда по рассеянию а-частиц. Эти опыты являются фундаментальными не только для атомной, но и ядерной физики. Одним из главных достижений ученого было открытие атомного ядра (впоследствии ядерную (планетарную) модель атома стали называть моделью атома Резерфорда).

Датский физик Н. Бор разработал теорию атома водорода (1913). В основе теории атома по Бору лежит ряд хорошо известных в настоящее время постулатов (см. 21.4).

В утверждении основ квантовой физики важная роль принадлежит А.Эйнштейну (1879- 1955).

Глава 20

# КВАНТОВАЯ ОПТИКА

## 20.1. Квантовая гипотеза Планка. Фотоны

Гипотеза Планка. В 1900 г. немецкий физик М. Планк предположил следующее:

энергия испускается телом не непрерывно, как это предполагалось в классической физике, а отдельными дискретными порциями — квантами, энергия $E$ которых пропорциональна частоте $\nu$ колебаний:

$$E = h\nu. \tag{20.1}$$

Здесь $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — ***постоянная Планка,*** или квант действия.

Любое тело состоит из большого числа атомов. Каждый из атомов излучает электромагнитные волны. Согласно *гипотезе Планка,*

энергия атома может изменяться лишь определенными порциями — квантами, кратными некоторой энергии, т. е. принимать значения $E, 2E, 3E, ..., nE$.

Зная постоянную Планка, можно найти кванты энергии для колебаний с различными частотами. Эта энергия очень мала. Даже для частоты $10^{10}$ Гц она равна $h\nu = 6{,}6 \cdot 10^{-24}$ Дж, так что с макроскопической точки зрения энергия колебаний представляется изменяющейся непрерывно. Однако в микромире, где приходится иметь дело с малыми величинами, эти энергии оказываются весьма заметными.

Фотоны. Развитие гипотезы Планка привело к созданию представлений о квантовых свойствах света. Кванты света получили название ***фотоны.*** Согласно закону пропорциональности массы и энергии и гипотезе Планка, энергия фотона определяется по формулам

$$E = mc^2, \quad E = h\nu.$$

Приравняв правые части уравнений, получим выражение для массы фотона:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}, \tag{20.2}$$

или, учитывая, что $c = \lambda\nu$,

$$m = \frac{h}{c\lambda}. \tag{20.3}$$

***Импульс фотона*** - это произведение его массы на скорость: $p = mc$. Подставив $m$ из (20.2), получим $p = \frac{h\nu}{c}$, или

$$p = \frac{h}{\lambda}. \tag{20.4}$$

Масса покоя фотона равна нулю.

Квант электромагнитного излучения распространяется со скоростью света, обладая при этом конечными значениями энергии и импульса.

' В монохроматическом свете с частотой У все фотоны имеют одинаковую энергию, импульс и массу.

## 20.2. Внешний и внутренний фотоэффект

**Внешний и** внутренний **фотоэффект.** Квантовая гипотеза Планка и изучение фотоэлектрического эффекта явились основанием для создания квантовой теории света.

***Фотоэлектрический эффект*** — вырывание электронов из атомов или молекул вещества под действием света (излучения) — впервые был обнаружен в 1887 г. Г. Герцем.

Если электроны, выбитые светом, вылетают за пределы вещества, то фотоэффект называют ***внешним.*** Внешний фотоэффект наблюдается главным образом у металлов. Если же оторванные от своих атомов или молекул электроны остаются внутри освещаемого вещества в качестве свободных, то фотоэффект называют ***внутренним.***

Внутренний фотоэффект наблюдается у некоторых полупроводников и в меньшей степени у диэлектриков. Явление внешнего фотоэффекта впервые было исследовано А.Г.Столетовым в 1890 г. Явление внутреннего фотоэффекта было исследовано акад. А. Иоффе в 1908 г.

Схема опытов Столетова по исследованию внешнего фотоэффекта изображена на рис. 20.1. В вакуумной трубке помещают исследуемую пластину К, служащую катодом, и вспомогательный электрод А, служащий анодом. Электроды К и А через потенциометр RP подключены к источнику напряжения. Напряжение между электродами (анодное напряжение) измеряют вольтметром V, ток в цепи — гальванометром Г.

Если пластинку К не освещать, то тока в цепи не будет, так как вакуумный промежуток между катодом и анодом тока не проводит. Если же исследуемую пластинку осветить через окно С, то свет вырвет из пластинки электроны (их называют ***фотоэлектронами).*** Под действием электрического поля фотоэлектроны движутся к аноду А, замыкая цепь. Гальванометр показывает наличие тока (его называют ***фототоком).*** С помощью потенциометра RP можно изменять значение и знак анодного напряжения. Следует иметь в виду, что ток в цепи возникает и в том случае, когда анодное напряжение равно нулю и даже при небольшом задерживающем отрицательном напряжении. Объясняется это тем, что вылетающие из катода фотоэлектроны обладают кинетической энергией, за счет которой совершается работа против сил задерживающего поля.



А. Г. Столетов

На рис. 20.2 показана зависимость силы фототока от анодного напряжения при неизменном световом потоке.

При определенной разности потенциалов между электродами все вырванные из катода электроны достигнут анода, через гальванометр пойдет ток, который определяется числом электронов, вырываемых светом с поверхности катода за единицу времени. Этот ток называют ***током насыщения*** $I_н$. Если поле тормозит электроны, то при некотором значении $U_з$ электроны перестают вылетать из катода. По значению $U_з$ можно определить скорость вылетающих электронов.

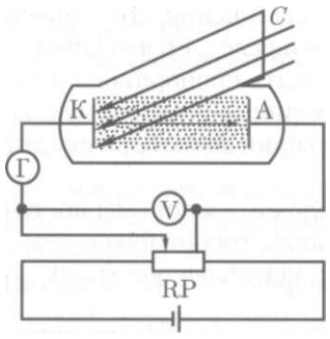



Рис. 20.1

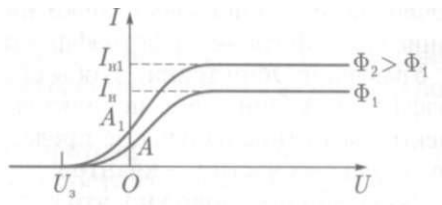



Рис. 20.2

Пусть $v$ — скорость вылетающего электрона, $m$ и $e$ — его масса и заряд. Кинетическая энергия этого электрона равна $mv^2/2$. Электрон может пролетать сквозь тормозящее поле, разность потенциалов которого равна $U$, если $eU \leqslant mv^2/2$. Определив $U_з$ из условия $mv^2/2 = eU_з$, найдем скорость этих электронов:

$$v = \sqrt{\frac{2eU_з}{m}}, \text{ где } U_з \text{ — задерживающее напряжение.} \qquad (20.5)$$

Законы Столетова. В результате многочисленных тщательно поставленных опытов Столетов установил следующие *законы фотоэффекта.*

**1. Сила фототока насыщения $I_н$, возникающего при освещении монохроматическим светом, пропорциональна световому потоку, падающему на катод:**

$$I_н = k\Phi_e. \qquad (20.6)$$

Коэффициент пропорциональности $k$, соответствующий силе фототока (выраженной в мкА) при освещенности катода световым потоком 1 лм, называют *фоточувствительностью* освещаемой пластинки. Он выражается в *микроамперах на люмен* (мкА/лм).

2. **Скорость фотоэлектронов увеличивается с ростом частоты (с уменьшением длины волны) падающего света и не зависит от интенсивности светового потока.**

3. **Независимо от интенсивности светового потока фотоэффект начинается только при определенной для данного металла минимальной частоте (максимальной длине волны) света, называемой красной границей фотоэффекта.**

Волновая теория света оказалась в состоянии объяснить лишь первый из этих законов. Согласно этой теории, свет, представляющий собой электромагнитные волны, приводит электроны, находящиеся вблизи поверхности металла, в колебательное движение с амплитудой, зависящей от напряженности поля, а следовательно, от интенсивности падающего света. В результате электрон приобретает кинетическую энергию, достаточную для преодоления силы притяжения положительных ионов и вылета его из металла. Чем больше интенсивность падающего света, тем больше число электронов может получить энергию, достаточную

для вылета из металла, и тем больше будет фототок насыщения. Это объясняет первый закон фотоэффекта. Но из этого же рассуждения следует, что кинетическая энергия вылетающих электронов также должна быть пропорциональна интенсивности падающего на пластинку света, а это противоречит второму закону. Точно так же непонятным с точки зрения волновой теории является и существование красной границы фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна. Чтобы объяснить эти загадочные закономерности фотоэффекта, А. Эйнштейн использовал гипотезу Планка, говорящую о том, что электромагнитное излучение представляет собой не непрерывную волну, а поток отдельных частиц — квантов.

Эйнштейн предположил, что явление фотоэлектрического эффекта является подтверждением дискретности света. Ведь если дискретность природы света проявляется при его испускании, то она должна сохраняться, когда излучение распространяется в пространстве и при поглощении.

Эйнштейн показал, что любое монохроматическое излучение представляет собой совокупность квантов, энергия которых пропорциональна частоте. Коэффициентом пропорциональности является постоянная Планка. Это предположение дало возможность объяснить законы фотоэффекта. Энергия кванта $h\nu$, падающего на вещество, расходуется на работу $A$ вырывания электрона из вещества и на сообщение электрону кинетической энергии $mv^2/2$. Электрон, находящийся внутри вещества, поглотив квант света, либо покинет вещество, либо останется внутри него. Это зависит от того, что больше: энергия поглощенного кванта света или работа выхода электрона. Если энергия поглощенного кванта больше работы выхода, то кинетическая энергия фотоэлектрона равна разности энергии поглощенного кванта света и работы выхода ($mv^2/2 = h\nu - A$):

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \qquad (20.7)$$

Выражение (20.7) называется *уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.*

Уравнение Эйнштейна является частным случаем закона сохранения и превращения энергии применительно к явлению фотоэффекта.

Работа выхода электрона из металла зависит **от** природы вещества.

Для некоторых металлов она вычислена и находится по справочным таблицам.

С уменьшением частоты падающего света (увеличением длины волны) энергия падающих квантов (фотонов) при некоторой частоте $\nu_к$ (или длине волны $\lambda_к$) может стать равной работе выхода, т. е. $h\nu_к = A$ или $hc/\lambda_к = A$, откуда

$$\nu_к = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_к = \frac{hc}{A}. \qquad (20.8)$$

Граничная длина волны $\lambda_к$ падающего света, при котором возникает фотоэффект, называется ***красной границей фотоэффекта.***

Многофотонный фотоэффект. На основании опытов по фотоэффекту, проводившихся со всевозрастающей точностью, было установлено:

электрон одновременно может получить энергию не **от** одного фотона, а **от** нескольких фотонов.

Такой фотоэлектрический эффект получил название *многофотонного. Уравнение Эйнштейна для многофотонного фотоэффекта*

$$Nh\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \qquad (20.9)$$

где $N$ — число фотонов, одновременно передающих энергию одному электрону.

При многофотонном фотоэффекте красная граница смещается в сторону длинных волн.

Внутренний **фотоэффект.*** Внутренний фотоэффект в кристаллических полупроводниках и некоторых диэлектриках состоит в том, что под действием света электропроводимость этих веществ увеличивается за счет возрастания в них числа свободных носителей тока — электронов проводимости и дырок. Подробно механизм образования энергетических уровней и зон описан в гл. 11.

Здесь отметим, что энергетическая зона не имеет никаких пространственных размеров, а представляет собой понятие, отражающее факт, что тот или иной электрон кристалла может обладать энергиями, заключенными в определенных пределах. Этими пределами являются нижняя и верхняя границы зоны. В фразе «ширина запрещенной зоны» под словом «ширина» следует понимать лишь то, что значение энергии электрона, находящегося на данном уровне, отличается от энергии электрона, находящегося на другом уровне, на $\Delta E$.

Ширина запрещенной зоны определяет энергию $\Delta E$, которую нужно дополнительно сообщить электрону, чтобы перевести его из заполненной зоны в зону проводимости. Эту энергию называют *энергией активизации* и выражают в электронвольтах. Полупроводник может проводить ток, если электроны из заполненной зоны перешли в зону проводимости. Отсюда явление внутреннего фотоэффекта часто называют ***фотопроводимостью.***

Наиболее близкие к ядру электроны крепко связаны с ядрами и не принимают участия в проводимости. Электрическая проводимость возникает лишь за счет валентных электронов зоны проводимости.

Механизм фотопроводимости объясняется следующим образом. При освещении поверхности полупроводника фотон, поглощенный в полупроводнике, отдает энергию валентным электронам. Если энергия фотона больше ширины запрещенной зоны, то электрон переходит в зону проводимости и становится электроном проводимости, а в заполненной зоне образуется дырка (см. 11.3). Образовавшаяся дырка может быть заполнена одним из ближайших соседних электронов, но тогда освободится место, которое только что занимал электрон, т. е. появится новая дырка, и т. д. В возникшем процессе электрон будет перемещаться против направления электрического поля, а свободное место, заполняемое электронами, — дырка — перемещается им навстречу по направлению поля. В электрических и магнитных полях дырка ведет себя аналогично положительному заряду, величина которого равна заряду электрона. Таким образом, один поглощенный фотон освобождает пару электрон-дырка, при освещении полупроводника увеличивается количество носителей тока, увеличивается ток при неизменном напряжении, что эквивалентно уменьшению сопротивления.

При освещении светом, для которого $h\nu < \Delta E$, фотоэффект не возникает.

## 20.3. Типы фотоэлементов

Фотоэлементы **с** внешним фотоэффектом. Широкое применение в технике получили фотоэлементы — приборы, действие которых основано на использовании фотоэффекта. К ним относятся вакуумные фотоэлементы, практически не обладающие инерционностью, и газонаполненные фотоэлементы, обладающие большой инерционностью и большой чувствительностью. На рис. 20.3, ***а, б*** показаны внешний вид и схема фотоэлемента, состоящего из стеклянной или кварцевой колбы, внутренняя часть поверхности которой покрыта слоем светочувствительного металла К. В качестве светочувствительного слоя, как правило, используются щелочные металлы, имеющие малую работу выхода. Воздух из колбы тщательно удален.

Внутри колбы имеется металлическое кольцо (или сетка) А. Как от светочувствительного слоя, так и от кольца наружу сделаны выводы, с помощью которых фотоэлемент присоединяется к батарее так, чтобы металлический слой был катодом, а кольцо — анодом. В цепь включен также гальванометр Г для измерения тока. Свет, попадая на катод, выбивает из него электроны, которые летят к аноду. В цепи идет фототок, обнаруживаемый гальванометром. Применяемые в настоящее время фотоэлементы реагируют не только на видимый свет, но даже на инфракрасные лучи.

Чувствительность вакуумных фотоэлементов невелика (не превышает нескольких десятков микроампер на люмен), т. е. ток в цепи вакуумного фотоэлемента мал. Для усиления тока (повышения чувствительности) в колбу вводится разреженный газ. В газонаполненных фотоэлементах электроны, вырываемые светом из катода, при достаточных напряжениях между катодом и анодом приобретают такую скорость, что оказываются в состоянии ионизовать частицы газа, наполняющего фотоэлемент; возникает ударная ионизация. Образовавшиеся при этом ионы, в свою очередь, приходят в движение и ионизуют нейтральные частицы газа; в результате к аноду устремляется всевозрастающая лавина электронов, фототок значительно увеличивается, чувствительность фотоэлемента растет.

Основное техническое применение фотоэлементы находят в фототелеграфии (передача изображения на расстояние по проводам), в телевидении и звуковом кино. Кроме того, фотоэлементы широко применяются в фотореле, с помощью которых автоматически приводят в действие самые разнообразные механизмы. В фотореле использована безынерционность фотоэффекта, т. е. способность фотоэлемента практически мгновенно реагировать на световое воздействие или его изменение. Фотореле может работать либо при попадании света на элемент, либо при прекращении освещения фотоэлемента.

Применения фотореле разнообразны. Фотореле могут в нужное время включать и выключать уличные фонари в городах, свет маяков и бакенов, сортировать различные детали по цвету и форме, пускать в ход или останавливать электродвигатели, станки и т. д.

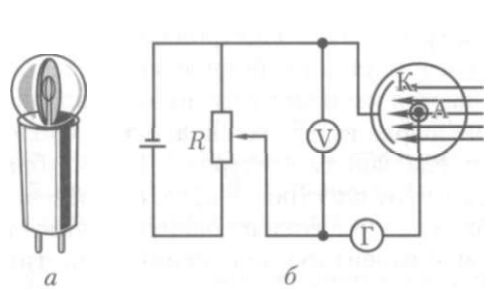


Рис. **20.3**

Фотоэлементы **с** внутренним фотоэффектом.* К ним относят фотосопротивления и вентильные фотоэлементы. Фотоэлементы с внутренним фотоэф-

фектом обладают значительно большей инерционностью по сравнению с фотоэлементами, основанными на внешнем фотоэффекте.

***Фотосопротивлениями*** называют полупроводниковые приборы, сопротивление которых зависит от интенсивности падающего на них света. Принцип действия фотосопротивления заключается в следующем. В затемненном полупроводнике при некоторой температуре имеется определенное число свободных электронов. Эти электроны обусловливают обычную (темновую) проводимость полупроводника. Если к затемненному фотосопротивлению приложить напряжение, то возникает ***темновой ток*** $I_т$, значение которого зависит от приложенного напряжения. В освещенном фотосопротивлении в слое полупроводника образуются дополнительные свободные электроны и дырки. В связи с этим его проводимость увеличивается, ток $I_с$ в цепи (его называют световым) тоже увеличивается. Разность между световыми и темновыми токами называют фототоком: $I = I_с - I_т$. Фотосопротивления широко применяются в звуковом кино, телевидении, автоматике, телемеханике, для сигнализации.

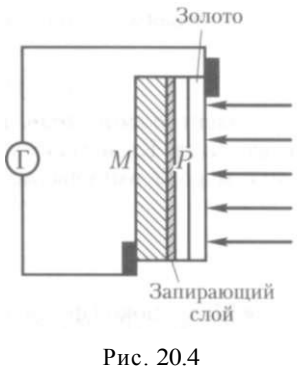


Рис. 20.4

Другим видом применения внутреннего фотоэффекта в приборах являются вентильные фотоэлементы, т. е. элементы с запирающим слоем. Вентильный эффект возникает в тех полупроводниках, у которых между металлом и полупроводником или между полупроводниками *p*- и n-типа вблизи поверхности контакта создается запирающий слой, обладающий односторонней проводимостью (см. гл. **11).** В результате внутреннего фотоэффекта при освещении происходит нарушение равновесного распределения носителей тока в области контакта, изменяется по сравнению с равновесной контактная разность потенциалов, т. е. возникает фотоэлектродвижущая сила. Возникающая ЭДС пропорциональна световому потоку. На рис. 20.4 приведена схема такого фотоэлемента.

Металлическая пластинка *M,* служащая одним из электродов, и нанесенный на нее тонкий слой полупроводника *P* (селена), покрытого тонкой прозрачной пленкой золота или другого металла, служащего вторым электродом, соединены внешней цепью, в которую включен гальванометр Г. Если полупроводниковый слой осветить через второй электрод, то в слое *P* в результате внутреннего фотоэффекта появляются свободные электроны. Они движутся хаотически, однако на границе металла с полупроводником из-за вентильного эффекта образуется ЭДС, поэтому в металле возникает избыток электронов, в полупроводнике — избыток дырок. Если цепь при этом замкнута, по ней течет ток. Таким образом, вентильный фотоэлемент является генератором тока, непосредственно преобразующим световую энергию в электрическую. На таком же принципе основано действие солнечных батарей, которые с успехом используются на космических кораблях. Вентильные фотоэлементы имеют преимущество перед вакуумными, так как работают без источника тока.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• В 1900 г. М. Планк для объяснения закономерностей теплового излучения предложил новую теорию, согласно которой атомы испускают электромагнитное излучение строго определенными порциями — квантами.

Основная характеристика квантов — энергия

$$E = h\nu.$$

Развитие гипотезы *Планка* привело к созданию представления о квантовых свойствах света Кванты света получили название «фотоны». Фотоны характеризуются энергией, массой, импульсом:

$$E = mc^2, \quad E = h\nu, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p = \frac{h\nu}{c}.$$

- Масса покоя фотона равна нулю.
- В монохроматическом свете все фотоны имеют одинаковую энергию, импульс и массу.
- Явление внешнего *фотоэлектрического эффекта* было обнаружено Г. Герцем, исследовано А. Г. Столетовым, который установил законы фотоэффекта. Объяснение явления внешнего фотоэффекта дал А. Эйнштейн. Он предположил, что электромагнитное излучение поглощается также отдельными порциями. Энергия кванта, падающего на вещество, расходуется на работу вырывания электрона из вещества и сообщение электрону кинетической энергии

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

- Волновые и квантовые свойства света не исключают, а взаимно дополняют друг друга. Они выражают истинные закономерности распространения света и взаимодействия его с веществом. Электромагнитное излучение представляет собой сложную форму материи, которая имеет двойственную корпускулярно-волновую природу.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Сформулируйте гипотезу Планка. 2. Что такое квант? Чему равна энергия кванта? 3. Чему равны энергия, масса, импульс фотона? 4. Что называют явлением внешнего фотоэффекта? 5. Сформулируйте законы Столетова. 6. Объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. 7. Что такое красная граница фотоэффекта? 8. Какой фотоэффект называют многофотонным? **9.** Какие типы фотоэлементов вам известны? **10.** Что такое корпускулярно-волновой дуализм?

## Пример решения задачи

- Задача. Определить красноволновую границу фотоэффекта для натрия, если работа выхода электрона из фотокатода равна 2,3 эВ.

Дано: $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; с = 3 • $10^8$ м/с; $A$ = 2,3 эВ = 2,3 • 1,6 • $10^{-19}$ Дж = $= 3{,}7 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Найти: $\lambda_{кр}$.

Решение. Запишем уравнение для красной границы фотоэффекта (20.14) и вычислим из него искомую длину волны:

$$h\nu_{кр} = A, \quad \text{или} \quad \frac{hc}{\lambda_{кр}} = A,$$

**откуда**

$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A}.$$

**Вычисления:**

$$\lambda_{кр} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с \cdot 3 \cdot 10^{8}\ м/с}{3,7 \cdot 10^{-19}\ Дж} = 5,4 \cdot 10^{-7}\ м.$$

**Ответ:** $\lambda_{кр} = 5,4 \cdot 10^{-7}$ м.

*Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Определить энергию фотона: а) для красного света ($\lambda = 600$ нм); б) для жестких рентгеновских лучей ($\lambda = 0,01$ нм)

2. Найти массу фотона: а) монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм); б) рентгеновского излучения ($\lambda = 0,025$ нм) ;в)гамма-излучения ($\lambda = 1,24 \cdot 10^{-3}$ нм)

3. Какова длина волны фотона, масса которого равна массе покоящегося электрона?

**4.** Красная граница для некоторого металла составляет 0,6 мкм. Металл освещается светом, длина волны которого 0,4 мкм. Определить максимальную скорость электронов, выбиваемых светом из металла.

**5.** Выбиваемые светом при фотоэффекте электроны полностью задерживаются обратным потенциалом 4 В. Красная граница для металла равна 0,6 мкм. Определить частоту падающего света.

6. До какого максимального потенциала зарядится пластинка, покрытая цезием, при облучении ее фиолетовыми лучами с длиной волны 0,4 мкм? Работа выхода электрона для цезия равна 1,9 эВ.

**Ключевые слова:** *гипотеза Планка, фотон, фотоэффект, законы Столетова, уравнение Эйнштейна, фотоэлемент.*

## Глава 21

# ФИЗИКА АТОМА

## 21.1. Развитие взглядов на строение вещества

Гипотеза о том, что все вещества состоят из большого числа атомов, зародилась свыше 2 тыс. лет назад. Сторонники атомистической теории рассматривали атом как мельчайшую неделимую частицу (от греч. «атомос» — неделимый) и считали, что все многообразие мира есть не что иное, как сочетание неизменных частиц — атомов.

Конкретные представления о строении атомов развивались по мере накопления физикой фактов о свойствах вещества.

Большая роль в этой области физической науки принадлежит Д. И. Менделееву, который, открыв периодический закон, впервые на научной основе поставил вопрос о единой природе атомов. Он писал: «При всей видимой простоте дела ныне нет еще возможности утверждать какую-либо гипотезу, достаточно объясняющую этот закон периодичности...». Далее Д. И. Менделеев отмечал, что атомы простых тел есть сложные вещества.

Открытия, совершенные во второй половине XIX в., заставили постепенно усомниться в справедливости представления об атомах как неделимых частицах. Очень важным стало открытие немецких ученых К. Кирхгофа и Р. Бунзена. Они обнаружили:

каждому химическому элементу соответствует характерный, присущий **лишь** этому элементу набор спектральных **линий в** спектрах испускания **и** поглощения.

Это означало:

свет испускается **и** поглощается отдельными атомами, а атом, **в** свою очередь, представляет собой сложную систему, способную взаимодействовать с электромагнитным полем.

Об этом же свидетельствовало явление ионизации атомов, обнаруженное при исследованиях электролиза и газового разряда. Это явление можно было объяснить лишь предположив, что атом в процессе ионизации теряет часть своих зарядов или приобретает новые. Ответ на вопрос, что является носителем заряда, теряемого или приобретаемого атомом в процессе ионизации, был дан в самом конце XIX в. Оказалось, что таким носителем является входящий в состав атома электрон — отрицательно заряженная частица с массой $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг и зарядом $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Опираясь на эти открытия, английский физик Дж. Томсон в 1898 г. предложил первую модель атома в виде положительно заряженного шарика радиусом порядка $10^{-10}$ м, в который вкраплены отдельные электроны, нейтрализующие положительный заряд.

## 21.2. Закономерности в атомных спектрах водорода

Внутреннее строение атома изучать непосредственно невозможно из-за малости его размеров ($\approx 10^{-10}$ м). Структура атома проявляется только косвенно в явлениях, связанных с его внутренним строением. К числу таких явлений относится ***излучение.*** Здесь ученым удалось установить общие закономерности в характере спектров и найти ряд эмпирических законов, которым они подчиняются. Было установлено, что спектральные линии всех элементов можно разбить на ряд серий.

Структуры соответствующих серий, относящихся к различным химическим элементам, схожи между собой.

В пределах одной серии расположение спектральных линий имеет определенный порядок. Наиболее простым атомом является атом водорода.

В 1885 г. И. Бальмеру удалось найти формулу, описывающую распределение спектральных линий видимого спектра водорода, получивших название *серии Бальмера:*

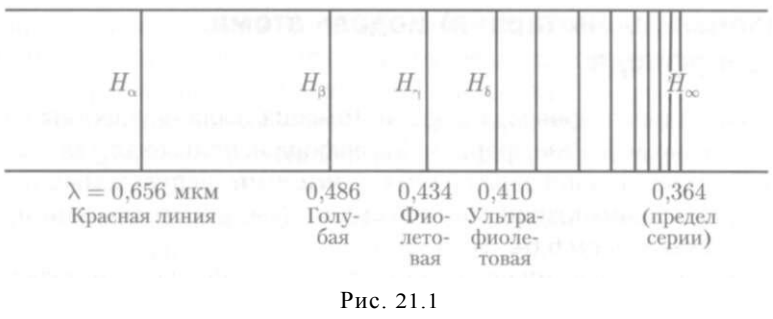



Рис. 21.1

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}, \tag{21.1}$$

где $\lambda_0$ — некоторая постоянная, а $n$ для различных линий серии принимает значение последовательного ряда целых чисел начиная с трех ($n$ = 3, 4, 5,...).

Формула (21.1) определяет длину волны, соответствующую последовательным линиям серии Бальмера, как функцию целого числа. Значение $\lambda_0$ = 0,364613 мкм было установлено при сопоставлении формулы (21.1) с данными экспериментов. Часть спектра атома водорода представлена на рис. 21.1 (символами $H_\alpha$, $H_\beta$, $H_\gamma$, $H_\delta$ обозначены видимые линии, $H_\infty$ соответствует пределу бальмеровской серии).

Исследования излучения в невидимой части спектра показали, что существуют серии, расположенные в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, которые получили название ***серия Пашена*** и ***серия Лаймана.***

Формулы, определяющие расположение спектральных линий в каждой из этих серий, аналогичны формуле для ***серии Бальмера.*** И обычно обобщенную формулу Бальмера для всех линий спектра атома водорода записывают в виде

$$\frac{1}{\lambda} = R_1 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \tag{21.2}$$

где $\lambda$ - длина волны (величину $\lambda^{-1}$ называют *ВОЛНОВЫМ ЧИСЛОМ);* $R_1$ — постоянная, равная 1,097 • $10^7$ $м^{-1}$; $i$ и $n$ принимают вполне определенные значения для каждой серии и каждой спектральной линии (табл. 21.1).

Учитывая, что $\lambda = c/\nu$ и $1/\lambda = \nu/c$, формулу (21.2) можно переписать в виде

$$\nu = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \tag{21.3}$$

где $R = R_1 c = 3{,}29 \cdot 10^{15}$ $с^{-1}$ — ***постоянная Ридберга.***

При увеличении $n_2$ длина волны уменьшается, а частота линий увеличивается и достигает предельного значения (границы серии) $R/n_1^2$ при $n_2 \to \infty$.

Аналогичные спектры имеются не только у водорода, но, например, и у щелочных металлов. Расположение спектральных линий в них определяется формулой, аналогичной формуле Бальмера.

Таблица 21.1

| Серия | $n_1$ | $n_2$ |
|---|---|---|
| Лаймана | 1 | 2, 3, 4, ... |
| Бальмера | 2 | 3, 4, 5, ... |
| Пашена | 3 | 4, 5, 6, ... |

## 21.3. Ядерная (планетарная) модель атома. Опыты Резерфорда

Экспериментальная проверка модели Томсона была осуществлена в 1911 г. английским физиком Э. Резерфордом. Резерфорд использовал для этой цели поток быстрых положительно заряженных $\alpha$-*частиц*, испускаемых некоторыми так называемыми радиоактивными веществами (например, полонием) и *имеющих заряд* $+2e$ *и массу* $6{,}64 \cdot 10^{-27}$ кг.

Пропуская пучок $\alpha$-частиц через тонкую золотую фольгу, Резерфорд обнаружил, что некоторая часть частиц отклоняется на довольно значительный угол от первоначального направления, а часть даже отражается от фольги.

Упрощенная схема опытов Резерфорда изображена на рис. 21.2. Источник $\alpha$-частиц помещали внутри свинцовой полости с узким каналом. Все $\alpha$-частицы, кроме движущихся по узкому каналу, поглощались свинцом. Узкий пучок $\alpha$-частиц падал на золотую фольгу перпендикулярно ее поверхности. За фольгой был помещен подвижный экран, покрытый флуоресцирующим веществом; $\alpha$-частицы, прошедшие через фольгу, вызывали вспышки на экране. Такая установка, находящаяся в вакууме, позволяла наблюдать $\alpha$-частицы, рассеянные под углом $\beta$ до 150°.

Полученный результат был совершенно непонятен в рамках модели Томсона, так как положительный заряд атома, распределенный по всему его объему, не мог оказать столь значительного воздействия на массивные и быстрые $\alpha$-частицы.

Обобщая результаты опытов, Резерфорд предложил ***ядерную (планетарную) модель строения атома,*** в которой атом представлен в виде миниатюрной Солнечной системы. Согласно этой модели, весь положительный заряд и почти вся масса атома (99,4%) сосредоточены в атомном ядре. Размер ядра ($\sim 10^{-15}$ м) ничтожно мал по сравнению с размером атома ($\sim 10^{-10}$ м). Вокруг ядра по замкнутым эллиптическим орбитам, которые в первом приближении можно считать круговыми, движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Заряд ядра равен суммарному заряду электронов.

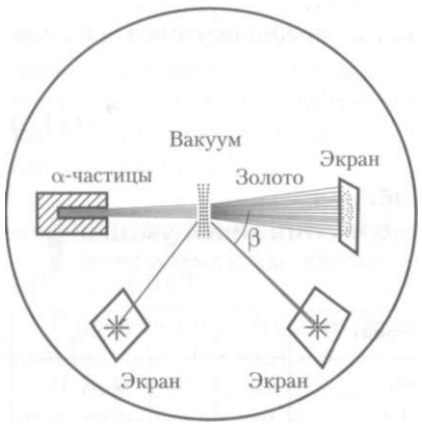


Рис. 21.2

Однако предложенная Резерфордом модель строения атома не объяснила спектральных закономерностей и даже оказалась в противоречии с законами классической механики и электродинамики.

В самом деле движение электрона по орбите, как и всякое криволинейное движение, есть движение с ускорением. Согласно законам классической электродинамики, криволинейное движение должно сопровождаться излучением света соответствующей частоты.

Следовательно, при движении электрона вокруг ядра атом должен непрерывно излучать энергию. Но уменьшение энергии приводит к уменьшению радиуса орбиты электрона — электрон должен двигаться по

спирали, приближаясь к ядру. А так как скорость движения электрона остается неизменной, то должна увеличиться и круговая частота его вращения, непрерывно должна расти частота излучения, т.е. спектр излучения должен быть сплошным. Непрерывно приближаясь к ядру, электрон через малое время должен упасть на ядро, т. е. в модели Резерфорда атом является неустойчивой системой.

В действительности же атомы являются весьма устойчивыми системами и имеют линейчатые, а не сплошные спектры излучения.

## 21.4. Модель атома водорода по Бору

Постулаты Бора. В 1913 г. датский физик Н. Бор ввел идеи квантовой теории в ядерную модель Резерфорда и разработал теорию атома водорода, полностью подтвержденную экспериментально.

В основе боровской теории атома лежат *два основных положения — постулата:*

**1.** Электроны могут двигаться в атоме только по определенным орбитам, находясь на которых они, несмотря на наличие у них ускорения, не излучают.

Эти орбиты соответствуют стационарным состояниям электронов в атоме и определяются условием

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}, \tag{21.4}$$

где $r_n$ — радиус n-й орбиты; $v_n$ — скорость электрона на этой орбите; $m_e$ — масса электрона; $m_e v_n r_n$ — момент импульса электрона на этой орбите; $n$ — целое число $(n \neq 0)$, $n = 1,2,3 \ldots$

**2.** Атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.

Энергия кванта равна разности энергий стационарных состояний электрона до $(E_2)$ и после $(E_1)$ перехода:

$$h\nu = E_2 - E_1. \tag{21.5}$$

Рассмотрим простейший атом — атом водорода. Он состоит из ядра, включающего один протон, и электрона, вращающегося вокруг ядра по круговой орбите. На электрон со стороны ядра действует кулоновская сила притяжения, сообщая ему центростремительное ускорение. Поэтому

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ee}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}, \tag{21.6}$$

где $e$ — заряд электрона и протона; $\varepsilon_0$ — электрическая постоянная.



Н.Бор

Поскольку должен выполняться первый постулат Бора, воспользуемся выражением (21.4). Определим из него скорость $v_n$, возведем в квадрат и подставим в (21.6). Из полученного выражения найдем

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \varepsilon_0}{\pi m_e e^2}, \qquad (21.7)$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$

Как следует из соотношения (21.7), радиусы орбит электрона в атоме водорода пропорциональны $n^2$. Подставляя в (21.7) значения констант и считая $n=1$, получаем значение первого боровского радиуса, который является единицей длины в атомной физике:

$$r_Б = 0{,}528 \cdot 10^{-10} \text{ м}. \qquad (21.8)$$

**Уровни энергий в атоме.** По боровской модели ядро атома считается неподвижным, поэтому полная энергия $E$ атома является суммой кинетической энергии $E_к$ вращения электрона и потенциальной энергии $E_п$ взаимодействия электрона с ядром:

$$E_к = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}, \quad E_п = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n}, \quad E = E_к + E_п = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}. \qquad (21.9)$$

Полученное значение $E$ отрицательно, так как значение потенциальной энергии двух зарядов, находящихся на бесконечно большом расстоянии, мы полагаем равным нулю. При сближении зарядов потенциальная энергия уменьшается.

Наименьшей энергией, как следует из уравнения (21.9), атом обладает при n= 1. В этом случае говорят, что атом находится в ***основном энергетическом состоянии.*** Состояния с $n > 1$ называют ***возбужденными.***

Определим энергию $E_n$ на любом энергетическом уровне. Для этого подставим в выражение (21.9) значение $r_n$ из (21.7). Получим

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\frac{1}{n^2}. \qquad (21.10)$$

**Линейчатые спектры.** При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой, согласно второму постулату Бора, выделяется или поглощается квант энергии

$$h\nu = E_2 - E_1 = \frac{m_e e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \qquad (21.11)$$

Если электрон переходит, например, со второй орбиты $(n_2 = 2)$ на первую $(n_1 = 1)$, то выделяется квант энергии. В обратном случае такой же квант энергии поглощается. Таким образом, максимальную энергию атому водорода нужно сообщить для того, чтобы перевести электрон с орбиты с $n=1$ на орбиту $n \to \infty$ т. е. оторвать его от ядра атома (ионизировать атом).

Рис. 21.3




Из соотношения (21.11) можно определить частоту $\nu$ или длину волны $\lambda = c/\nu$ поглощаемого или испуск

$$\nu = \frac{m_e e^4}{8h^3\varepsilon_0^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \tag{21.12}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8h^3\varepsilon_0^2 c}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \tag{21.13}$$

Формулы (21.12) и (21.13) называются *сериальными.* Видно, что выражение (21.12) представляет собой обобщенную формулу Бальмера, а величина

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3\varepsilon_0^2 c} \tag{21.14}$$

является ***постоянной Ридберга.*** Значение *R,* вычисленное по формуле (21.14), совпадает с экспериментальным значением этой постоянной, что подтверждает правильность теории Бора для атома водорода.

Теория Бора объяснила расхождения при экспериментальных определениях постоянной Ридберга для атома водорода и однократно ионизированного атома гелия.

Бор указал, что для получения точных выражений постоянной Ридберга нужно учитывать движение ядра под действием сил со стороны электрона. Теория, исходившая из предположения о неподвижности ядра, является лишь первым приближением. Таким образом, на основании теории Бора можно объяснить наличие линейчатых спектров, образующихся у атома водорода при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое. Каждая спектральная линия получается в результате того, что атом испускает фотон при переходе из одного энергетического состояния в другое. При этом разность между энергиями атома в начальном и конечном состояниях определяет частоту электромагнитного излучения, а следовательно, и положение данной линии в спектре. Придавая *n* в соотношении (21.10) различные значения, можно получить ряд значений энергий стационарных состояний атома водорода (рис. 21.3).

Существование дискретных энергетических состояний атомов является одной **из** самых характерных особенностей **их** свойств, оно доказано многочисленными опытами.

Главное квантовое **число.** В выражения (21.7) и (21.11) входит *n,* которое называют ***главным квантовым числом.*** Главное квантовое число характеризует энергию и среднее удаление электрона от атомного ядра (радиус орбиты). Оно принимает значения $n = 1, 2, 3, \ldots$ $(n \neq 0)$.С увеличением главного квантового числа увеличивается радиус орбиты и энергия электрона. Энергетическое состояние с $n = 1$ является основным. Состояния с $n > 1$, т.е. $n = 2, 3, 4$ являются возбужденными (см. рис. 21.3). Атом водорода обладает минимальной энергией $(E_1 = -13{,}6$ эВ$)$ при *n — 1,* т.е. когда находится в основном состоянии.

Рождение теории Бора ознаменовало начало нового этапа в развитии современной физики. Тем не менее эта теория обладала рядом недостатков. Н.Бор первым заметил и подчеркнул слабые стороны предложенной им теории: искусственность планетарной модели, своеобразие понятий стационарных состояний, т.е. сочетание классических и квантовых теорий. Теория Бора оказалась недостаточной для объяснений строения многоэлектронных атомов, молекул, химической связи и т.д. Эти объяснения дала новая теория — квантовая механика, основы которой были созданы в 1925 - 1926 гг. В. Гейзенбергом и Э.Шредингером.

Рождение теории Бора ознаменовало начало нового этапа в развитии современной физики. Тем не менее эта теория обладала рядом недостатков. Сам Бор первым заметил и подчеркнул слабые стороны предложенной им теории: искусственность планетарной модели, своеобразие понятий стационарных состояний, т. е. сочетание классических и квантовых понятий.

## 21.5. Квантовые генераторы

Появление ***квантовых генераторов*** является одним из наиболее замечательных достижений новой области науки — квантовой электроники.

Первые квантовые генераторы были разработаны нашими соотечественниками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и американским физиком Ч. Таунсом. Оптические квантовые генераторы, называемые ***лазерами,*** являются совершенно новым типом источников света.

Возбужденный атом может отдать энергию возбуждения безызлучательно и за счет ***спонтанных*** (самопроизвольных) и ***вынужденных переходов.*** Излучение обычных источников света спонтанно: оно некогерентно, состоит из цугов волн различных частот, поляризаций и направлений распространения. Принцип лазерной техники заключается в использовании вынужденного (индуцированного) когерентного излучения.

Под ***индуцированным излучением*** понимают излучение возбужденных атомов, вызванное действием падающего на них света. В этом случае переход возбужденного атома на более низкий уровень сопровождается испусканием фотона, не отличающегося по характеристикам от индуцирующего фотона. В результате такого вынужденного квантового перехода в веществе генератора появляются уже два одинаковых фотона: один первичный — вынуждающий, другой вторичный — испущенный. Поскольку вещество состоит из большого количества атомов, таких вторичных фотонов становится все больше и больше, происходит усиление света.

Число вынужденных переходов зависит от плотности потока падающих фотонов. Для получения мощного индуцированного излучения необходимо, чтобы

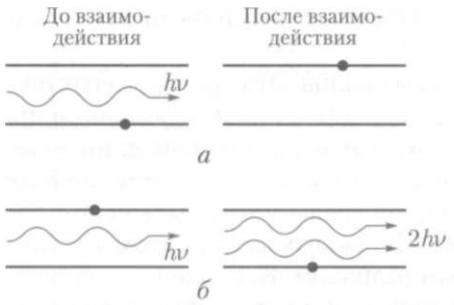



Рис. 21.4

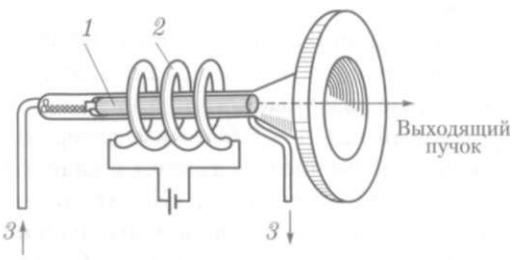



Рис. 21.5

в возбужденном состоянии атомы могли находиться в течение довольно продолжительного времени. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом сопровождается либо его поглощением, т.е. уменьшением интенсивности света при прохождении его через вещество (рис. 21.4, *а),* либо его усилением (рис. 21.4, *б).* Для того чтобы вещество усиливало проходящее электромагнитное излучение, необходимо создать в нем неравновесное (инверсное) состояние, т.е. такое состояние, в котором атомов, находящихся на возбужденном уровне, больше, чем на более низких. Процесс перевода вещества в такое состояние называется *оптической накачкой.*

Рассмотрим принцип действия оптического квантового генератора — *рубинового лазера,* созданного в 1960 г. На рис. 21.5 представлена схема рубинового лазера. Рубин (активная среда) — это кристалл $Al_2O_3$, в состав которого входит до 0,05 % ионов $Cr^{3+}$, ионы хрома играют основную роль в лазерном процессе. Световое излучение лазера создается ионами хрома, для возбуждения которых служит импульсная газоразрядная трубка ***2,*** спирально закрученная вокруг рубинового стержня *1;* она называется *лампой накачки.* Рубиновый стержень лазера представлял собой цилиндр, торцы которого были тщательно отполированы и покрыты слоем серебра таким образом, что один торец полностью отражал свет, а другой — частично отражал и частично пропускал свет. При вспышке лампы накачки в рубиновый стержень попадают фотоны различных частот. Атомы хрома, поглотив часть фотонов определенной энергии, переходят в возбужденное состояние. За счет ограниченных спонтанных переходов в стержне может возникнуть вынужденное излучение, распространяющееся строго вдоль его оси и усиливающееся при многократных отражениях от торцовых зеркал, которые выполняют роль объемного резонатора. В результате возникает мощное монохроматическое излучение — световой импульс, часть которого выходит через полупрозрачное зеркало. Длительность такого импульса $\sim 10^{-3}$ с. Это связано с тем, что все возбужденные ионы хрома за это время переходят в невозбужденное состояние. Световой луч лазера строго направлен и обладает малой расходимостью. Объемный резонатор лазера служит для создания положительной обратной связи и для формирования геометрических параметров выходного луча лазера.

Не вся энергия, поглощенная рубиновым стержнем, превращается в лазерное излучение. Часть ее, довольно значительная $(\approx 50\,\%)$, тратится на нагревание стержня, поэтому в конструкции лазера предусмотрено охлаждение *3.* Скорость повторения импульсов лазера зависит от системы охлаждения рубиново-

го кристалла. При температуре стержня порядка 1 ООО К рубиновый лазер разрушается.

Существует большое количество лазерных материалов. Это прежде всего стекло, в которое введены ионы неодима, флюорит кальция с ионами самария и др. Различные лазерные материалы дают световое излучение различных длин волн: рубиновый лазер — 0,694 мкм, лазер на стекле с неодимом — 1,06 мкм (инфракрасное излучение). В лазерах в качестве активной среды могут быть использованы газы или смеси газов (Ne, Ar, Ne —He и др.). В газовых лазерах атомы активной среды часто возбуждают высокочастотным разрядом. Как правило, излучение газовых лазеров непрерывно. Созданы полупроводниковые, химические, газодинамические и другие лазеры.

Применение лазеров. В лазерном луче может достигаться плотность мощности порядка $10^{12}$–$10^{16}$ Вт/см$^2$. Этого достаточно, чтобы при фокусировке в зоне фокального пятна за время ~ 10"$^{8}$ с прожечь отверстие в вольфрамовой фольге. Данное свойство лазерных лучей используется в светолучевых станках, с помощью которых выполняют отверстия в камнях часовых механизмов из рубина, алмаза, в тугоплавких сплавах и труднообрабатываемых металлах.

Широкое применение нашли лазеры в микроэлектронике. С помощью лазеров производят сварку различных соединений для микросхем, напыляют полупроводниковые слои и т.д. Высокая монохроматичность и направленность лазерного излучения позволяют использовать его для измерения расстояний. Например, 17 ноября 1970 г. советская автоматическая станция «Луна-17» доставила на поверхность Луны передвижную лабораторию «Луноход-1», на которой был установлен лазерный отражатель. По времени пробега лазерного луча, посланного с Земли и отраженного обратно отражателем, было точно измерено расстояние от Земли до Луны.

Лазеры позволяют измерять не только астрономические, но и малые расстояния. (Например, с помощью лазерного интерферометра измерена деформация земной коры с погрешностью $3 \cdot 10^{-9}$ м.)

В медицине одной из областей применения оптических квантовых генераторов является хирургия. Выходной пучок света используют для стерилизации и прижигания участков живых тканей. Проведены успешные эксперименты с применением лазера по устранению отслоения сетчатки глаза (микрохирургия глаза). Глаз при такой операции служит линзой, которая фокусирует излучение на сетчатке. Интенсивность пучка света при этом настолько низка, что глаз в целом не повреждается, а в том месте, где пучок света фокусируется, происходит приваривание сетчатки.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Внутреннее строение атома изучать непосредственно невозможно из-за малости его размеров. Структура атома проявляется только косвенно в явлениях, связанных с его внутренним строением. К числу таких явлений относится излучение.

• Э. Резерфорд предложил *ядерную (планетарную) модель атома.* Согласно этой модели, весь положительный заряд и почти вся масса атома **(99,4** *%)* сосредоточены в атомном ядре. Размеры ядра $10^{-15}$ м, размер атома $\sim 10^{-10}$ м.

Вокруг ядра по замкнутым орбитам движутся электроны.

Модель строения атома, предложенная Резерфордом, не объясняла спектральных закономерностей и оказалась в противоречии с законами классической механики. По моде-

ли Резерфорда атом является неустойчивой системой. В действительности атом устойчив. Выход из этого затруднительного положения был предложен Н. Бором в 1913 г.

• В основе *теории Бора* лежат два постулата.

**1. Электроны могут двигаться в атоме только по определенным орбитам, находясь на которых они, несмотря на наличие у них ускорения, не излучают.**

**Эти орбиты соответствуют стационарным состояниям электронов в атоме и определяются условием**

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}.$$

**2. Атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.**

Энергия кванта равна разности энергий стационарных состояний электрона до $E_2$- и после $E_1$-перехода:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

• Бор ввел правило квантования, позволившее определить возможные радиусы орбит электрона и значение энергии атома водорода.

На основании теории Бора можно объяснить наличие линейчатых спектров, образующихся у атома водорода при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.

Существование дискретных энергетических состояний атомов является одной из самых характерных особенностей их свойств, оно доказано многочисленными опытами.

• Рождение теории Бора ознаменовало начало нового этапа в развитии современной физики. Тем не менее эта теория обладала рядом недостатков: искусственность планетарной модели, своеобразие понятий стационарных состояний, т. е. сочетание классических и квантовых понятий. Эта теория представляла собой определенный переходный этап на пути создания последовательной теории атомных и ядерных явлений.

• На основе квантовой теории излучения были построены квантовые генераторы. Оптические квантовые генераторы — *лазеры* — являются новым типом источников света. Они нашли широкое применение в различных областях науки и техники.

### Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Расскажите о закономерностях в атомных спектрах водорода. 2. Объясните обобщенную формулу Бальмера. 3. Расскажите об опытах Резерфорда по рассеянию а-частиц. 4. Сформулируйте постулаты Бора. 5. Объясните на основании теории Бора наличие линейчатых спектров у атома водорода. 6. В чем недостатки теории Бора? 7. Что такое квантовые генераторы? 8. Где применяются лазеры?

### Пример решения задачи

• Задача. Определить частоту света, излучаемого атомом водорода, при переходе электрона на уровень с главным квантовым числом $n_1 = 2$, если радиус орбиты электрона изменился в 9 раз.

Дано: $n_1 = 2; r_1/r_2 = 1/9.$

**Найти: У.**

Решение. Частота света, излучаемого атомом водорода, определяется формулой

$$\nu = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \qquad (1)$$

где $R$ — постоянная Ридберга; $n_2$ — номер орбиты, с которой переходит электрон; $n_1$ — 2 — номер орбиты, на которую электрон переходит.

Из формулы (21.7) для радиуса орбиты следует, что

$$\frac{n_1^2}{n_2^2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{9}.$$

Разделив и умножив правую часть равенства (1) на $n_1^2$, получим

$$\nu = R\left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)\frac{1}{n_1^2}.$$

**Вычисления:**

$$\nu = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \text{с}^{-1}\left(1 - \frac{1}{9}\right)\frac{1}{4} = 0{,}73 \cdot 10^{5}\ \text{с}^{-1}.$$

**Ответ:** $\nu = 0{,}73 \cdot 10^5\ \text{с}^{-1}$.

*Задачи для самостоятельного решения*

**1**. Вычислить период обращения электрона на первой боровской орбите в атоме водорода.

**2.** Вычислить скорость электрона, находящегося на третьем энергетическом уровне в атоме водорода.

**3.** При переходе электрона в атоме водорода из возбужденного состояния в основное радиус орбиты электрона уменьшился в 16 раз. Определить длину волны излученного фотона.

4. Определить длину волны де Бройля электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $10^3$ В.

5. Во сколько раз меняются радиус орбиты электрона и энергия атома водорода при переходе из состояния $n_2 = 5$ в состояние $n_1 = 1$?

**6.** Каковы скорость и ускорение электрона на первой боровской орбите?

**Ключевые слова:** *спектр атома, спектральные линии, модель атома, постулаты Бора, квантовое число, лазер.*

Глава 22

# ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

## 22.1. Естественная радиоактивность

В 1896 г. А. Беккерель, изучая явление люминесценции солей урана, установил, что если осветить соль урана солнечными лучами, а затем положить ее на завернутую в черную бумагу фотопластинку, то последняя темнеет под действием, как он полагал, лучей люминесценции.

Но однажды Беккерель положил на фотопластинку соль урана, не осветив ее предварительно лучами Солнца, и весь препарат поместил в темный ящик. Че-

рез несколько дней, проявив фотопластинку, он обнаружил на ней отпечаток куска урановой руды.

Проводя подобные опыты с различными солями урана, Беккерель пришел к выводу, что урановая соль испускает лучи неизвестного типа, которые проходят через бумагу, дерево, тонкие металлические пластинки, делают воздух проводником электричества. Лучи, открытые Беккерелем, ***назвали*** *радиоактив - пыми* (от лат. «радиус» — луч).

Элемент уран оказался не единственным, способным испускать радиоактивные лучи. Марии и Пьеру Кюри, которые провели всестороннее изучение радиоактивности, удалось выделить из урановой руды два радиоактивных элемента: полоний Po и радий Ra.



Рис. 22.1

Естественные радиоактивные элементы имеются в заметных количествах повсюду на Земле: в воде, в воздухе, в почве, в тканях живых организмов, в продуктах питания. Наиболее распространенными естественными радиоактивными изотопами являются $^{40}K$, $^{14}C$ и радиоактивные изотопы семейства урана и тория.

Экспериментально Резерфордом было установлено, что радиоактивное излучение неоднородно и состоит из нескольких видов лучей. Это следовало из результатов опытов, схема которых приведена на рис. 22.1. Поперечное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка, разделяет излучение, испускаемое радиоактивным источником, на три пучка: $\alpha$, $\beta$, $\gamma$.

Альфа-лучи представляют собой поток моноэнергетических ядер гелия; бета-лучи — поток электронов; гамма-лучи — поток квантов электромагнитной энергии.

> Радиоактивность элемента не зависит от того, является ли он химически чистым или находится в составе какого-либо химического соединения. Радиоактивность представляет собой внутриядерный процесс.

Это вытекает из того, что на него не оказывают никакого воздействия ни вид химического соединения, в которое входит данное ядро, ни агрегатное состояние вещества, ни большие давления, ни очень высокие температуры, ни электрические и магнитные поля, т.е. все те воздействия, которые могут изменить состояние электронной оболочки атома.

Итак, под ***естественной радиоактивностью*** понимают явление самопроизвольного превращения атомных ядер неустойчивых изотопов в устойчивые, сопровождающееся испусканием частиц и излучением энергии. Таким образом, открытие явления радиоактивности вплотную подвело физиков к изучению строения атомного ядра.

## ***22.2.**** Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада. При изучении естественной радиоактивности перед экспериментаторами возник вопрос: по какому закону происходит распад радиоактивных элементов? Многочисленные опыты показывают, что с течением времени число радиоактивных атомов в данном объеме вещества уменьша-

ется. Для одних элементов это уменьшение происходит очень быстро — в течение минут и даже секунд; для других на это требуются миллиарды лет. Было установлено, что распад ядер — явление случайное. Невозможно сказать, что произойдет с данным ядром; оно может в равной мере и претерпеть распад, и сохраниться целым независимо от того, сколько времени оно вообще существует. Можно только утверждать, что имеется некоторая вероятность распада каждого радиоактивного элемента за определенный промежуток времени; следовательно, изменение радиоактивности со временем должно подчиняться статистической закономерности. Одной из основных характеристик радиоактивного элемента является величина, которая определяет вероятность распада каждого отдельного атома за секунду. Ее обозначают X и называют ***постоянной радиоактивного распада.***

Если в начальный момент времени $t$ — 0 имеется $N_0$ радиоактивных атомов, то в момент времени $t$ число оставшихся радиоактивных атомов

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \qquad (22.1)$$

где $e \approx 2{,}72$ — основание натурального логарифма.

Выражение (22.1) называется ***законом радиоактивного распада.***

Период полураспада. Это время $T_{1/2}$, по истечении которого начальное число $N_0$ атомов радиоактивного вещества уменьшится вдвое. Если $t = T/_{2}$ то $N = N_0/2$ и тогда $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$, откуда $\lambda T_{1/2} = \ln 2$, или

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}. \qquad (22.2)$$

Период полураспада постоянен для данного изотопа. Периоды полураспада различных радиоактивных изотопов изменяются в очень широких пределах: от 4,56 млрд лет у урана до 1,5 • 10 ⁴ с у изотопа полония. Постоянство периода полураспада данных атомов изотопа подтверждает статистический характер радиоактивных превращений.

Все изотопы элементов, порядковый номер которых больше 83, радиоактивны. Естественные радиоактивные элементы можно расположить в четыре ряда, каждый член которого (кроме первого) образуется в результате радиоактивного распада предыдущего. Родоначальниками этих рядов являются $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{232}_{90}\mathrm{Th}$, $^{235}_{92}\mathrm{U}$, $^{237}_{93}\mathrm{Np}$

Семейство $^{238}_{92}\mathrm{U}$ заканчивается стабильным изотопом свинца $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$. Семейство тория $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ заканчивается устойчивым изотопом свинца $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$, конечным продуктом семейства актиния $^{235}_{92}\mathrm{U}$ является стабильный изотоп свинца $^{207}_{82}\mathrm{Pb}$, Семейство нептуния $^{237}_{93}\mathrm{Np}$ заканчивается стабильным изотопом висмута $^{209}_{83}\mathrm{Bi}$. Родоначальники радиоактивных семейств имеют большие периоды полураспада, например $^{238}_{92}\mathrm{U} - 4{,}56 \cdot 10^9$ лет, $^{232}_{90}\mathrm{Th} - 1{,}39 \cdot 10^{10}$ лет. В течение геологических эпох между всеми членами радиоактивного семейства устанавливается вековое равновесие, при этом количества радиоактивных веществ пропорциональны их периодам полураспада.

***Активность*** $A$ радиоактивного вещества характеризует число распадов ядер за 1 с.

Единицей активности является ***беккерель;*** $1\ \text{Бк} = 1\ \text{расп./с} = 1\ \text{с}^{-1}$.

Величину $\tau = 1/\lambda$ называют ***средним временем жизни*** радиоактивного изотопа. Значения $\lambda$ и $\tau$ не зависят от внешних условий, а определяются лишь свойствами атомного ядра.

## 22.3. Способы наблюдения и регистрации заряженных частиц

Методы регистрации ядерных излучений. Цель исследований излучения веществ — выяснение природы частиц, излучаемых при радиоактивном распаде, измерение энергии этих частиц и интенсивности излучения (т. е. определение числа частиц, излучаемых радиоактивным веществом за 1 с).

Наиболее распространенными при регистрации ядерных частиц и излучений являются методы, основанные на ионизирующем и фотохимическом действии частиц. К ним относятся химические, калориметрические и фотографические методы. Ионизирующее действие излучения используется в ионизационных камерах, счетчиках Гейгера-Мюллера и сцинтилляционных счетчиках.

**Камера** Вильсона. Этот прибор был сконструирован в **1911** г. английским физиком Ч. Вильсоном. Он основан на способности быстро летящих частиц ионизировать молекулы вещества, находящегося в парообразном состоянии.

Схема камеры Вильсона изображена на рис. 22.2. Рабочий объем камеры *1* заполнен воздухом или другим газом и содержит в себе насыщенный пар воды или спирта. При быстром передвижении поршня *2* ***вниз*** пар или газ в объеме *1* адиабатно расширяется и охлаждается, при этом пар становится перенасыщенным. Когда через объем камеры пролетает заряженная частица, то на своем пути она создает ионы, на которых при расширении объема *1* образуются капельки сконденсировавшегося пара. Таким образом, частица оставляет за собой видимый след (трек) в виде узкой полоски тумана. Этот трек можно наблюдать или сфотографировать.

Альфа-частицы вызывают сильную ионизацию газа и поэтому оставляют в камере Вильсона жирные следы, бета-частицы после себя оставляют очень тонкие треки (рис. 22.3). Гамма-кванты могут быть обнаружены с помощью камеры Вильсона по фотоэлектронам, которые они выбивают из молекул газа, заполняющего рабочий объем камеры.

Камеру Вильсона часто помещают в сильное магнитное поле, что позволяет по искривлению треков частиц определять их энергию и знак заряда, а по толщине треков — заряд и массу частиц.

Газоразрядные счетчики. В исследованиях по ядерной физике часто используют счетчики заряженных частиц, которые служат для регистрации отдельных частиц. Рассмотрим принцип действия одного из видов счетчиков — пропорционального (рис. 22.4). Счетчик состоит из наполненного газом цилиндра *1,* в который введены два электрода: анод *3* представляет собой тонкую металлическую нить, оба ее конца укреплены на изоляторах. Катод *2* выполнен в виде токоироводящего металлического слоя, нанесенного на внутреннюю поверхность цилиндра.

Между катодом и анодом прикладывается напряжение порядка нескольких сотен вольт, вследствие чего внутри счетчика создается электрическое поле. При попадании в счетчик частица ионизует молекулы газа и в электрическом поле между катодом и анодом возникает направленное движение ионов, т.е. происходит газовый разряд. Разрядный ток создает большое падение напряжения на сопротивлении $R_н$, и напряжение между электродами сильно уменьшается, поэтому разряд прекращается. После прекращения тока между катодом и анодом вновь восстанавливается большое напряжение и счетчик готов к регист-

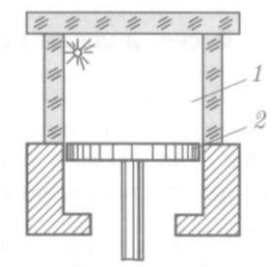


Рис. 22.2

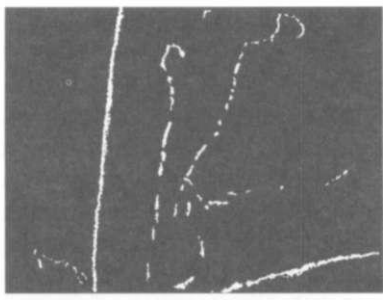


Рис. 22.3

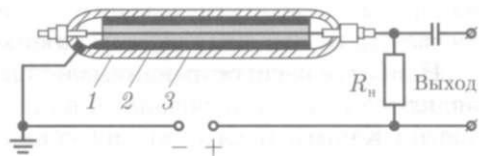



Рис. 22.4

рации следующей частицы. Импульс напряжения, возникающий на сопротивлении $R_н$, усиливается и регистрируется специальным счетным устройством. Пропорциональными счетчики называют потому, что сила тока газового разряда, возникающего после прохождения ионизирующей частицы, пропорциональна числу образованных ею ионов.

Одна из разновидностей *пропорциональных счетчиков* была предложена Э. Резерфордом и Г. Гейгером в 1908 г. Впоследствии в 1928 г. счетчик был усовершенствован Э. Мюллером и получил название ***счетчика*** *ГЕЙГЕРА* – ***Мюллера.***

## 22.4.* Эффект Вавилова-Черенкова

**Эффект** Вавилова-Черенкова. В 1934 г. А. П. Черенков при исследовании свечений жидкостей под действием γ-излучения радия наблюдал слабое синее свечение, яркость которого в чистых прозрачных жидкостях мало зависела от их химического состава.

Свечение, вызываемое радиоактивными излучениями, было замечено еще Пьером и Марией Кюри, но они считали его обычной люминесценцией. Вавилов и Черенков предположили, что это свечение возникает в результате торможения быстрых электронов, выбиваемых γ-квантами из молекул облучаемого вещества. Это предположение было проверено следующим образом: так как магнитное поле отклоняет электроны, то свечение, если оно возникает на пути тормозящего электрона, должно отклоняться магнитным полем. И действительно, при наложении магнитного поля свечение отклонялось в соответствующую сторону. Следовательно, это не была люминесценция.

Из теории этого явления, названного ***эффектом Вавилова — Черепкова***[1]***,*** совершенно неожиданно следовало, что

**свет** должны испускать электроны, которые движутся **быстрее света.**

Но ведь теория относительности убедительно свидетельствует о полной невозможности такого движения. И все-таки оказалось, что можно обгонять свет. Все дело в том, что в теории относительности предельной скоростью является скорость света в вакууме. В веществе свет распространяется с меньшей скорос-

[1] **Эффект Вавилова-Черенкова был теоретически объяснен советскими учеными И.Е.Таммом и И.М.Франком. За открытие эффекта и выяснение его механизма А.П.Черенкову, И.Е.Тамму и И. М. Франку в 1958 г. была присуждена Нобелевская премия.**

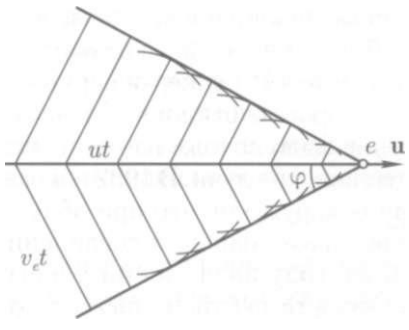



Рис. 22.5

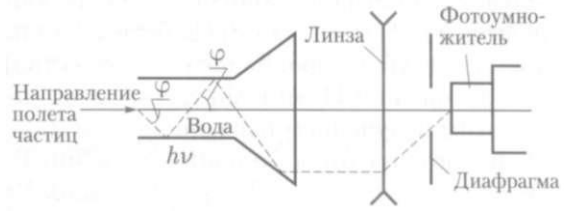



Рис. 22.6

тью $v_e = c/n$, где $n$ — показатель преломления среды. Если энергия $\gamma$-кванта велика, выбитый им электрон может двигаться со скоростью $u$, большей скорости света в среде, но не превышающей скорости света в вакууме. Таким образом, для возникновения черенковского излучения необходимы следующие условия: $u > c$ или $\beta n > 1$, где $\beta = u/c$. Суть этого явления заключается в следующем.

**Электрон, движущийся со скоростью $u_e$, обгоняет свое собственное электромагнитное поле и начинает этим полем** тормозиться.

В результате торможения и возникает излучение (свечение). Излучение Вавилова - Черенкова обладает строгой направленностью. Оно сосредоточено в пределах угла $\sin\varphi = v_e/u$ (рис. 22.5) и направлено в сторону движения электрона. Такое движение электрона можно сравнить с движением глиссера по гладкой поверхности воды, когда за ним возникают расходящиеся волны с конусообразным фронтом, причем угол конуса тем меньше, чем с большей скоростью движется глиссер.

**Счетчик Черенкова.** Эффект Вавилова - Черенкова присущ не только электронам, но и любым другим заряженным частицам: при больших скоростях движения в плотных средах ($n > 1$) они излучают электромагнитные волны — свет. Таким образом, свечение Вавилова-Черенкова может быть использовано для определения скорости движения быстрых частиц. На этом эффекте основано действие ***счетчика Черенкова.***

Счетчик состоит из чистой жидкости, например воды или прозрачного твердого тела, соединенных с фотоумножителем, регистрирующим каждую отдельную «сверхсветовую» частицу (рис. 22.6). Особенностью черенковского счетчика является то, что он регистрирует не любые заряженные частицы, а лишь те, у которых скорость больше скорости света в данной среде. Кроме того, яркость вспышки зависит от заряда частицы. Поэтому, подбирая подходящую среду, можно выделять частицы с определенными интервалами энергий или с определенным значением заряда. Такие счетчики устанавливаются, например, на спутниках и космических ракетах для изучения космических лучей.

## 22.5. Строение атомного ядра

Открытие нейтрона. В 1920 г. Э. Резерфорд предположил возможность существования незаряженной (нейтральной) частицы, масса которой примерно рав-

на сумме масс протона и электрона. Многочисленные опыты, проведенные в период с 1920 по 1930 г. с целью обнаружения этой частицы, не давали положительных результатов. В 1930 г. немецкие физики В. Боте и Р. Беккер обнаружили излучение большой проникающей способности, которое не отклонялось электрическим полем. По своим свойствам это излучение было похоже на очень жесткие (т. е. глубоко проникающие в вещество) рентгеновские лучи. В 1932 г. французские физики Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что при облучении этим излучением парафина, воды и других водородоподобных соединений возникают протоны больших энергий. В этом же году английский ученый Дж. Чэдвик, ученик Э. Резерфорда, много лет искавший нейтрон, доказал, что излучение, открытое Боте и Беккером, представляет собой поток нейтральных частиц, масса которых чуть больше массы протона. Таким образом, нейтрон, существование которого предполагали Э. Резерфорд и другие физики, был открыт как отдельная частица.

Строение атомного ядра. Открытие нейтрона сыграло большую роль в понимании строения атомного ядра. Советским физиком Д.Д.Иваненко и немецким ученым В. Гсйзенбергом в 1932 г. была предложена протон-нейтронная модель, согласно которой ядро любого химического элемента состоит из двух видов элементарных частиц: ***протонов*** *p* и ***нейтронов*** *n,* которые впоследствии получили название ***нуклонов.*** Дальнейшими экспериментальными исследованиями была доказана справедливость этой модели, и в настоящее время она является общепризнанной.

Протоны имеют положительный заряд, равный по модулю заряду электрона. Нейтроны электрически нейтральны. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона. Масса нейтрона больше массы протона на 2,5 массы электрона. Массы нейтрона $m_n$ и протона $m_p$ в углеродной шкале атомных масс (а. е. м.) соответственно равны $m_n$ = 1,008665012 а.е.м., $m_p$ = 1,007276470 а.е.м. Количество протонов в ядре определяет заряд ядра $+Ze$. Значение *Z* совпадает с атомным номером соответствующего химического элемента в Периодической системе Менделеева. Количество нейтронов в ядре обозначают *N.* Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом *A* ядра:

$$A = N + Z. \qquad (22.3)$$

Для обозначения атомных ядер применяют символы. Если X соответствует символу атома химического элемента в Периодической системе Менделеева, то символ ядра этого атома имеет вид ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$. Например, ядро атома водорода или протон имеют символ ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ или ${}^{1}_{1}p$▷, ядро атома гелия или альфа-частица имеют символ ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ или ${}^{4}_{2}\alpha$. Ядра, имеющие один и тот же *Znpu* различных *A,* называют ***изотопами.*** Изотопы ядер химического элемента имеют одинаковое число протонов, но разное число нейтронов в составе ядра.

Существование изотопов было установлено еще в 1910 г. английским физиком Ф. Содди. У всех химических элементов (кроме технеция ${}^{99}_{43}\mathrm{Tc}$ и прометия ${}^{141}_{61}\mathrm{Pm}$) имеются изотопы. Например, водород имеет три изотопа: легкий с ядром ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ (протий), тяжелый с ядром ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ (дейтерий) и искусственный с ядром ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ (тритий). У урана (*Z* = 92) имеется 12 изотопов с массовыми числами от *A* = 228 до *A* = 239. Все химические элементы представляют собой природные смеси изотопов. Поэтому каждый химический элемент имеет относительную атомную массу, равную среднему значению атомных масс всех его изотопов.

Физические свойства изотопов несколько отличны от стабильных элементов. Например, температура кипения протия 20,39 К, а дейтерия 23,57 К.

Ядра, имеющие одно и то же Л при разных Д называют ***изобарами.*** Примером изобарной пары могут быть $^{36}_{16}\mathrm{S}$ и $^{36}_{18}\mathrm{Ar}$, изобарной триады — $^{50}_{22}\mathrm{Ti}$; $^{50}_{23}\mathrm{V}$; $^{50}_{24}\mathrm{Cr}$. Экспериментальные данные по рассеянию α-частиц веществом позволили установить эмпирическую формулу для вычисления радиуса ядра:

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad \text{где } R_0 = (1{,}2-1{,}7)\cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

Объем ядра пропорционален числу нуклонов ***A,*** входящих в него; это означает, что нуклоны во всех ядрах упакованы примерно с одинаковой плотностью. Плотность ядерного вещества велика, и ее значение примерно соответствует р = = 2-10[11] кг/м[3], т.е. около 200 млн т в 1 см[3].

**Дефект массы,** энергия **связи и** устойчивость атомных **ядер.** Большинство ядер представляют собой устойчивые образования, хотя между протонами, входящими в состав ядра, действуют силы кулоновского отталкивания.

Устойчивость атомных ядер означает, что между нуклонами в ядрах существует определенное взаимодействие. О прочности того или иного образования судят по тому, насколько легко или трудно разрушить его: чем труднее его разрушить, тем оно прочнее. Разрушить ядро — это значит разорвать связи между его нуклонами, или, иными словами, совершить работу против сил связи между ними. Такой подход, основанный на законе сохранения энергии, позволяет сделать ряд важных выводов о специфике тех связей, которые удерживают нуклоны в ядре.

Введем понятие энергии связи отдельного нуклона в ядре, т.е. ***удельной энергии связи*** $\Delta E_{\text{уд}}$ – физическая величина, равная работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра. Полная энергия связи ядра определяется работой, которую нужно совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны. Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра выделяется энергия, необходимая для расщепления ядра на составляющие его нуклоны. Полную энергию связи ядра характеризует величина $\Delta m$, называемая *дефектом массы.* Под дефектом массы понимают разность между суммой масс протонов и нейтронов, находящихся в свободном состоянии, и массой составленного из них ядра. Если ядро с массой $M_{\text{я}}$ образовано из *Z* протонов с массой $m_p$ каждый и из ***(A — Z)*** нейтронов с массой $m_n$ каждый, то

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\text{я}}. \qquad (22.4)$$

Наличие дефекта массы показывает, что для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны (протоны и нейтроны) необходимо затратить энергию

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta m c^2. \qquad (22.5)$$

Величину $\Delta E_{\text{св}}$ называют ***энергией связи*** *(полной энергией связи).* Она является непосредственной мерой устойчивости ядра.

В ядерной физике приняты следующие обозначения: а) для массы — а. е. м. (атомная единица массы); 1 а. е. м. = 1,66-$10^{-27}$ кг; б) для энергии — эВ (электронвольт) и МэВ (мегаэлектронвольт); 1 эВ = 1,6-$10^{-19}$ Дж; 1 МэВ = $10^6$ эВ.

Как отмечалось выше, удельная энергия связи — это энергия, приходящаяся на один нуклон:

$$\Delta E_{\text{уд}} = \frac{\Delta E_{\text{св}}}{A}. \qquad (22.6)$$

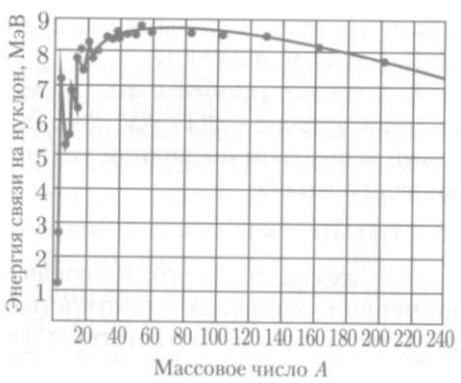



Рис. 22.7

Удельная энергия связи весьма велика. Она составляет в среднем около 8 МэВ на один нуклон.

На рис. 22.7 приведена кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа $A$. Из рисунка видно, что значение Д-Ёуд у различных ядер различно.

Наиболее прочно связаны нуклоны в ядрах средней части Периодической системы Менделеева. В этих ядрах удельная энергия связи близка к 8,7 МэВ. По мере дальнейшего увеличения числа нуклонов в ядре удельная энергия связи убывает. Для ядер, расположенных в конце периодической системы (например, для урана), $\Delta E_{уд}$ приблизительно составляет 7,6 МэВ.

Это позволяет сделать вывод о том, что

**для** получения ядерной **энергии** принципиально **возможны два метода: 1) деление** тяжелых **ядер; 2) синтез легких ядер.**

## 22.6. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность

**Ядерные реакции.** ***Ядерные реакции*** — это превращение атомных ядер при их взаимодействии как друг с другом, так и с ядерными частицами. При ядерных реакциях соблюдаются законы сохранения суммарного электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса, момента импульса. Из законов сохранения электрического заряда и числа нуклонов (массовых чисел) следует, что сумма зарядов (массовых чисел) продуктов реакции или распада равна сумме зарядов (массовых чисел) исходных ядер. Все ядерные реакции характеризуются энергией, выделяемой или поглощаемой при их протекании. Реакции, сопровождаемые выделением энергии, называются ***экзотермическими,*** а поглощением энергии — ***эндотермическими.***

Согласно предложенной Бором теории, ядерная реакция протекает в два этапа. На первом этапе ядро - мишень $A$ — сливается с бомбардирующей частицей $a$, образуя новое ядро $C^*$, которое находится в возбужденном состоянии: $A + a \rightarrow C^*$. На втором этане возбужденное ядро $C^*$ распадается на конечные продукты ядерной реакции: $C^* \rightarrow b + B$. Таким образом, ядерная реакция протекает по схеме

$$A + a \rightarrow C^* \rightarrow B + b. \qquad (22.7)$$

Одной из первых ядерных реакций стало соединение ядер азота с ядрами гелия ($\alpha$-частицами)• Эта реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. Бомбардируя азот $\alpha$-частицами, Резерфорд обнаружил появление протонов. При этом ядро азота, поглотившее $\alpha$-частицу, образует возбужденное ядр $^{18}_{9}\mathrm{F}$, которое распадается на конечные продукты реакции $^{17}_{8}\mathrm{O}$ и $^{1}_{1}p$:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}p. \qquad (22.8)$$

Появление протонов регистрировалось вначале методом сцинтилляций, а потом камерой Вильсона.

Предсказанное Э. Резерфордом в **1920** г. существование в ядре нейтральной частицы (нейтрона — ${}^{1}_{0}n$) было подтверждено в **1932** г. В. Боте и Г. Беккером при обстреле ядер бериллия $\alpha$-частицами:

$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n. \qquad (22.9) $$

Впоследствии было выяснено, что

нейтрон радиоактивен, период его полураспада $T = 12$ мин.

Искусственная радиоактивность. С помощью реакций была подтверждена возможность превращения одних химических элементов в другие и открыта возможность получения искусственным путем радиоактивных элементов.

Принципиальной разницы между искусственной **и** естественной радиоактивностью **не** существует, так как свойства изотопа **не** зависят от способа его образования, **и** изотоп, полученный искусственным путем, **ничем не** отличается от аналогичного природного изотопа.

Искусственная радиоактивность связана с нарушением стабильности атомного ядра. *Стабильными* являются ядра элементов, у которых число протонов равно числу нейтронов.

Если у легких ядер ($A < 50$) искусственным путем создать избыточное число нейтронов, то стабильность ядра нарушится, возникнет $\beta^-$-радиоактивность.

Если стабильность ядра нарушить, создав избыточное число протонов в ядре, то это приводит к возрастанию энергии ядра и сопровождается искусственной $\beta^+$-радиоактивностью.

## 22.7. Деление тяжелых ядер. Цепная ядерная реакция

**Деление тяжелых ядер.** Открытие нейтрона (**1932** г.) и искусственной радиоактивности (**1934** г.) стало поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Начиная с **1834** г. Э.Ферми с коллегами подвергли действию нейтронов почти все элементы периодической системы. Обычно при нейтронной бомбардировке ядро ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, захватывая нейтрон, переходит в возбужденное состояние ${}^{A+1}_{Z}\mathrm{X}$, которое, испуская электрон, превращается в ядро устойчивого изотопа ${}^{A+1}_{Z+1}\mathrm{X}$. В **1938-1939** гг. немецкие физики О.Ган и Ф.Штрассман обнаружили, что при бомбардировке урана происходит деление его ядер на два (редко три) осколка с выделением большого количества энергии. В результате деления ядер урана получились новые элементы, относящиеся к средней части периодической системы,- барий, лантан и др. Стало очевидно, что первоначальная реакция с ядрами урана осложняется большим количеством каких-то последующих процессов.

Возможность деления тяжелых ядер можно объяснить на основании зависимости удельной энергии связи от массового числа $A$, приведенной на рис. **22.7.** Из этой зависимости следует, что удельная энергия связи у тяжелых ядер на **1** МэВ меньше, чем у ядер элементов, находящихся в средней части таблицы Менделее-

ва. Процесс деления тяжелых ядер является энергетически выгодным, так как в акте деления участвуют порядка 200 нуклонов, т.е. деление одного ядра должно сопровождаться выделением энергии около 200 МэВ, причем большая часть этой энергии ($E \approx 165$ МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков деления.

Продукты деления очень разнообразны, их насчитывается более 200 видов. Наиболее вероятные значения масс осколков приходятся на 95 и 139. Деление на осколки равной массы менее вероятно и происходит крайне редко. Наиболее типичным примером реакции деления является

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{142}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{91}_{36}\mathrm{Kr} + 3{}^{1}_{0}n + Q \text{ (энергия)}. \qquad (22.10)$$

Дальнейшие исследования показали, что под действием нейтронов могут делиться ядра и других тяжелых элементов: $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$, $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ и др. Одни ядра тяжелых элементов делятся под действием быстрых нейтронов (например, $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{232}_{90}\mathrm{Th}$), другие — под действием тепловых (например, $^{235}_{92}\mathrm{U}$, $^{232}_{94}\mathrm{Pu}$).

В 1940 г. советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак обнаружили, что ядра некоторых тяжелых элементов могут претерпевать спонтанное (самопроизвольное) деление. Вероятность этого процесса очень мала, а период полураспада при этом составляет $8 \cdot 10^{15}$ лет для $^{238}_{92}\mathrm{U}$ и $10^{20}$ лет для $^{232}_{90}\mathrm{Th}$.

Цепная ядерная реакция. Открытие деления ядер урана и некоторых других тяжелых элементов позволило практически осуществить цепную ядерную реакцию. В подразд. 22.9 было указано, что при делении ядра урана кроме ядер-осколков вылетают два-три нейтрона. При благоприятных условиях вылетевшие нейтроны могут попасть в другие ядра урана, вызывая их деление. При делении двух-трех ядер урана освобождается уже четыре - девять нейтронов, которые могут вызывать деление новых ядер урана с образованием от 8 до 27 нейтронов и т.д. (рис. 22.8); возникает самоподдерживающийся процесс деления, который и называют цепной *ядерной реакцией.*

Цепная реакция сопровождается значительным выделением энергии, т.е. является экзотермической. В предыдущем параграфе было показано, что при делении одного ядра урана выделяется энергия 200 МэВ. Определим, какая энергия освобождается при делении всех ядер, содержащихся в 1 кг ($2{,}5 \cdot 10^{24}$ ядер) урана-235 ($^{235}_{92}\mathrm{U}$):

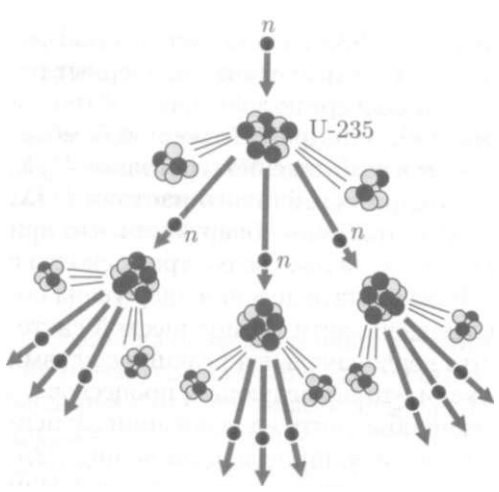


Рис. 22.8

$$E \approx 2 \cdot 10^2 \text{ МэВ} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{24} = 5 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 8 \cdot 10^{13} \text{ Дж}.$$

Это эквивалентно той энергии, которая получается от сгорания примерно 1800 т бензина или 2 500 т каменного угля. Огромное значение освобождаемой энергии побудило ученых и инженеров искать пути использования цепной ядерной реакции в практических (как мирных, так и военных) целях. Практическое осуществление цепных ядерных реакций не является такой простой задачей, как это кажется на пер-

вый взгляд. Дело в том, что природный уран в основном состоит из двух изотопов: 99,3 % $^{238}_{92}U$ и 0,7 % $^{235}_{92}U$. Теоретические и экспериментальные данные показывают, что нейтроны, освобождающиеся при делении ядер урана, вызывают деление лишь ядер изотопа урана-235, ядрами урана-238 они лишь поглощаются, не вызывая их деления, т.е. ядра урана-238 не принимают участия в развитии цепной реакции. Это является причиной отсутствия цепных реакций в природном уране. Следовательно, для образования цепной ядерной реакции необходимо решить задачу разделения природного урана на два его изотопа. В настоящее время эта сложная и трудоемкая задача решена.

Как же практически может быть осуществлена цепная реакция? Если все образовавшиеся в процессе деления вторичные нейтроны участвуют в последующих актах деления, то число нейтронов возрастает в геометрической прогрессии; следовательно, важнейшей характеристикой развития цепной ядерной реакции является ***коэффициент размножения нейтронов***

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}, \tag{22.11}$$

где $N_i$ — число нейтронов, вызывающих деление на одном из этапов реакции; $N_{i-1}$ — число нейтронов, вызывающих деление ядер на предшествующем этапе.

Коэффициент размножения определяет также число делений ядер, вызванное одним делением предыдущего звена реакции. Если $k < 1$, то реакция быстро затухает. Если $k = 1$, то цепной процесс идет с постоянной интенсивностью, называемой *критической.* Систему с $k > 1$ называют *надкритической;* в этом случае цепной процесс развивается лавинно и приводит к ядерному взрыву.

## 22.8. Управляемая цепная реакция. Ядерный реактор

Ядерный реактор. Устройство, в котором осуществляется управляемый цепной процесс деления ядер тяжелых элементов, называют ***ядерным реактором.*** Первый ядерный реактор был построен при Чикагском университете в 1942 г. под руководством Э.Ферми.

Рассмотрим условия работы ядерного реактора (рис. 22.9), в котором в качестве горючего используется природный уран, обогащенный до 5 % изотопом урана-235.

Так как развитие цепной реакции возможно только под действием тепловых нейтронов на ядрах урана-235, то одновременно с увеличением его концентрации необходимо создать условия для замедления вторичных нейтронов до тепловых скоростей. Для этой цели используется специальное вещество, называемое *замедлителем.* Ядра вещества замедлителя должны в основном замедлять, но не поглощать нейтроны. Таким веществом является тяжелая вода $D_2O$. Однако получение ее в больших количествах сопряжено с определенными трудностями. В обычной воде на 6 000 молекул $H_2O$ содержится лишь одна молекула $D_20$, поэтому в реакторах используют такие замедлители, как обычная вода или графит.

Активная зона реактора, в которой протекает самоподдерживающаяся цепная реакция, представляет собой графитовый цилиндр.

Чтобы уменьшить утечку нейтронов, активная зона окружена слоем отражателя, роль которого выполняют стенки графитового цилиндра. Ядерное горючее

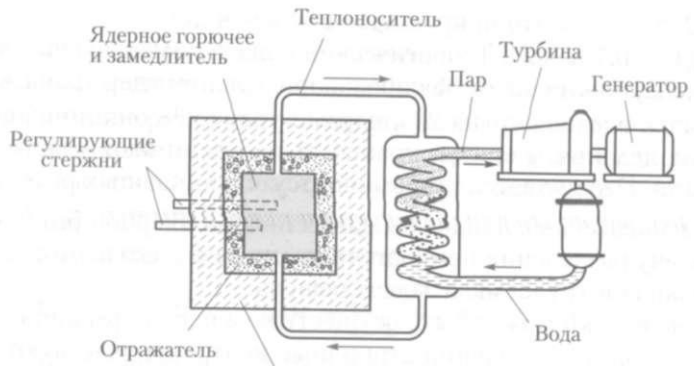



Рис. 22.9

(уран) вводится в активную зону, как правило, в виде стержней, между которыми расположен замедлитель нейтронов. В процессе цепной реакции температура в активной зоне достигает 800 - 900 К. Для отвода теплоты через активную зону реактора по трубам пропускают теплоноситель, например обычную воду или жидкий металлический натрий. Управление цепной реакцией осуществляется с помощью регулирующих стержней, изготовляемых из бора или кадмия, являющихся хорошими поглотителями тепловых нейтронов. Развивающаяся цепная реакция приводит к тому, что число делящихся ядер непрерывно растет, т.е. увеличивается мощность реактора. Для того чтобы цепной процесс не приобрел лавинного характера, необходимо коэффициент размножения нейтронов поддерживать равным единице; это достигается с помощью регулирующих стержней. При выдвинутых из активной зоны реактора регулирующих стержней $k > 1$, а при полностью вдвинутых $k < 1$. С помощью стержней в любой момент времени можно приостановить развитие цепной реакции.

**Критическая масса.** Самоподдерживающаяся цепная реакция может протекать в активной зоне $(k > 1)$ в том случае, если объем ее не меньше некоторого критического значения. Минимальный объем активной зоны, при котором возможно осуществление цепной реакции, называют ***критическим объемом.*** Массу делящегося вещества, заключенную в критическом объеме, называют ***критической массой.*** В зависимости от устройства установок и типа горючего критическая масса может изменяться от нескольких сотен граммов до нескольких десятков тонн ядерного горючего.

**Воспроизводство ядерного горючего.** В реакторе, работающем на природном уране, часть вторичных нейтронов захватывается ядром урана-238, превращаясь в уран-239.

Изотоп урана-239 радиоактивен с периодом полураспада 23,5 мин. В результате $\beta$-распада он превращается в изотоп нептуния-239 $(^{239}_{93}\mathrm{Np})$

В свою очередь, претерпевая 8-распад, ядро нептуния превращается в ядро плутония-239 $(^{239}_{94}\mathrm{Pu})$.

Изотоп плутония-239 имеет период полураспада $T$ = 24 тыс. лет и по своей способности к делению не уступает урану-235. Он может быть использован в ядерных реакторах в качестве горючего. Таким образом, расходование урана-235

сопровождается образованием не менее ценного ядерного горючего плутония-239.

При делении одного ядра урана-235 в среднем освобождается 2,5 нейтрона. На поддержание цепной реакции расходуется один нейтрон; следовательно, 1,5 нейтрона идет на образование ядер плутония. Таким образом, при делении ядер урана-235 реактор одновременно воспроизводит ядерное горючее в количестве, превосходящем израсходованное.

**Защита от радиации.** При цепной ядерной реакции образуются радиоактивные ядра-осколки, которые являются источниками нейтронов $\beta$- и $\gamma$-излучения. Следовательно, урановый реактор является источником разнообразных излучений, главную опасность представляют нейтроны и $\gamma$-излучение, так как они обладают большой проникающей способностью. Защита обслуживающего персонала от облучения обеспечивается обычно слоем воды толщиной порядка 1 м, слоем бетона до 3 м и толстым слоем чугуна.

В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающиеся друг от друга энергиями нейтронов, вызывающих деление ядерного горючего (реактор на тепловых нейтронах, реактор на быстрых нейтронах), характером делящегося вещества (на природном уране, обогащенном уране, на чистом делящемся продукте), назначением (для научных исследований, производства плутония, выработки электроэнергии).

***Атомная бомба*** может рассматриваться как реактор, в котором протекает неуправляемый цепной процесс деления ($к > 1$). В качестве ядерного горючего в ней используется в основном уран-235 или плутоний-239. Цепной процесс, ведущий к взрыву, возможен только при определенных критических размерах или критической массе ядерного горючего. Критическая масса для урана-235 и плутония-239 близка к 10-20 кг.

До взрыва ядерный заряд разделен обычно на две части, масса каждой из них меньше критической, поэтому цепная ядерная реакция не происходит. Как только части ядерного заряда, представляющие собой полушария радиусом 4 — 6 см, соединяются вместе, их масса становится больше критической, мгновенно начинается неуправляемый цепной ядерный процесс, представляющий собой ядерный взрыв. Соединение ядерного горючего осуществляется с помощью обычного взрывчатого вещества (дымного пороха). Ядерный взрыв сопровождается испусканием $\gamma$-излучения и нейтронов, резким повышением температуры и давления. Основными поражающими факторами являются ударная волна, которая распространяется от центра взрыва во все стороны со сверхзвуковой скоростью, и обильное радиоактивное излучение, загрязняющее окружающую среду.

## 22.9. Получение радиоактивных изотопов и их применение

Получение радиоактивных **изотопов.** Исследования по искусственной радиоактивности, проведенные И. и Ф.Жолио-Кюри, Э. Ферми, открыли возможность создания искусственных радиоактивных элементов. Промышленное производство радиоактивных изотопов стало возможно после пуска первого советского атомного реактора в 1946 г.

Первым элементом, созданным искусственным путем, был технеций $^{99}_{43}Tc$. Он был получен в 1937 г. при бомбардировке молибдена дейтерием:

$$^{98}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{99}_{43}\mathrm{Tc} + {}^{1}_{0}n. \qquad (22.12)$$

Лишь в 1961 г. его следы были обнаружены в земных минералах. Получение технеция стало началом заполнения ранее пустующих клеток 43, 61,85,87 Периодической системы Менделеева. К настоящему времени с помощью ядерных реакций и искусственной радиоактивности получены изотопы с номерами от 93 до 105 (см. Периодическую систему элементов Менделеева).

Применение искусственных радиоактивных изотопов основано на большой проникающей и ионизирующей способности радиоактивного излучения, возникающего в результате радиоактивного распада.

Радиоактивные изотопы и ядерные излучения находят в последние годы все более широкое применение в научных исследованиях, промышленности, сельском хозяйстве и медицине.

Области использования изотопов и излучений многочисленны: определение качества отливок и сварных швов, расхода и скорости движения жидкостей, газов и сыпучих материалов, а также фиксирование уровней заполнения закрытых емкостей. С их помощью определяют места течи в подземных трубопроводах, качество смешивания различных материалов, толщину и надежность лаковых покрытий.

Изотопы служат для изучения миграций рыб и качества удобрений, развития живого организма и движения ила в устьях реки. Будучи включенными в металлические подшипники или поршневые кольца моторов, они позволяют определить динамику их износа.

На основе использования ядерных излучений построены приборы, автоматически измеряющие толщину и плотность различных сред, давление газов, вязкость жидкостей и целый ряд других параметров, необходимых для регулирования технологических процессов. Благодаря бесконтактности работы, точности и надежности измерений приборы с источниками излучений широко используются в качестве датчиков систем автоматического регулирования.

Ионизирующие излучения применяются для удаления электростатических зарядов, образующихся на рабочих органах машин, заготовках и готовой продукции в бумажной, текстильной, резиновой и других отраслях промышленности.

С помощью мощных источников излучения оказалось возможным осуществить в промышленном масштабе стерилизацию медикаментов, некоторых лекарств и медицинского оборудования.

Использование изотопов и излучений в медицине позволило сделать значительный шаг вперед в области диагностики и лечения злокачественных опухолей и некоторых других заболеваний.

Разработаны методы применения излучений для консервирования пищевых продуктов, ускорения химических реакций, получения новых химических соединений, изменения физико-механических свойств различных материалов и изделий из них.

***Метод меченых*** *АТОМОВ,* или радиоактивных индикаторов, заключается во введении радиоактивных изотопов в изучаемый объект, что дает возможность точно, быстро и надежно исследовать свойства вещества и ход разнообразных процессов. В настоящее время почти во всех областях знаний и отраслях промышленности применяются радиоактивные индикаторы, особенно широко —

в сельском хозяйстве, биологии и медицине, а также в металлургической, химической и нефтяной промышленности.

С тех пор как атомная промышленность стала выпускать в достаточных количествах самые разнообразные «меченые» химические соединения, исследователи самых различных специальностей получили чрезвычайно мощный инструмент, который позволил создать новые методы ведения экспериментальных работ.

Этот далеко не полный перечень областей применения радиоактивных изотопов и ядерных излучений показывает, насколько глубоко внедряется физика атома в технику, медицину и сельское хозяйство.

Развитие атомной энергетики. После пуска первой в мире атомной электростанции (АЭС) в г. Обнинске (1954 г.) был накоплен большой научно-технической и производственный опыт проектирования, сооружения и эксплуатации крупных АЭС различного типа. Сооружаемые АЭС на тепловых и быстрых нейтронах с разными замедлителями и теплоносителями, рассчитанные на различную мощность, показывают, что атомная энергетика стала самостоятельной отраслью электроэнергетического производства.

Высокое энергосодержание ядерного горючего и практически неограниченная автономность позволяют создавать атомные двигатели, которые с успехом используются в надводных и подводных кораблях. 17 августа 1977 г. атомный ледокол «Арктика» достиг Северного полюса, осуществив вековую мечту человечества. Атомные ледоколы «Ленин», «Арктика», «Сибирь» доказали возможность круглогодичной навигации в Арктике.

В настоящее время особое место уделяется созданию новых источников энергии. К ним относятся топливные кислородно-водородные элементы, термогенераторы, солнечные батареи, МГД-генераторы. Но все эти устройства пока сравнительно маломощны и дороги, поэтому они могут быть использованы лишь как вспомогательные источники энергии, например на космических кораблях. Решение энергетической проблемы в ближайшем будущем будет принадлежать термоядерным электростанциям, однако устойчивую управляемую реакцию синтеза не удалось получить до сих пор. Эту проблему решают крупнейшие ученые всего мира. Решение этой проблемы даст человечеству неисчерпаемый источник энергии.

Теоретически учеными предсказано создание еще одного источника энергии, основанного на аннигиляции — реакции соединения атомов вещества и антивещества. Если удастся построить аннигиляционный реактор, где будут взаимодействовать, например, водород и антиводород, то он будет вырабатывать колоссальный поток световой энергии. Эта энергия с помощью солнечных батарей может быть преобразована в электрическую энергию.

Существующие в настоящее время способы получения электроэнергии чрезвычайно сложны и имеют малый коэффициент полезного действия. Огромные резервы энергетики кроются в уменьшении больших потерь при преобразовании и передаче энергии. Использование плазмы для прямого преобразования теплоты в электричество, применение сверхпроводников резко снизят эти потери. Хотя подавляющую часть энергии дают еще тепловые и гидроэлектростанции, начинает играть все более ощутимую роль ядерная энергетика. Ядерная энергетика — яркий пример революционного переворота, вызванного достижениями науки, в частности физики атомного ядра и элементарных частиц.

В СИ экспозиционную дозу излучения выражают в *кулонах на килограмм* (Кл/кг). *Если суммарный заряд ионов одного знака, образованных излучением* в 1 кг *воздуха, равен* 1 Кл, *то доза излучения равна* 1 Кл/кг. Внесистемной единицей является рентген (Р): 1 Р = 2,58- $10^{-4}$ Кл/кг.

Воздействия на организм излучений различной природы при одной и той же дозе $D_Q$ неодинаковы. Поэтому для оценки опасности излучения вводят коэффициент $\kappa$ относительной биологической активности. Для рентгеновских лучей, $\gamma$-лучей и электронов $\kappa = 1$; для медленных нейтронов $\kappa$ — 5; для быстрых нейтронов и $\alpha$-частиц $\kappa$ = 10 и т. д. Практически важно знать ***биологическую дозу облучения*** $D_б$, которая определяется следующим образом:

$$D_б = kD_0.$$

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за год биологическую дозу около 2,5- $10^{-5}$ Кл/кг. Международная комиссия по радиационной защите установила для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую за год дозу $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг. Биологическая доза в 0,15 Кл/кг, полученная за короткое время, является смертельной.

## 22.11. Элементарные частицы

**Частицы.** По смыслу термин «элементарная» частица означает «простейшая», «далее неделимая» частица. Однако частицы, называемые элементарными, не вполне отвечают этому определению. В настоящее время дать строгое определение элементарной частице оказывается невозможным. Это понятие является весьма сложным, и ряд экспериментальных фактов указывает на существование структуры элементарных частиц (например, нуклонов).

Исторически первой экспериментально обнаруженной элементарной частицей является электрон. Дж. Дж.Томсон при исследовании свойств катодных лучей установил, что они представляют собой поток отрицательно заряженных частиц — электронов $^{0}_{-1}e$. Датой открытия первой элементарной частицы считается 29 апреля 1897 г.

В 1900 г. Планком было показано, что свет представляет собой поток частиц, названных ***фотонами*** $\gamma$. Фотон не обладает электрическим зарядом, и его масса покоя равна нулю, т.е. фотон может существовать только в процессе движения со скоростью света.

В результате исследований Резерфорда по рассеянию а-частиц при прохождении через вещество в 1911 г. был открыт ***протон*** — ядро атома водорода. Протон обладает положительным электрическим зарядом, равным по модулю заряду электрона, его масса в 1 836 раз больше массы электрона.

В 1928 г. П.Дирак предсказал, а К.Андерсон обнаружил в составе космических лучей частицы, получившие название ***позитроны*** $^{0}_{+1}e$. Масса покоя позитрона совпадает с массой покоя электрона, а заряд — с зарядом протона. Дж. Чэдвиком в 1932 г. был открыт *нейтрон,* его масса близка к массе протона: $m_n = 1\,838 m_e$. Электрический заряд нейтрона равен нулю.

В 1931 - 1935 гг. П.Паули, объясняя закономерности $\beta$-распада, предположил существование еще одной нейтральной элементарной частицы с массой покоя, рав-

ной нулю, — ***нейтрино*** $\nu$. Экспериментально эта частица была обнаружена лишь в 1956 г. К. Коуэном в ядерном реакторе.

К. Андерсон и С. Ниддермейер открыли ***мюоны,*** С. Пауэлл — $\pi$***-мезоны*** С 1950 г. число вновь открываемых элементарных частиц стало стремительно возрастать. Были открыты *К-мезоны,* их массы находятся в пределах (966 - 974) $m_e$. /Г-мезоны могут иметь положительный, отрицательный и равный нулю заряды. Следующей большой группой являются *гипероны* с массами (2 180-3 278) $m_e$. В последние годы обнаружены частицы с очень малыми временами жизни ***—резонансы,*** их не наблюдают непосредственно, но об их существовании судят по анализу поведения продуктов их распада.

К настоящему времени известно несколько сотен элементарных частиц. Большинство из них нестабильны и постепенно превращаются в более легкие элементарные частицы.

Античастицы. После открытия первой античастицы — позитрона — возник вопрос о существовании античастиц и у других частиц. Первые антипротоны были получены экспериментально в 1955 г. при бомбардировке медной мишени протонами, энергия которых порядка 6 ГэВ. В 1956 г. был открыт антинейтрон. В настоящее время установлено, что

каждой элементарной частице соответствует своя античастица **с** точно такой же массой, но **с** зарядом противоположного знака.

Так, электрону с отрицательным зарядом соответствует позитрон с положительным зарядом. Протону с положительным зарядом соответствует антипротон с отрицательным зарядом. Частица и античастица у таких незаряженных частиц, как фотон, по физическим свойствам неразличимы.

Взаимные превращения вещества и поля. При столкновении электрона с позитроном происходит их превращение в квант электромагнитного излучения с освобождением энергии:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma. \qquad (22.13)$$

Это явление получило название ***аннигиляции.*** Аннигилируют не только электроны и позитроны, но и любая частица при столкновении со своей античастицей.

Если существует процесс аннигиляции, т.е. превращение вещества в кванты электромагнитного поля, то должен существовать и обратный процесс — превращение квантов поля в вещество.

В 1932 г. И. и Ф. Жолио-Кюри обнаружили, что $\gamma$-квант с энергией, большей суммарной энергии покоя электрона и позитрона $E_\gamma > 2m_0c^2 = 1{,}02$ МэВ, при прохождении вблизи ядра атома может превратиться в пару электрон-позитрон:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+. \qquad (22.14)$$

Явления рождения элсктрон-позитронных пар и аннигиляция показывают, что

две формы материи (вещество и поле) могут взаимно превращаться.

Процесс аннигиляции сопровождается колоссальным выделением энергии. Так, если при ядерных реакциях выделение энергии на единицу массы в миллионы раз превосходит выделение энергии при обычных химических реакциях, то при аннигиляции выделение энергии в миллионы раз превышает энергию, выделяемую при ядерных реакциях. Так как при аннигиляции вся энергия взаимодействующих частиц полностью переходит в другие формы энергии, то аннигиляция есть максимально интенсивный из всех возможных источников энергии.

Элементарным частицам присущи все четыре вида взаимодействий: сильное (ядерное), слабое, электромагнитное и гравитационное.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Радиоактивность* — самопроизвольное превращение ядер неустойчивых изотопов в устойчивые, сопровождающееся испусканием частиц и излучением энергии (открыта в 1896 г. А. Беккерелем).

• *Закон радиоактивного распада*

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Для каждого радиоактивного элемента существует определенный интервал времени, в течение которого начальное количество атомов уменьшается в два раза. Этот интервал времени называется периодом полураспада. Период полураспада постоянен для данного изотопа.

• Согласно протон-нейтронной модели (предложена в 1932 г. Д. Д. Иваненко и В. Гейзенбергом независимо друг от друга), ядро состоит из *протонов* и *нейтронов,* получивших название *нуклонов.* Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом ядра:

$$A = N + Z.$$

Ядра, имеющие одно и то же число протонов, но различное число нейтронов, называют *изотопами.*

• Устойчивость большинства атомных ядер означает, что между нуклонами в ядрах действуют ядерные силы.

Мерой устойчивости ядра является *энергия связи,* необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны:

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta m c^2,$$

где $\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_я]$ — дефект массы (разность между суммой масс протонов и нейтронов, находящихся в свободном состоянии, и массой ядра, составленного из этих частиц).

• *Ядерные реакции* — искусственное превращение атомных ядер как при взаимодействии друг с другом, так и с ядерными частицами. При этом соблюдаются законы сохранения суммарного электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса, момента импульса.

Все ядерные реакции характеризуются энергией, выделяемой (поглощаемой) при их протекании.

• Предсказанное Резерфордом (1920 г.) существование в ядре нейтральной частицы (нейтрона) было подтверждено (1932 г.) при обстреле ядер бериллия альфа-частицами. Нейтрон оказался радиоактивным. Нейтроны, взаимодействуя с ядрами, вызывают ядерные реакции деления некоторых тяжелых элементов.

• Ядра урана, тория и других тяжелых элементов под действием тепловых нейтронов способны делиться. При этом на один акт деления выделяется энергия около 200 МэВ и испускаются два-три вторичных нейтрона, которые позволяют осуществлять *управляемую* и *неуправляемую цепную реакции деления.* Управляемая цепная реакция используется в реакторах, неуправляемая — в атомных бомбах.

• Радиоактивные изотопы, получаемые в реакторах и ускорителях, нашли широкое применение в науке, медицине, промышленности и сельском хозяйстве.

• В СССР (1954 г.) пущена первая в мире *атомная электростанция.* Высокое энергосодержание ядерного горючего и практически неограниченная автономность позволяют создавать атомные двигатели, которые применяют на кораблях и подводных лодках.

• Радиоактивные излучения представляют большую опасность для живых организмов. При работе с ними необходимо применять специальные методы защиты.

• *Элементарными частицами* называют такие частицы, которые нельзя считать соединением других, более «простых» частиц. Взаимодействуя с другими частицами, они должны вести себя как единое целое.

• Все элементарные частицы претерпевают взаимопревращения. Большинство частиц нестабильно. Исключение составляют фотон, электрон, нейтрино. Все частицы имеют античастицы, которые отличаются от частиц знаком электрического заряда, направлением спина.

• При столкновении частицы и античастицы они аннигилируют, т. е. превращаются в гамма-кванты. Возможен и обратный процесс. Пара частиц рождается фотоном, взаимодействующим с полем ядра. Это является доказательством взаимного превращения вещества и поля.

• Различают четыре вида взаимодействия элементарных частиц: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое, гравитационное. Каждому взаимодействию соответствует свое поле.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. В чем заключается явление радиоактивности? 2. Какова природа радиоактивного излучения? 3. Напишите закон радиоактивного распада. 4. Что называют периодом полураспада? 5. Каковы устройство и действие камеры Вильсона и счетчика Гейгера? 6. Расскажите о модели ядра по Иваненко-Гейзенбергу. 7. Что называют массовым числом? 8. Как определяют дефект массы и энергию связи ядра? 9. Что такое ядерная реакция? 10. Что понимают под искусственной радиоактивностью? 11. Какую ядерную реакцию называют цепной? 12. Дайте понятие критической массы. 13. Расскажите о получении и применении радиоактивных изотопов. 14. Расскажите о перспективах развития атомной энергетики. 15. Какое биологическое воздействие оказывают радиоактивные излучения на живой организм? 16. Какие частицы называют элементарными? 17. Расскажите о взаимном превращении вещества и поля.

## Примеры решения задач

• **Задача 1.** Вычислить дефект массы и энергию связи ядра $^{14}_{7}\mathrm{N}$. 1 а. е. м. = = 1,66 *10 кг.

**Дано:** $Z$= 7; $A$ = 14.

**Найти:** $\Delta m$, $E_{\text{св}}$.

**Решение.** Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}.$$

Эту формулу целесообразно преобразовать так, чтобы в нее входила масса $m_{\text{а}} =$ $= M_{\text{я}} + Zm_e$ нейтрального атома, дефект массы которого

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{а}},$$

где $m_{\text{H}}$ - масса нейтрального атома водорода, $m_e$ = 0,00055 а. е. м. — масса электрона.

**Вычисления:** используя табличные значения для изотопа азота $^{14}_{7}$N, находим

$$\Delta m = [7 \cdot 1{,}00781 + (14 - 7) \cdot 1{,}00867 - 14{,}00304] \text{ а.е.м.} = 0{,}11232 \text{ а.е.м.} = \\ = 0{,}186 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 = 0{,}186 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1{,}67 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 104{,}3 \text{ МэВ}.$$

**Ответ:** $\Delta m = 0{,}186 \cdot 10^{-27}$ кг; $E_{\text{св}} = 104{,}3$ МэВ.

● **Задача 2.** Выделяется или поглощается энергия при ядерной реакции $^{59}_{27}\text{Co} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$? Вычислить эту энергию.

**Дано:** $M_1(^{59}_{27}\text{Co}) = 58{,}95182$ а.е.м.; $M_2(^{60}_{27}\text{Co}) = 59{,}95250$ а.е.м.; $m_n = 1{,}00867$ а.е.м.; 1 а.е.м. $= 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг.

**Найти:** $\Delta E$.

**Решение.** Для вычисления энергии ядерной реакции $\Delta E = \Delta m c^2$ необходимо определить дефект массы $\Delta m$ реакции.

Дефект массы

$$\Delta m = (M_1 + m_n) - M_2.$$

Так как число электронов до и после реакции сохраняется, то вместо значений масс ядер воспользуемся значениями масс нейтральных атомов:

$$\Delta m = [(58{,}95182 + 1{,}00867) - 59{,}95250] \text{ а.е.м.} = 0{,}00799 \text{ а.е.м.} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-29} \text{ кг}.$$

Реакция идет с выделением энергии, так как $\Delta m > 0$.

**Вычисления:**

$$\Delta E = 1{,}3 \cdot 10^{-29} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \approx 1{,}2 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} \approx 7{,}4 \text{ МэВ}.$$

**Ответ:** $\Delta E = 7{,}4$ МэВ.

### ? *Задачи для самостоятельного решения*

**1.** Какая энергия выделяется при образовании 1 г гелия $^{4}_{2}$He из протонов и нейтронов?

**2.** Выделяется или поглощается энергия при реакции $^{2}_{1}\text{H} + {}^{3}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{1}_{0}n$? Какова эта энергия?

**3.** При термоядерном взаимодействии двух нейтронов возможны реакции двух типов: с образованием $^{3}_{2}$He и с образованием $^{3}_{1}$H. Определить тепловые эффекты этих реакций.

**4.** При облучении $\alpha$-частицей ядра атома $^{24}_{12}$Mg образуются новый элемент и нейтрон. Определить: 1) какой элемент получается в результате этой реакции; 2) выделяется или поглощается энергия при этой реакции?

**5.** При термоядерной реакции $^{2}_{1}\text{H} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{3}_{1}\text{H}$ выделяется энергия 6,25 МэВ. Определить массу покоя нейтрального атома $^{2}_{1}$H, считая, что $m(^{3}_{1}\text{H}) = 3{,}016049$ а.е.м.; $m_n = 1{,}00867$ а.е.м.

**6.** Вычислить дефект массы, энергию связи ядра атома $^{24}_{12}$Mg и его удельную энергию.

**7.** Период полураспада радия равен 1 600 лет. Чему равно среднее время жизни ядра радия?

**8.** При бомбардировке ядер бора $^{11}_{5}$B протонами получается бериллий $^{8}_{4}$Be. Какое ядро образуется еще при этой реакции?

**9.** Масса дейтрона равна 2,01356 а.е.м. Найти энергию связи.

**Ключевые слова**: *радиоактивный распад, нейтрон, атомное ядро, дефект массы, цепная ядерная реакция, ядерный реактор, радиация, элементарные частицы, античастицы, взаимодействия: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое, гравитационное.*

РАЗДЕЛ VII

# ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

***Астрономия*** — наука о Вселенной. Учение о той части Вселенной, которую охватывают современные астрономические наблюдения, называют космологией (от греч. «космос» — Вселенная, «логос» — учение).

***Астрофизика*** изучает физические свойства небесных тел и протекающие в них и космическом пространстве процессы.

Широкое использование в астрономии открытых в земных условиях физических законов и методов исследования началось со *спектрального анализа,* который оказался настолько эффективным, что стал одним из важнейших в астрономии. Спектральный анализ удаленных космических объектов дал возможность определить их плотность, температуру, химический состав, характер и скорости внутренних движений и даже присутствие в них электрических и магнитных полей.

Поразительным открытием астрономии явилось то, *что звезды состоят из таких же атомов, что и Земля.* Два химических элемента — гелий и технеций — были обнаружены на звездах раньше, чем на Земле. Современная астрофизика использует весь арсенал физических знаний, учитывает важную роль гравитационных, электромагнитных, слабых и сильных — ядерных взаимодействий, включая физическую теорию поведения вещества в экстремальных условиях.

**Историческая справка.** Важнейшим моментом в подготовке научной революции было переосмысление вопроса о месте Земли во Вселенной. Еще в Древней Греции Аристарх Самосский утверждал, что Земля обращается вокруг Солнца. Однако в течение многих столетий господствовала геоцентрическая система мира Аристотеля — Птоломея, в которой Земля рассматривалась как центр Вселенной. Сочинение Коперника «О вращении небесных сфер» **(1543)** включает шесть книг, в которых излагается новое учение о космосе, согласно которому Земля является одной из планет Солнечной системы. Большая часть его книг содержит таблицы и расчеты, относящиеся к той видимой части Вселенной, которую с древних времен наблюдал и исследовал человек. Учение Коперника поставило перед учеными ряд проблем: проверить соответствие новой теории наблюдаемым фактам, найти причины объединения в единое целое планет и Солнца, Земли и Луны; условия возникновения движения вообще и движения планет в частности.



А. Эйнштейн

Возникновение современной космологии связано с созданием А. Эйнштейном в **1916** г. релятивистской теории тяготения и зарождением в **20**-е годы XX в. внегалактической астрономии.

Глава 23

# СТРОЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ВСЕЛЕННОЙ

## 23.1. Наша звездная система — Галактика

При наблюдении звездного неба даже невооруженным глазом можно увидеть группы звезд, которые получили название ***звездных скоплений.*** Звездные скопления наблюдаются двух типов: *рассеянные* и *шаровые.*

Типичным представителем рассеянного звездного скопления являются *Плеяды,* называемые в просторечии *Стожарами.* Размеры рассеянных звездных скоплений составляют 1... 10 —15 пк[1], Ближайшие к Земле рассеянные звездные скопления находятся на расстоянии нескольких тысяч световых лет[2], их можно наблюдать в плоскости Млечного Пути.

***Млечный Путь*** — светлая серебристая полоска, видная на безоблачном звездном небе. Более яркие и близкие звезды располагаются гуще по мере приближения к средней линии Млечного Пути, называемой галактическим экватором.

Плоскость галактического экватора — плоскость симметрии нашей звездной системы.

Исследования показали, что вся совокупность звезд Млечного Пути образует единую звездную систему, называемую ***Галактикой.*** Размеры Галактики грандиозны. В середине Галактики находится ***ядро*** — гигантское шаровое скопление звезд. Ядро Галактики видно с Земли в сторону созвездия Стрельца и представляет собой яркий участок Млечного Пути. От Земли до ядра Галактики 30 тыс. св. лет, а от одного до другого края Галактики — почти 100 тыс. св. лет. Все звезды вращаются вокруг центра Галактики. Период обращения Солнечной системы вокруг ядра Галактики составляет примерно 200 млн лет при скорости движения около 220 км/с. Всего в составе нашей Галактики более 100 млрд звезд, одной из которых является Солнце. На рис. 23.1 представлена схема нашей Галактики, местонахождение Солнечной системы указано стрелкой и крестиком.

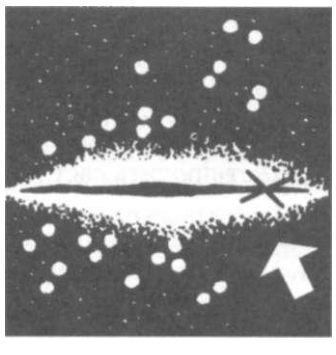


Рис. 23.1

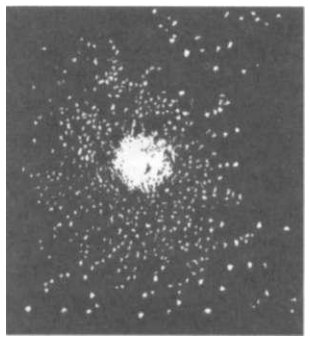


Рис. 23.2

[1] 1 пк ≈ 3,1 · 10[16] м.
[2] 1 св. год ≈ 9,5 · 10[15] м.

Одно из ближайших к Земле шаровых скоплений находится в созвездии Геркулеса (рис. 23.2). Шаровые скопления образуют в нашей Галактике сферическую систему с ярко выраженной концентрацией звезд к центру Галактики. Диаметры шаровых звездных скоплений измеряются десятками парсек, а количество входящих в них звезд насчитывает десятки и сотни тысяч.

## 23.2. Другие галактики. Бесконечность Вселенной

**Галактики.** Установлено, что кроме нашей Галактики существует множество подобных ей звездных систем, также называемых ***галактиками.***

Сравнивая нашу Галактику с другими галактиками, ученые определили, что наша Галактика, подобно галактикам в Андромеде и Треугольнике, имеет спиральное строение.

Форма галактик различна — существуют эллиптические (в частности, шаровые), чечевицеобразные, иглообразные, неправильные. Размер нашей Галактики меньше галактики в Андромеде, но больше Больших и Малых Магеллановых Облаков, которые являются спутниками нашей Галактики и расположены на расстоянии около 120 тыс. св. лет от нее. *Все галактики вращаются вокруг своих осей, как и наша Галактика.*

**Радиогалактики.*** Особый интерес представляют галактики, являющиеся мощными дискретными источниками радиоизлучения. Их принято называть радиогалактиками. По мнению советского астрофизика академика В. А. Амбарцумяна, радиогалактика возникает в результате процесса разделения первоначальной массы на две удаляющиеся друг от друга галактики. Стадия деления — переход материи из более плотного состояния в менее плотное — вызывается взрывными процессами и сопровождается интенсивным радиоизлучением. Полагают, что ***радиогалактика*** *— стадия, через которую проходит каждая галактика в ранний период своего развития.* Наиболее известна радиогалактика Лебедь А.

**Квазары.*** Это мощные внегалактические источники электромагнитного излучения. Излучение квазаров в $10^3$—$10^4$ раз превышает излучение всех звезд галактики. Одно из основных свойств квазаров — переменность их излучения в радио-, ИК- и оптическом диапазонах. Физическая природа активности квазаров еще до конца не раскрыта. Согласно существующим гипотезам, мощное излучение квазаров может быть обусловлено процессами столкновения звезд, вспышками сверхновых звезд, превращением в излучение энергии магнитных полей вращающегося массивного магнитоплазменного тела. Особый интерес квазары представляют как далекие объекты, участвующие в космологическом расширении Метагалактики. Изучение квазаров может пролить свет на ранние стадии эволюции Вселенной.

**Метагалактика.** В созвездии Девы располагается огромное скопление галактик, диаметр этого скопления около 100 млн св. лет, а масса равна примерно квадриллиону солнечных масс. Такое скопление галактик получило название ***Сверхгалактика.*** Все доступные области наблюдения Вселенной входят в состав системы, более грандиозной, чем Сверхагалактика, и называются Метагалактикой, границы которой пока остаются недоступными для наблюдения в самые мощные современные телескопы. Но и Метагалактика является лишь ничтожной частью бесконечной Вселенной.

Вселенная — это безграничный мир, бесконечный в пространстве и во времени, представляющий собой все разнообразие форм существования материи.

## 23.3. Понятие о космологии

Постулат космологии. ***Космология*** — раздел астрономии, изучающий свойства Вселенной как единого целого.

Выводы космологии основываются на законах физики и данных наблюдательной астрономии. Важнейшим постулатом космологии является положение, согласно которому *законы природы — законы физики, установленные на основе изучения весьма ограниченной части Вселенной, могут быть распространены на всю Вселенную.*

Космологические теории различаются в зависимости от того, какие физические законы и принципы положены в их основу. Построенные на этих теориях *модели должны допускать проверку для наблюдаемой области Вселенной,* выводы теории должны подтверждаться наблюдениями или не противоречить им.

Однородность и изотропность Вселенной. Космология начала развиваться на научной основе после открытия И. Ньютоном закона всемирного тяготения.

Согласно ньютоновской теории, пространство подчиняется евклидовой геометрии, где кратчайшими расстояниями между двумя точками являются отрезки прямых линий.

Пространство и время считаются абсолютными, т. е. их свойства не зависят от материи и ее движения.

Наряду с представлением о евклидовой геометрии трехмерного пространства складывается представление об однородности и изотропности бесконечной Вселенной. Действительно, если рассматривать сравнительно небольшие области Вселенной, то звезды распределены в них неравномерно. По мере развития астрофизических исследований было обнаружено, что звезды группируются в гигантские скопления — галактики, и что общая картина Вселенной представляется совокупностью отдельных скоплений галактик. Скопления галактик содержат тысячи галактик и их размеры составляют порядка нескольких мегапарсек (Мпк). Среднее расстояние между скоплениями галактик около 30 Мпк. Таким образом, в радиусе примерно 30 Мпк Вселенная является неоднородной, здесь имеются отдельные структурные элементы, распределенные в пространстве неравномерным образом. В радиусе около 1 ООО Мпк содержится примерно одинаковое количество скоплений галактик, т. е. Вселенная приблизительно однородна и свойства Вселенной одинаковы по всем направлениям, т.е. Вселенная является изотропной. Итак,

в больших масштабах Вселенную с большой степенью точности можно считать однородной и изотропной.

Из наблюдений постепенно складывалось представление о статичности Вселенной, т.е. неизменности ее строения со временем. В частности, на это указыва-

ло постоянство положения звезд и туманностей относительно друг друга. Видимые движения при этом сводились к периодическим движениям планет вокруг Солнца.

**Свойства пространства-времени неразрывно связаны с движущейся материей.**

## 23.4. Расширяющаяся Вселенная

**Закон Хаббла.** Современная космология базируется на работах А. Эйнштейна, А.А.Фридмана и Э.П.Хаббла и опирается на два главных наблюдаемых явления.

**1. Галактики и их скопления равномерно распределены во Вселенной.**
2. **Линии спектров всех галактик (за исключением некоторых галактик из числа самых близких) смещены в красную сторону (красное смещение).**

Первое явление подтверждает, что на больших масштабах Вселенная однородна и изотропна. Однородность Вселенной означает, что в произвольных одинаковых объемах содержится равное число галактик. Вселенная изотропна, т. е. в разных направлениях находится одинаковое число галактик.

Если второе явление рассматривать как эффект Доплера, то можно сделать вывод, что все галактики удаляются от нас со скоростью

$$v = c\frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \qquad (23.1)$$

Изучая характер движения галактик, американский астроном Э. П. Хаббл установил, что отношение $\Delta\lambda/\lambda$, определяемое по спектру Галактики, пропорционально расстоянию $R$ до Галактики, т.е. галактики удаляются («разбегаются») со скоростями $v$, пропорциональными расстояниям до них $R$:

$$v = HR, \qquad (23.2)$$

где $H$ — постоянная Хаббла, характеризующая скорость «разбегания» галактик. В настоящее время принимают $H$ = (50 — 100) км • $с^{-1} \cdot Мпс^{-1}$.

Соотношение (23.2) называют ***законом Хаббла.*** Его можно трактовать как подтверждение расширения наблюдаемой области Вселенной — Метагалактики. Значение постоянной Хаббла и закон Хаббла позволяют определить время $t$, прошедшее с начала расширения Вселенной при условии постоянной скорости расширения $t = R/v = 1/H = H^{-1}$; $t$ = (10 — 20) млрд лет. Это время примерно характеризует возраст Вселенной. Поскольку галактики имеют положительные скорости, пропорциональные расстояниям, можно сделать вывод, что в прошлом все галактики были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению, т. е. в прошлом Вселенная была не только более плотной, но и более горячей, чем в настоящее время.

Итак, в основе определенных моделей Вселенной должны лежать предположения об ее однородности и изотропности в больших масштабах и основные урав-

нения и положения теории тяготения Эйнштейна о свойствах пространства-времени и его неразрывной связи с движущейся материей.

**Модель расширяющейся Вселенной.** В 1922 — 1924 гг. на основе представлений об однородной, изотропной, бесконечной Вселенной и теории тяготения Эйнштейна советским математиком А. Фридманом получены теоретические результаты, свидетельствующие о том, что Вселенная, заполненная тяготеющим веществом, должна быть *нестационарной.* С течением времени она должна либо неограниченно расширяться, либо сжиматься. Но эти принципиально новые результаты получили признание лишь после открытия красного смещения, т. е. эффекта «разбегания» галактик.



А.Фридман

Из интерпретации закона Хаббла следует, что в некоторый момент времени в далеком прошлом все расстояния обращались в нуль. Отдельные галактики, звезды и другие небесные тела не могли существовать как изолированные объекты. Этот момент времени был моментом начала расширения Вселенной.

Таким образом, *в настоящее время Вселенная расширяется.* Этот процесс из-за сил гравитации протекает с замедлением. Расширение Вселенной приводит к снижению плотности и уменьшению замедления. Существуют два сценария *будущего Вселенной:* 1) плотность вещества во Вселенной достаточно мала и замедление мало — расширение будет протекать неограниченно долго; 2) плотность вещества во Вселенной достаточно велика, велико и замедление расширения — расширение прекратится и сменится сжатием. Критическая плотность вещества $\rho_{кр}$ отделяет один сценарий от другого (теоретические расчеты показывают, что $\rho_{кр} \approx 10^{-26}$ кг/м$^3$). Если наблюдения покажут, что плотность вещества в настоящий момент $\rho < \rho_{кр}$, то расширение должно смениться сжатием, при $\rho < \rho_{кр}$ расширение будет длиться бесконечно долго. На основе существующего уровня наших знаний о распределении вещества во Вселенной принято считать, что реальная средняя плотность чуть меньше критической плотности. Если это представление верно, то реализуется второй сценарий — расширение будет протекать неограниченно долго.

Средняя плотность вещества влияет на геометрические свойства Вселенной, т. е. степень искривления пространства зависит от массы тяготеющего вещества — чем больше масса, тем сильнее кривизна. При больших массах кривизна может стать настолько велика, что приведет к «свертыванию» пространства. Пространство становится конечным, но безграничным. Если масса мала, то «свертывания» пространства не происходит и пространство является бесконечным. Первый случай отвечает «замкнутому» миру, второй — «открытому».

## 23.5. Модель горячей Вселенной

Для определения того, как происходило расширение Вселенной с момента начала процесса, какие процессы при этом протекали, необходимо провести рас-

четы при разных предположениях о расширении, о состоянии и составе вещества во Вселенной и сравнить результаты расчетов с наблюдениями.

Согласно модели расширяющейся Вселенной на основе закона Хаббла можно примерно установить момент времени начала расширения Вселенной. Расчеты показывают, что это произошло *около 15 млрд лет назад.* К настоящему времени наибольшее распространение получила модель ***горячей Вселенной,*** которую предложил в конце 40-х годов XX в. американский физик Дж.Гамов. Согласно модели Гамова, современная наблюдаемая Вселенная представляет собой результат ***«Большого взрыва»,*** т.е. катастрофически быстрого разлета материи, находившейся до того в сверхплотном и сверхгорячем — *сингулярном (неописуемом)* состоянии. Один из возможных сценариев эволюции Вселенной — следующий. Плотность вещества спустя $10^{-43}$ с после начала расширения *(«Большого взрыва»)* примерно в $10^{108}$ раз превосходила ядерную плотность. Температура вещества превышала десятки тысяч миллиардов градусов.

В космологии выделяют несколько периодов в эволюции Вселенной после «Большого взрыва». Каждый период характеризуется определенными процессами. В первоначальный период, который длился всего нескольких секунд, вещество Вселенной находилось в состоянии фотонной плазмы: на один миллиард фотонов (квантов света) приходилась только одна частица. Фотоны рождаются и уничтожаются при взаимодействии с элементарными частицами. *Фотон рождается при взаимодействии частицы и античастицы.* Частицы при этом исчезают *(аннигилируют),* и появляются фотоны. Тяжелые частицы рождаются из особого состояния материи — *физического вакуума,* в котором они имеются в скрытом, «виртуальном», состоянии. Тяжелые частицы и античастицы аннигилируют, и в результате появляются протоны, нейтроны, электроны, нейтрино и античастицы.

В первые пять минут после «Большого взрыва» практически произошли все события, определившие те свойства Вселенной, которые она имеет в настоящее время. Решающую роль здесь играли протоны и нейтроны, которые, взаимодействуя с электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино, превращаются друг в друга. Температура в результате расширения уменьшается. При этом *протонов становилось больше, так как их масса меньше массы нейтронов и их образование энергетически выгоднее.* Процесс создания избытка протонов прекращается из-за понижения температуры до того, как все нейтроны будут превращены в протоны. Заметим, что в первые мгновения после «Большого взрыва» фотонов было много (на один протон приходился 1 млрд фотонов). С течением времени это соотношение остается постоянным, но энергия фотонов становится меньше, потому что в результате эффекта Доплера частота фотонов, а значит, и их энергия уменьшаются. При падении температуры до 1 млрд К начинают образовываться простейшие ядра. Итак, *нейтроны захватываются протонами, и происходит образование дейтерия.* Реакция продолжается, и образуются ядра гелия, которые состоят из двух протонов и двух нейтронов. Одновременно образуется немного лития и изотопа гелия-3 ($^{3}_{2}\mathrm{He}$). К концу пятой минуты после «Большого взрыва» расширяющееся вещество состоит из ядер водорода — 70 % и ядер гелия — 30 %.

Температура становится ниже 1 млрд К, Вселенная перестает быть горячей, наступает следующий этап расширения Вселенной, который длится порядка 300 тыс. лет. Вещество Вселенной в это время представляет собой *плазму,* кото-

рая является непрозрачной для фотонов. При температуре порядка 4 000 К начинается образование нейтральных атомов. Появляются нейтральный водород и гелий. Вещество становится прозрачным для фотонов. Нейтральное вещество начинает собираться в некоторые образования, «комки». С этого момента начинает происходить образование галактик.

Дополнительным доказательством верности гипотезы «Большого взрыва» явилось открытие в 1965 г. А. Пензиасом и Р. Вильсоном ***реликтового излучения.*** Возможность существования этого излучения была предсказана американским физиком-теоретиком С. Гамовым еще в 1949 г. Исследования показали, что интенсивность этого излучения почти строго постоянна для всех направлений, а распределение по длинам волн соответствует излучению абсолютно черного тела, имеющего температуру 3 К. Это излучение не связано, вероятно, ни с какими объектами Вселенной, существующими в настоящее время, а отражает распределение материи во Вселенной на начальной стадии ее развития. Если предположить, что «начальный взрыв» произошел порядка 15 — 20 млрд лет назад и в результате расширения пространства Вселенной ее температура начала резко падать, то расчеты приводят как раз к значению 3 К.

Такова гипотеза *горячей Вселенной.*

## 23.6. Строение и происхождение галактик

Галактики представляют собой гигантские скопления звезд, связанные между собой силами гравитации. Галактики содержат от нескольких миллионов до многих сотен миллиардов звезд. Наряду со звездами в состав галактик входят ***межзвездный газ, межзвездная пыль, космические лучи.***

Первую удачную классификацию галактик по их внешнему виду предпринял Э. Хаббл в 1925 г. Он предложил относить галактики к одному из следующих трех типов: 1) эллиптические; 2) спиральные; 3) неправильные. *Эллиптические галактики,* имеющие вид правильных кругов или эллипсов, характеризуются высокой плотностью звезд и яркостью в центре с плавным уменьшением периферии. В большинстве эллиптических галактик очень мало газа — менее 0,1 % по массе.

Для *спиральных галактик* характерно наличие двух (иногда более) спиральных рукавов, образующих плоскую систему — «диск». Кроме диска в спиральных галактиках имеется сферическая составляющая, которая образуется объектами, располагающимися примерно сферически-симметрично вокруг центра галактики. В спиральных рукавах сосредоточено много молодых ярких звезд и светящихся газовых облаков. Количество газа в спиральных галактиках составляет 1 —15 % от общей массы.

К *неправильным галактикам* отнесены объекты, у которых отсутствует четко выраженное ядро и не обнаружена вращательная симметрия. Количество газа в неправильных галактиках может доходить до 50 % от общей массы. Предполагается, что эллиптические галактики составляют 17 %, спиральные — 80 и неправильные — 3 % от общего числа галактик.

В конце XX — начале XXI в. обнаружены звездные системы, которые не укладываются в данную классификацию. Эти галактики получили название *«пекулярные».* К их числу относятся, например, «компактные» галактики, обладаю-

щие высокой поверхностной яркостью, а также карликовые звездные системы с низкой светимостью.

Вопрос об образовании галактик является одним из сложнейших вопросов современной астрофизики. К настоящему времени имеются различные модели образования галактик. Так, российским физиком Я. Б. Зельдовичем была предложена *конденсационная модель образования галактик* в результате сжатия (конденсации) газовых сгустков. Согласно этой теории, в однородной и изотропной расширяющейся Вселенной возникают бесконечно малые неоднородности плотности вещества, которые в процессе расширения Вселенной усиливаются. Нарастание неоднородностей приводит к образованию мощных ударных волн, сжимающих газ в плотные газовые облака массой $10^{13}$—$10^{15}$ масс Солнца. Позже эти облака в результате охлаждения и гравитационной неустойчивости распадаются на отдельные сгустки. Продолжая сжиматься и теряя при этом энергию на излучение, уплотнившееся вещество в результате своей эволюции превращается в современные галактики.

Эволюция галактики зависит от массы и начальной скорости вращения газового облака. Если начальное вращение отсутствует, то гравитация равномерно сжимает облако — образуется *эллиптическая галактика.*

Во вращающемся облаке газ концентрируется в галактической плоскости, перпендикулярной оси вращения, — образуется *спиральная галактика,* например наша Галактика, или Млечный Путь.

Чем больше начальная масса газового облака, тем сильнее гравитационное сжатие и тем быстрее образуется галактика.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• *Астрономия* — наука, изучающая движение, строение и развитие небесных тел и их систем. Накопленные ею знания применяются для практических нужд человечества.

• *Наша Галактика — Млечный Путь* — это видимая на безоблачном звездном небе серебристая полоска, которая является пространственной звездной системой. Большинство ее звезд различимо в полосе Млечного Пути. В Галактику входят звезды всех созвездий.

• Мир галактик так же разнообразен, как и мир звезд. Особый интерес представляют радиогалактики — стадии, через которые проходит каждая галактика в ранний период своего развития, квазары — звездоподобные источники радиоизлучения.

• *Вселенная* — безграничный мир, бесконечный в пространстве и во времени, представляющий собой все разнообразие форм существования материи.

• Согласно современным представлениям: Вселенная однородна и изотропна; галактики «разбегаются» со скоростями, пропорциональными расстояниям до них:

$$v = HR.$$

• Реальная Вселенная достаточно хорошо описывается моделью расширяющейся Вселенной.

• Согласно модели горячей Вселенной, расширение Вселенной возникло в результате «Большого взрыва». Доказательством гипотезы горячей Вселенной явилось открытие реликтового излучения (1965 г.).

## Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Что изучает астрономия? **2.** Что называют галактическим экватором? **3.** Какое строение имеет наша Галактика? **4.** Как возникают радиогалактики? **5.** Как вы понимаете бес-

конечность Вселенной? 6. Что изучает космология? 7. Сформулируйте закон Хаббла. 8. Расскажите о модели расширяющейся Вселенной 9. Изложите гипотезу горячей Вселенной. **10.** Что такое реликтовое излучение?



**Ключевые слова:** *астрономия, галактика, Млечный Путь, Вселенная.*

**Глава 24**

# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД. ГИПОТЕЗА ПРОИСХОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

## 24.1. Термоядерный синтез

Термоядерный синтез. Ранее (см. 22.7) отмечалось, что ядерная энергия может высвобождаться не только при делении тяжелых ядер, но также при слиянии (синтезе) легких ядер в более тяжелые. Эти реакции протекают при температуре $10^7$ К и выше. При нормальных условиях слияние ядер невозможно, потому что положительно заряженные ядра испытывают огромные силы кулоновского отталкивания. При синтезе легких ядер задача сводится к тому, чтобы сблизить ядра на такие расстояния, при которых действие ядерных сил притяжения превысит кулоновские силы отталкивания. Для того чтобы произошло слияние атомных ядер, необходимо увеличить их подвижность, т.е. увеличить кинетическую энергию. Это достигается повышением температуры.

**Баланс энергии.** В результате слияния легких ядер высвобождается энергия, так как образовавшееся новое ядро имеет большую удельную энергию связи. Если при делении тяжелого ядра урана выделяется энергия порядка 1 МэВ на нуклон, то при синтезе дейтерия и трития образуется ядро гелия:

$$ {}^3_1\mathrm{H} + {}^2_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0 n. \qquad (24.1) $$

Ядро дейтерия имеет энергию связи 2,2 МэВ, трития — 8,5 МэВ, гелия — 28,3 МэВ; следовательно, можно вычислить энергию, выделяющуюся в процессе реакции: 28,3 МэВ — (2,2 + 8,5) МэВ = 17,6 МэВ, что в пересчете на один нуклон составляет $17{,}6/5 \approx 3{,}52$ МэВ, т. е. почти в четыре раза превосходит эффект реакции деления. Поскольку реакция слияния легких атомных ядер в более тяжелые происходит при очень высоких температурах ($10^7$ К и выше), такие реакции получили название ***термоядерные.***

Реакция (24.1) слияния ядер дейтерия и трития составляет основу водородной бомбы. Запалом в такой бомбе служит атомная бомба, при взрыве которой возникает температура порядка $10^7$ К, достаточная для протекания реакции синтеза (которая в данном случае является неуправляемой).

## 24.2.* Проблемы термоядерной энергетики

Неуправляемые термоядерные реакции происходят при взрывах водородных бомб, в результате чего высвобождается огромное количество ядерной энергии.

Овладеть управляемой термоядерной реакцией — это значит обладать практически неисчерпаемым дешевым источником энергии. Решение проблемы управляемой термоядерной реакции избавит человечество от забот об источниках энергии; в этом случае ядерным горючим станет вода морей и океанов. Но эта энергия может быть получена лишь после того, как будут решены проблемы нагревания до огромных температур большого количества легких ядер и удержания их в таком состоянии в течение заметных промежутков времени.

Работы по овладению управляемыми термоядерными реакциями ведутся практически во всех развитых странах мира, в частности разрабатываются методы создания сверхвысоких температур в водородной плазме. В последнее время с помощью мощного лазерного излучения, сфокусированного в малом объеме среды, удалось получить сверхвысокие температуры ($\approx 10^8$ К) и вызвать термоядерную реакцию.

Главная трудность в получении управляемой реакции состоит в том, чтобы обеспечить полную изоляцию плазмы от стенок установки, в которой она находится. При соприкосновении со стенками установки плазма мгновенно охлаждается и перестает существовать. Следовательно, плазма должна быть окружена вакуумом. Для того чтобы удержать ее от соприкосновения со стенками установки, применяется *магнитная теплоизоляция*. Наиболее перспективной термоядерной установкой является «Токамак» (торонд, камера, магнит). Принцип действия этой установки рассмотрен в гл. 11.

В заключение отметим, что температура, плотность плазмы и время ее удержания, достигнутые к настоящему времени, пока недостаточно велики для осуществления синтеза большого количества легких ядер. В настоящее время на установке «Токамак-**15**» в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова получена плазма с температурой около **10**$^8$ К и временем ее удержания около **80** мс.

## 24.3. Энергия Солнца и звезд

**Возникновение звезд.** Физическая природа звезд изучена еще недостаточно полно, чтобы можно было с уверенностью говорить о том, как возникают звезды, как возникло Солнце и какова судьба звезд. По современным представлениям звезды зарождаются группами или скоплениями в основном из водородно-гелиевых туманностей, т.е. в некоторых местах пространства межзвездная пыль и газ сгущаются в тела больших размеров, что в результате последующего сжатия таких тел приводит к их разогреванию и свечению, т.е. к превращению в звезды. Когда температура внутри тела поднимается достаточно высоко, там происходят процессы превращения водорода в более тяжелые химические элементы, что сопровождается выделением значительного количества энергии. В таком состоянии звезды могут находиться по меньшей мере миллиарды лет (например, Солнце).

**Ядра звезд как естественный термоядерный реактор.** Реакции синтеза протекают в недрах звезд, в том числе и Солнца. Солнце и солнцеподобные звезды состоят в основном из водорода — до **80** % и гелия — до **20** %. Температура в их недрах достигает **10**$^7$—**10**$^8$ К. При такой температуре все атомы полностью ионизированы и представляют собой плазму. Таким образом, Солнце и звезды можно сравнить с гигантскими самоподдерживающимися термоядерными реакторами.

Наиболее вероятной термоядерной реакцией, происходящей в недрах Солнца при $T \sim (1 — 2) \cdot 10^7$ К, является следующая:

$$
\begin{aligned}
&{}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \to {}^2_1\mathrm{H} + {}^0_1e + \nu_e,\\
&{}^2_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \to {}^3_2\mathrm{He} + \gamma,\\
&{}^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \to {}^4_2\mathrm{He} + 2{}^1_1\mathrm{H}.
\end{aligned}
\qquad (24.2)
$$

Эту цепочку термоядерных реакций, в результате которой четыре ядра водорода ${}^1_1\mathrm{H}$ превращаются в одно ядро гелия ${}^4_2\mathrm{He}$, называют ***протон-протонным циклом.*** Средняя продолжительность последней реакции, завершающей цикл, около 1 млн лет, а энергетический эффект — около 13 МэВ. В целом энергетический эффект протон-протонного цикла составляет 27 МэВ.

Для звезд, более ярких, чем Солнце, характерен ***углеродный цикл.***

Итогом углеродного цикла, как и протон-протонного, является превращение четырех ядер водорода в одно ядро гелия. Количество ядер углерода, участвующих в реакции, остается неизменным; они выполняют роль катализатора. В этом цикле в промежуточных реакциях из углерода образуется азот. Азот является побочным продуктом реакции превращения водорода в гелий.

После выгорания водорода в центре звезды при температуре $(1 — 2) \cdot 10^8$ К начинается горение гелия:

$$
\begin{aligned}
&3\,{}^4_2\mathrm{He} \to {}^{12}_6\mathrm{C} + \gamma,\\
&{}^{12}_6\mathrm{C} + {}^4_2\mathrm{He} \to {}^{16}_8\mathrm{O} + \gamma \text{ и т.д.}
\end{aligned}
\qquad (24.3)
$$

С выделением продуктов горения — углерода и кислорода, в результате у звезды образуется ***углеродно-кислородное ядро.***

При температуре $T = 5 \cdot 10^8 \div 10^9$ К загораются углерод и кислород, образующиеся при горении протоны и нейтроны участвуют в различных реакциях с ядрами, порождая элементы с порядковым номером в пределах $16 \leqslant Z \leqslant 28$.

Основной продукт горения углерода и кислорода — ***к р е м н и й.***

При температуре $T > 2 \cdot 10^9$ К в тепловом излучении появляется много квантов с энергией, достаточной для отщепления $\alpha$-частиц от кремния, серы, магния и др. Альфа-частицы могут присоединяться к более тяжелым ядрам, образуя элементы вплоть до железа, никеля, цинка.

Происхождение элементов с $Z > 30$ связывают с процессами захвата нейтронов. К ним относятся элементы вплоть до висмута.

Образование элементов тяжелее гелия происходит уже в современную эпоху. Синтез элементов тяжелее железа проявляется во взрывных процессах (во вспышках сверхновых звезд). При этом газ выбрасывается в окружающее пространство и участвует в формировании звезд последующих поколений и других небесных тел.

Если на ранней стадии эволюции вещество галактики состояло исключительно из водорода и гелия, то в дальнейшем межзвездная среда обогатилась тяжелыми элементами и они уже в готовом виде входят в состав вновь рождающихся звезд. Таким образом,

во Вселенной происходит процесс необратимости развития материального мира.

## 24.4. Эволюция звезд

Излучение звезды осуществляется за счет термоядерных реакций, протекающих в центре звезды. Расчеты моделей звезд показывают, что главной термоядерной реакцией является превращение четырех ядер водорода в ядра гелия (протон-протонный цикл, см. подразд. 24.3), при этом происходит выгорание водорода, светимость и радиус звезды увеличиваются, а температура уменьшается. Температура в центре у звезд больших масс выше, поэтому такие звезды эволюционируют быстрее и превращаются в ***красных гигантов.***

После выгорания водорода происходит сжатие ядра, состоящего уже из гелия, при этом температура повышается до 100 млн К и более и начинает протекать новая термоядерная реакция — образование атомов углерода из трех атомов гелия. Эта реакция сопровождается потерей массы и выделением энергии.

Окончательная судьба звезды зависит от ее массы. Если масса звезды меньше, чем 1,2 массы Солнца, то она завершает свою эволюцию как ***белый карлик.*** Если масса звезды заключена между 1,2 и 3 массами Солнца, то она превращается в ***нейтронную звезду.*** На конечной стадии ее развития происходит мощный сброс оболочки, т. е. ***вспышка сверхновой звезды.*** Если масса звезды превышает три солнечные массы, то в результате процесса гравитационного сжатия радиус звезды становится столь малым, что гравитационное поле звезды начинает втягивать в себя всю окружающую материю. Эти звезды все поглощают, но ничего не испускают, даже излучение. Такие звезды называют ***черными дырами.*** Расчеты показывают, что если бы Земля превратилась в черную дыру, то ее радиус был бы 0,9 см. Так как черные дыры не излучают и их размеры очень малы, то обнаружить их можно лишь косвенным путем, а именно — по регистрации коротковолнового, ультрафиолетового или рентгеновского излучения, сопровождающего втягивание межзвездной материи в черную дыру.

> Скорость эволюции пропорциональна скорости выделения энергии и обратно пропорциональна массе звезды.

Звезды-гиганты развиваются за несколько миллионов лет, звезды типа Солнца — за 8—11 млрд лет, белые карлики — за $10^{10}$—$10^{11}$ лет.

## 24.5. Происхождение Солнечной системы

Солнечная система. ***Солнечная система*** представляет собой группу небесных тел, объединенных в единую систему благодаря гравитационному взаимодействию, с центральным телом — Солнцем. Кроме Солнца в состав Солнечной системы входят восемь планет и их спутники, карликовые планеты и малые тела — астероиды, кометы, метеориты и др.

***Планеты*** (от греч. *planetos* — блуждающие) — небесные тела, обращающиеся вокруг звезды (Солнца). Они, в отличие от звезд, *не излучают света, а светят отраженным солнечным светом.* Форма планет близка к шарообразной. Планеты Солнечной системы подразделяют на две группы: земная группа (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Плутон, который раньше считался планетой, на XXVI Ассамблее Меж-

дународного астрономического союза (2006) был квалифицирован как карликовая планета.

Сравнивая между собой эти две группы планет, можно сказать, что планеты земной группы характеризуются меньшей массой, меньшими размерами, большой плотностью и сравнительно малой скоростью обращения вокруг Солнца. Ни одна из планет земной группы не имеет развитой системы спутников в отличие от планет-гигантов. *Спутником Земли является Луна;* Фобос и Деймос — спутники Марса. Земля — единственная планета земной группы, обладающая сильным собственным магнитным полем. Три планеты земной группы (Венера, Земля, Марс) обладают атмосферой. У Марса она сохранилась в очень разреженном состоянии, а у Меркурия полностью отсутствует. Только Земля обладает мощной гидросферой, которая сформировалась одновременно с планетой. Следует заметить, что *Венера имеет обратное вращение,* т. е. противоположное направлению вращения Солнца вокруг своей оси.

Из особенностей планет-гигантов следует отметить их относительно большие размеры, малую плотность, хорошо развитую систему спутников. Так, у Юпитера имеется 14 спутников, у Сатурна — 10. Плоские светящиеся кольца вокруг Сатурна состоят из множества мелких частиц. Особенностью Урана является характер его вращения: он движется как бы «лежа на боку», плоскость его экватора перпендикулярна плоскости орбиты.

**Гипотеза происхождения Солнечной системы.** Наиболее проработанный в настоящее время сценарий рождения Солнечной системы, которого придерживается большинство астрономов и астрофизиков, следующий: существовало протопланетное облако межзвездного вещества массой $10^5$ солнечных масс, плотность которого порядка $10^6$ молекул в 1 $см^3$, температура 20 — 100 К. Во время взрыва сверхновой звезды под действием ударной волны межзвездное вещество начало сжиматься, температура стала увеличиваться и за несколько миллионов лет достигла $(1{,}0—1{,}5) \cdot 10^7$ К. За счет сжатия протопланетное вещество превратилось в линзовидный диск с новой звездой (Солнце), в которой шли термоядерные реакции (примерно 4,7 млрд лет назад). В результате медленного вращения линза превратилась в тонкий диск, который распался на гигантские кольца, окружающие Солнце. Существует много моделей, рассматривающих превращение колец диска из межзвездного вещества в планеты. В настоящее время предпочтительнее следующая: эти кольца уплотнялись, частицы вещества колец слипались, образуя зародыши планет — планетоземали. Вследствие притяжения колец друг к другу зародыши планет росли. Наибольшею размера достигли девять зародышей, которые впоследствии превратились в планеты. Ближе к Солнцу температура пылинок была выше, и здесь образовались сравнительно небольшие планеты земной группы, состоящие из тугоплавких каменистых веществ, металлов и их оксидов и содержащие очень мало легких газов и воды.

Дальше от Солнца, где было намного холоднее, на пылинках намерзал лед, а также углекислый газ, метан, аммиак. Там образовались планеты-гиганты, в составе которых значительно больше воды, аммиака и метана, чем металлов и каменистых веществ.

Гипотеза образования планет путем объединения твердых тел и частиц выдвинута выдающимся советским ученым академиком О. Ю. Шмидтом. Она заменила представления о конденсации планет из газовых сгустков и объяснила разделение планет по физической природе на две группы. Впоследствии эта гипоте-

за была подтверждена физико-химическими исследованиями состава и структуры метеоритов.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

• Большой энергетический эффект можно получить при синтезе легких ядер. Реакции синтеза ядер требуют нагревания вещества до очень высоких температур, поэтому эти реакции называют термоядерные. Управлять термоядерными реакциями — значит обладать самым дешевым источником энергии.

• *Термоядерные реакции* происходят в недрах Солнца и звезд и являются источником энергии, компенсирующим их излучение. Солнце и звезды представляют собой как бы гигантские самоподдерживающиеся термоядерные реакторы, в которых протекают реакции, результатом которых является образование не только легких, но и тяжелых элементов.

• Эволюция звезд зависит от их массы. Скорость эволюции пропорциональна скорости выделения энергии и обратно пропорциональна массе звезды. Звезды-гиганты развиваются за несколько миллионов лет, звезды типа Солнца — за 8—**11** млрд лет, белые карлики — за $10^8$—$10^{11}$ лет.

• *Солнечная система* — группа небесных тел, объединенных в единую систему благодаря гравитационному взаимодействию.

• В состав Солнечной системы входят восемь планет, которые подразделяются на две группы: **1)** земная (Меркурий, Венера, Земля, Марс); 2) планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун).

• Гипотеза образования планет путем объединения твердых тел и частиц (гипотеза О. Ю. Шмидта) подтверждается спектральными исследованиями состава и структуры метеоритов.

## Вопросы для самоконтроля и повторения

**1.** Какие реакции называют термоядерными? **2.** Расскажите о балансе энергии при синтезе дейтерия и трития. **3.** В чем заключается проблема термоядерной энергетики? **4.** Какие термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и звезд? **5.** Как происходит развитие звезд? 6. Назовите планеты, входящие в состав Солнечной системы. 7. Изложите гипотезу образования планет Солнечной системы.

**Ключевые слова:** ***термоядерная реакция, Солнечная система, красный гигант, черная дыра.***

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Современная научная картина мира

Познание мира человеком — диалектически сложный и противоречивый процесс, творческий по своему характеру.

Как отмечалось во введении, до 1873 г. господствовала механическая картина мира, которая сменилась релятивистской физической картиной мира.

Первым шагом на пути построения новой научной физической картины мира явилась гипотеза М. Планка (1900): атомы излучают свет дискретными порциями — квантами. А. Эйнштейном было высказано предположение, что свет не только излучается, но и распространяется, а также поглощается веществом дискретными порциями — квантами.

Следующим шагом явилась модель атома водорода, предложенная Н. Бором (1913). Эта модель построена на основе соединения классических представлений с квантовыми постулатами.

В течение ряда десятилетий физики считали своей главной задачей проникновение в структуру материи. Исследование электронной оболочки атома, а на этой основе и свойств твердого тела стало эпохальным для физики XX в. Проникновение в структуру атомного ядра, а затем и в структуру ряда частиц явилось продолжением научного штурма общих принципов структурной организации материи. Итак, нам предстоит обобщить имеющиеся сведения с точки зрения современной физики на структурные формы материи, закономерности их взаимодействия, основываясь на неисчерпаемости материи и возможности ее познания, т. е. проследить за диалектическим развитием материального мира. С точки зрения современной физики обобщать эти сведения начнем с элементарных частиц, ибо на ранней стадии развития Вселенной именно они образовались первыми. В настоящее время известно несколько сотен элементарных частиц, причем стабильными являются лишь фотоны, нейтрино, электроны и их античастицы и в определенной степени протоны. Все остальные частицы не являются стабильными. Многочисленными исследованиями установлено, что истинно элементарными частицами, не проявляющими внутренней структуры, в настоящее время можно считать лишь фотоны и лептоны.

Рассуждения об элементарных частицах приводят нас в итоге к строению атомов и молекул, поскольку именно из них состоит весь окружающий нас мир и мы сами. Атом обусловливает индивидуальность любого химического элемента. В ядро атома входят протоны и нейтроны. Электронные оболочки атомов связывают их в молекулу. Ядра атомов тяжелых элементов могут самопроизвольно превращаться в ядра более легких атомов. Этот процесс может идти и в обратном направлении — из ядер атомов легких элементов могут образовываться ядра атомов более тяжелых элементов, что происходит при термоядерных реакциях, которые протекают, например, в недрах звезд.

Первоначальная задача физики элементарных частиц заключалась в том, чтобы найти элементарные структурные единицы материи.

Развитие представлений об эволюции Вселенной из сверхплотного состояния подсказывало другую постановку вопроса: что если фундаментальные структурные единицы материи возникли в процессе расширения Вселенной, в сложной динамике так называемого «Большого взрыва»? Богатое разнообразие элементарных частиц, возникающих в ходе взаимодействий при высоких энергиях, практически не существует в естественных взаимодействиях при малых энергиях. Однако такое разнообразие могло иметь место в начале «Большого взрыва» и, возможно, при состоянии (названном *сингулярностью)* сверхплотного сжатия и гигантских температур Вселенной. И вероятно, от него берут свое начало стабильные элементарные частицы, составляющие строительный материал Вселенной в ее современном состоянии.

Особенностью элементарных частиц является их взаимопревращение, чему соответствуют четыре типа физических взаимодействий: слабое, сильное (ядерное), электромагнитное, гравитационное. Каждый тип взаимодействий характеризуется своим полем, и квантами этого поля, т.е. взаимодействия, являются обменными. Иначе говоря, частицы в процессе взаимодействия обмениваются между собой квантами соответствующих полей. Это качество легло в основу возможности объяснения различных видов взаимодействия элементарных частиц как различных проявлений единого взаимодействия. В настоящее время создана теория слабых и электромагнитных взаимодействий. Предпринимается попытка создать единую теорию трех видов взаимодействий в микромире: слабое, сильное, электромагнитное, — так называемое «великое объединение». Более смелые мечты ученых связаны с поисками возможного суперобъединения, которое включало бы и гравитационное.

Таким образом, изучение свойств микрочастиц и их взаимодействий помогает понять эволюцию Вселенной, начиная с момента ее расширения до настоящего времени.

С точки зрения современной физики, все многообразие видов материи может быть сведено к существованию двух основных ее видов: вещества и поля.

Физические поля обладают свойством связывать элементарные частицы в атомы, молекулы, макротела, планеты и т. д.

Всякое изменение, происходящее в окружающем нас мире, представляет движение материи. Источником движения являются четыре типа физических взаимодействий.

Итак,

**в мире нет ничего иного, кроме движущейся материи. Познание мира есть процесс бесконечный. Элементарное и сложное в строении вещества — понятия относительные, и предназначение Человека состоит в том, чтобы исследовать и понять свою Вселенную.**

# ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

## Глава 1

**2.** 0,2 с; 0,02 с. **3.** $2{,}6 \cdot 10^9$ м; $1 \cdot 10^{15}$ м. **5.** 12 м/с. **7.** На восток. **8.** 2 м/с$^2$. **9.** 80 с. **11.** 19,6 м; 39,2 м/с. **12.** 150 м. **14.** 6,4 с; 6 с; 6,8 с. **15.** 2. **17.** 45°. **18.** $7{,}3 \cdot 10^{-5}$ с$^{-1}$. **19.** 463 м/с. **20.** 4,2 с$^{-1}$. **21.** 4,5 м. **22.** 7,8 км/с; 9,1 м/с$^2$.

## Глава 2

**4.** $6{,}4 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с. **5.** 2,6 кг·м/с. **6.** 3,6 Н. **7.** 4,9 Н; 5,9 Н; 3,9 Н. **8.** 247,5 Н. **9.** 4,9 м/с$^2$; 1,5 Н. **10.** 0,1 м/с$^2$. **11.** 45 кг. **13.** 15 м/с; 750 кН. **14.** 0,58. **15.** 1 м/с$^2$; 4,9 Н. **16.** 156,5 кН. **17.** 39 кН. **18.** 2,4 м/с. **19.** 250 м. **20.** 10; 11. **21.** $3{,}6 \cdot 10^{22}$ Н. **22.** $3{,}46 \cdot 10^8$ м. **23.** 9,65 м/с$^2$. **25.** $2 \cdot 10^{30}$ кг.

## Глава 3

**1.** $1 \cdot 10^3$ кг. **2.** 392 Вт. **3.** 3 кДж. **4.** 235 кВт. **5.** 5 м/с. **6.** 4 см. **7.** 5 м/с. **8.** 24 м/с. **9.** 6 м/с. **10.** Нет. **11.** 5 кг. **12.** 981 Дж. **13.** 10 кг; 500 Дж. **14.** 10 м/с; 1,66 кН. **15.** 3,96 кН. **16.** 5 м. **17.** 8 см. **18.** 10 м. **19.** $8 \cdot 10^3$ м/с.

## Глава 4

**1.** $3 \cdot 10^{-26}$ кг. **2.** $9{,}3 \cdot 10^{-26}$ кг; $7{,}3 \cdot 10^{-26}$ кг. **3.** $4{,}02 \cdot 10^{23}$. **4.** $8 \cdot 10^{-3}$; $4{,}8 \cdot 10^{21}$. **5.** $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. **6.** $3{,}3 \cdot 10^2$ К. **7.** $10^5$ Па. **8.** $2{,}7 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. **9.** $7{,}2 \cdot 10^{22}$. **10.** 77,46 м/с; 71,4 м/с; 63,26 м/с.

## Глава 5

**1.** 588 Дж. **2.** 20 Дж. **3.** 30 °С. **4.** 60 °С. **5.** 2,5 л. **6.** ≈ 190 л; ≈ 130 л. **9.** 523,75 Дж. **10.** 891 К.

## Глава 6

**2.** 1 995 Па. **3.** 1 457 кДж. **4.** 86 г. **6.** 5 °С. **7.** ≈ 265 км. **8.** Не выпадет. **9.** 8 К.

## Глава 7

**1.** ≈ 0,017 Дж. **2.** 0,072 Н/м. **3.** $0{,}6 \cdot 10^{-4}$ Дж. **4.** 288 Па. **5.** 0,03 Н/м. **6.** 22 Н/м. **7.** 0,015 м.

## Глава 8

**1.** 292 Дж. **2.** 177 м. **3.** 52 Н; $2{,}6 \cdot 10^{-2}$ Дж. **4.** $2 \cdot 10^{-5}$ К$^{-1}$. **5.** $1{,}4 \cdot 10^8$ Па. **6.** 676 Н. **7.** 600 °С. **8.** ≈ 63,75 м$^3$. **10.** 52 °С. **11.** 0,79 г/см$^3$. **12.** $1{,}53 \cdot 10^7$ Дж. **13.** $5 \cdot 10^5$ Дж. **14.** ≈ 0,21 кг. **15.** 3,6 кг. **16.** 0,12 кг.

## Глава 9

**1.** $8{,}2 \cdot 10^{-8}$ Н; $2{,}19 \cdot 10^6$ м/с; $6 \cdot 10^{11}$ Н/Кл. **2.** $4{,}1 \cdot 10^{-3}$ Н; $8{,}2 \cdot 10^{-15}$ Н; $6{,}2 \cdot 10^{-8}$ Кл. **3.** $-0{,}95 \cdot 10^{-7}$ Кл. **4.** $4{,}75 \cdot 10^{-4}$ Кл. **5.** $1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. **6.** $2{,}2 \cdot 10^{-2}$ Дж. **7.** $4{,}1 \cdot 10^7$ м/с; $7{,}8 \cdot 10^{-16}$ Дж.

**8.** 500 В; 0,72 м; 0,24 м. **9.** 281 В. **10.** $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ Дж; $2{,}4 \cdot 10^{3}$ В; $1{,}8 \cdot 10^{3}$ В. **11.** Увеличится в четыре раза. **12.** $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ Дж. **13.** $3{,}3 \cdot 10^{5}$ В/м. **14.** 0,706 Дж. **15.** $0{,}94 \cdot 10^{-2}$ Н; 0,628 Дж/м$^3$. **16.** $486 \cdot 10^{-6}$ Кл; $682 \cdot 10^{-6}$ Кл; 97,2 В.

### Глава 10

**1.** 2 мкА. **2.** 30 Кл. **3.** 1,98 В. **4.** 14 Ом. **5.** 0,5 А. **6.** 10 мин; 40 мин. **7.** 1 600 Вт. **8.** $\approx$ 76 %.

### Глава 12

**1.** 76,4 А/м; 57,3 А/м. **2.** 0,06 м от меньшего; 0,49 м от меньшего. **3.** 35,2 А/м. **4.** $1{,}08 \cdot 10^{-4}$ Тл. **5.** $3{,}39 \cdot 10^{-2}$ Тл. **6.** $1{,}2 \cdot 10^{-16}$ Н; $2{,}66 \cdot 10^{-3}$ м. **7.** $2{,}99 \cdot 10^{4}$ В.

### Глава 13

**1.** 0,9 В. **2.** $4{,}01 \cdot 10^{-4}$ А. **3.** 5,29 м/с. **4.** 0,632 Дж. **5.** В 416 раз.

### Глава 14

**1.** 0,33 м; $\pi$; 0,5 с$^{-1}$; 2 с. **2.** $0{,}03 \sin(0{,}5\pi + \pi/6)$. **3.** $3{,}08\pi$ м/с; $7{,}68\pi^2$ м/с$^2$. **5.** 4 Дж. **6.** 0,8 Дж. **7.** 0,2 кг.

### Глава 15

**1.** 0,7 м. **2.** 1 м. **3.** 25 Гц. **4.** $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ с. **5.** 5 м.

### Глава 16

**1.** 105 м. **2.** 6. **3.** 12,7 мГн. **4.** $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ Дж. **5.** $1{,}15 \cdot 10^{-4}$ Дж. **6.** $0{,}76 \cdot 10^{5}$ с$^{-1}$. **7.** $1{,}3 \cdot 10^{-5}$ с. **8.** 1,256 А. **9.** 25 В. **10.** $\approx$ 7,5 В. **11.** $\approx$ 94 %. **12.** 20 Ом. **13.** 30 В; 60 В; 180 В; 1 200 В.

### Глава 18

**1.** $\approx$ 1,5 м. **2.** 39°. **3.** 56°; 34°. **4.** 42°; 24°. **5.** Нет. **6.** $\approx$ 1,4.

### Глава 19

**1.** 0,128 мкм. **2.** 0,345 мкм. **3.** $\lambda/3$. **4.** 14 мм. **5.** 0,62 мкм. **6.** 26°; 47°24′. **7.** $\pm 4$. **8.** $1{,}92 \cdot 10^{-6}$ м; 1 и 2. **9.** 49°37′. **10.** 48°50′.

### Глава 20

**1.** 2 эВ; $1{,}25 \cdot 10^{4}$ эВ. **2.** $4{,}4 \cdot 10^{-36}$ кг; $8{,}8 \cdot 10^{-32}$ кг; $1{,}8 \cdot 10^{-30}$ кг. **3.** 2,42 пм. **4.** $6{,}05 \cdot 10^{5}$ м/с. **5.** $4{,}7 \cdot 10^{14}$ Гц. **6.** 3,1 В.

### Глава 21

**1.** $1{,}5 \cdot 10^{-16}$ с. **2.** $0{,}76 \cdot 10^{6}$ м/с. **3.** $973 \cdot 10^{-10}$ м. **4.** 0,039 нм. **5.** 25; 1/25. **6.** $2{,}2 \cdot 10^{6}$ м/с; $9{,}2 \cdot 10^{22}$ м/с$^2$.

### Глава 22

**1.** $6{,}77 \cdot 10^{11}$ Дж. **2.** 10,98 МэВ. **3.** $5{,}36 \cdot 10^{-13}$ Дж; $9{,}04 \cdot 10^{-13}$ Дж. **4.** Кремний; выделяется: 154,3 МэВ. **5.** $3{,}347 \cdot 10^{-27}$ кг. **6.** 0,206 а.е.м.; $307{,}4 \cdot 10^{-13}$ Дж; $12{,}8 \cdot 10^{-13}$ Дж/нуклон. **7.** 2 309 лет. **8.** $^{4}_{2}$He. **9.** 2,217 МэВ.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## П.1. Основные физические постоянные (округленные значения)

| Физическая постоянная | Обозначение | Численное значение |
|---|---|---|
| Нормальное ускорение свободно падающих тел | $g$ | 9,81 м/с$^2$ |
| Гравитационная постоянная | $G$ | $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м$^2$/кг$^2$ |
| Постоянная Авогадро | $N_A$ | $6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ |
| Молярная газовая постоянная | $R$ | 8,31 Дж/(моль·К) |
| Постоянная Больцмана | $k$ | $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К |
| Молярный объем (объем 1 моль) идеального газа при нормальных условиях | $V_m$ | 0,0224 м$^3$/моль |
| Заряд электрона | $e$ | $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Постоянная Фарадея | $F$ | $9{,}65 \cdot 10^4$ Кл/моль |
| Скорость света в вакууме | $c$ | $3 \cdot 10^8$ м/с |
| Постоянная Стефана – Больцмана | $\sigma$ | $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2$·К$^4$) |
| Постоянная Вина | $b$ | $2{,}89 \cdot 10^{-3}$ м·К |
| Постоянная Планка | $h$ | $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Постоянная Ридберга | $R$ | $1{,}097 \cdot 10^{-7}$ м$^{-1}$ |
| Радиус Бора | $r_Б$ | $0{,}529 \cdot 10^{-10}$ м |
| Длина волны комптоновского излучения электрона | $\lambda$ | $2{,}43 \cdot 10^{-12}$ м |
| Потенциал ионизации атома водорода (энергия ионизации) | $J_0$ | $2{,}18 \cdot 10^{-18}$ Дж = 13,6 эВ |
| Атомная единица массы | а.е.м. | $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Коэффициент пропорциональности между энергией (МэВ) и массой (а.е.м.) | $k$ | $9 \cdot 10^{-16}$ Дж/кг = = 931,44 МэВ/(а.е.м.) |

## П.2. Некоторые соотношения между единицами измерений физических величин

***Единица длины – метр*** **(м),** ***размерность*** **L**

1 микрон (мкм) = $10^{-6}$ м; 1 м = $10^6$ мкм
1 ангстрем (Å) = $10^{-10}$ м; 1 м = $10^{10}$ Å
1 астрономическая единица (а.е.) = = $1{,}496 \cdot 10^{11}$ м
1 световой год (св. год) = $9{,}4605 \cdot 10^{15}$ м
1 парсек (пк) = $3{,}0857 \cdot 10^{16}$ м

***Единица массы – килограмм*** **(кг),** ***размерность*** **M**

1 атомная единица массы = 1 а.е.м. = = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг

***Единица времени – секунда*** **(с),** ***размерность*** **T**

1 средние солнечные сутки = 86 400 с
1 год = 365,25 суток = $3{,}16 \cdot 10^7$ с

***Единица работы, теплоты, энергии — джоуль* (Дж), *размерность* $L^2MT^{-2}$**

$1\ Дж = 1\ Н \cdot м = 1\ м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}$
$1\ кал = 4{,}19\ Дж$
$1\ эВ = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ Дж$

***Единица мощности, теплового потока — ватт* (Вт), *размерность* $L^2MT^{-3}$**

$1\ Вт = 1\ Дж/с = 1\ м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$
$1\ л.с. \approx 735\ Вт$

***Единица давления, механического напряжения — паскаль* (Па), *размерность* $L^{-1}MT^{-2}$**

$1\ Па = 1\ Н/м^2 = 10\ дин/см^2 =$
$= 1\ м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}$
$1\ мм\ рт.\ ст. = 133\ Па$
$1\ атм = 1{,}013 \cdot 10^5\ Па$

***Единица температуры — кельвин* (К), *размерность* T**

$t[°C] = T[K] - 273{,}15$
$t[°F] = 1{,}8 \cdot (T[K] - 255{,}37)$

***Единица количества электричества — кулон* (Кл), *размерность* TI**

$1\ Кл = 1\ А \cdot с$

## П.3. Астрономические величины

| | |
|---|---|
| Средний радиус Земли | $6{,}37 \cdot 10^6$ м |
| Средняя плотность Земли | 5 500 кг/м$^3$ |
| Масса Земли | $5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг |
| Радиус Солнца | $6{,}95 \cdot 10^8$ м |
| Средняя плотность Солнца | 1 400 кг/м$^3$ |
| Масса Солнца | $1{,}98 \cdot 10^{30}$ кг |
| Радиус Луны | $1{,}74 \cdot 10^6$ м |
| Масса Луны | $7{,}3 \cdot 10^{22}$ кг |
| Среднее расстояние между центрами Земли и Луны | $3{,}84 \cdot 10^8$ м |
| Среднее расстояние между центрами Солнца и Земли | $1{,}5 \cdot 10^{11}$ м |
| Период обращения Луны вокруг Земли | 27 сут 7 ч 43 мин |

## П.4. Плотность жидкостей, $10^3$ кг/м$^3$

| | | | |
|---|---|---|---|
| Вода (при 4 °C) | 1 | Масло | 0,9 |
| Глицерин | 1,26 | Ртуть | 13,6 |
| Керосин | 0,8 | Спирт | 0,8 |

## П.5. Плотность газов при нормальных условиях, кг/м$^3$

| | | | |
|---|---|---|---|
| Азот | 1,25 | Воздух | 1,29 |
| Аргон | 1,78 | Гелий | 0,18 |
| Водород | 0,09 | Кислород | 1,43 |

## П.6. Эффективный диаметр молекул газов, $10^{-10}$ м

| | | | |
|---|---|---|---|
| Азот | 3,1 | Кислород | 2,9 |
| Водород | 2,1 | Гелий | 1,9 |

## П.7. Поверхностное натяжение жидкостей (при 20 °C), Н/м

| | | | |
|---|---|---|---|
| Вода | 0,072 | Спирт | 0,022 |
| Глицерин | 0,066 | Мыльный раствор | 0,04 |

## П.8. Плотность $\rho$, модуль продольной упругости $E$ (модули Юнга), температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ (средние значения)

| Вещество | $\rho$, $10^3$ кг/м$^3$ | $E$, $10^{10}$ Н/м$^2$ | $\alpha$, $10^{-6}$ К$^{-1}$ | Вещество | $\rho$, $10^3$ кг/м$^3$ | $E$, $10^{10}$ Н/м$^2$ | $\alpha$, $10^{-6}$ К$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Алюминий | 2,7 | 7,0 | 24 | Медь | 8,8 | 12,98 | 16,7 |
| Вольфрам | 19,15 | 41,1 | 4,3 | Никель | 8,8 | 20,4 | 13,4 |
| Железо (сталь) | 7,85 | 22,0 | 11,9 | Нихром | 8,4 | — | — |
| Константан | 8,9 | 21,0 | 17,0 | Фарфор | 2,3 | — | 3 |
| Лед | 0,92 | 0,28 | — | Цинк | — | — | 30 |

## П.9. Удельная теплота плавления, кДж/кг

Лед ..... 330
Свинец ..... 25
Медь ..... 180
Олово ..... 59
Серебро ..... 87

## П.10. Удельная теплота парообразования, МДж/кг

Вода ..... 2,3
Эфир ..... 0,7
Ртуть ..... 0,29
Спирт ..... 0,85

## П.11. Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)

Вода ..... 4,2
Лед ..... 2,1
Свинец ..... 0,13
Нихром ..... 2,2
Медь ..... 0,38
Спирт ..... 2,4

## П.12. Удельное сопротивление, $10^{-8}$ Ом·м

Вольфрам ..... 5,5
Железо ..... 9,8
Нихром ..... 110,0
Медь ..... 1,7
Серебро ..... 1,6
Алюминий ..... 2,9

## П.13. Диэлектрическая проницаемость (относительная)

Парафин ..... 2,0
Слюда ..... 6,0
Вода ..... 81,0
Трансформаторное масло ..... 2,2
Стекло ..... 7,0
Спирт ..... 26,0

## П.14. Температурный коэффициент сопротивления проводников, $10^{-3}$ К

Медь ..... 4,2
Вольфрам ..... 5,2

## П.15. Показатель преломления

Алмаз ..... 2,42
Вода ..... 1,33
Лед ..... 1,31
Стекло ..... 1,57
Кварц ..... 1,54
Глицерин ..... 1,47

## П.16. Масса $m_0$ и энергия $E_0$ покоя некоторых элементарных частиц

| Частица | $m_0$ | | $E_0$ | |
|---|---|---|---|---|
| | а.е.м. | $10^{-27}$ кг | МэВ | $10^{-10}$ Дж |
| Электрон | $5{,}486 \cdot 10^{-4}$ | 0,00091 | 0,511 | 0,00081 |
| Протон | 1,00781 | 1,6724 | 938,23 | 1,50 |
| Нейтрон | 1,00867 | 1,6748 | 939,53 | 1,51 |
| Дейтрон | 2,01356 | 3,3325 | 1875,5 | 3,00 |
| α-Частица | 4,0047 | 6,6444 | 3726,2 | 5,96 |

## П.17. Работа выхода электронов из металла, эВ

Алюминий ..... 3,7
Вольфрам ..... 4,5
Литий ..... 2,3
Медь ..... 4,3
Платина ..... 6,3
Цезий ..... 1,8
Цинк ..... 4,0

## П.18. Некоторые сведения по математике

***Корни квадратного уравнения***

$$ax^2 + bx + c = 0 \qquad x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

***Тригонометрические формулы***

$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$

$\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{ctg}\alpha = 1$

$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha \cdot \cos\beta \pm \cos\alpha \cdot \sin\beta$

$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha \cdot \cos\beta \mp \sin\alpha \cdot \sin\beta$

$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$

$\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha$

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\sin\alpha - \sin\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\sin^2\frac{\alpha}{2} = \frac{1-\cos\alpha}{2}$$

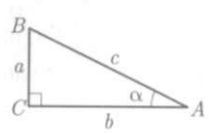
$$\cos^2\frac{\alpha}{2} = \frac{1+\cos\alpha}{2}$$

***Соотношения в прямоугольном треугольнике***

$a = c\sin\alpha,\ a = b\operatorname{tg}\alpha$

$b = c\cos\alpha,\ b = a\operatorname{ctg}\alpha$

$c^2 = a^2 + b^2$ — теорема Пифагора

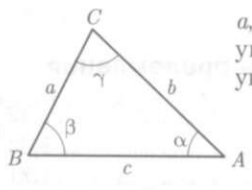



$a$, $b$ — катеты; $c$ — гипотенуза; $\alpha$ — угол между сторонами $b$, $c$

***Соотношения в произвольном треугольнике***

$$\frac{\sin\alpha}{a} = \frac{\sin\beta}{b} = \frac{\sin\gamma}{c}$$ — теорема синусов

$$\left.\begin{aligned} a^2 &= b^2 + c^2 - 2bc\cdot\cos\alpha \\ b^2 &= a^2 + c^2 - 2ac\cdot\cos\beta \\ c^2 &= a^2 + b^2 - 2ab\cdot\cos\gamma \end{aligned}\right\}$$ — теорема косинусов




$a$, $b$, $c$ — стороны треугольника; $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ — углы треугольника

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ


Автоколебания 267
Аккумулятор 204
Активность вещества радиоактивного 396
Альфа-лучи 295
Ампер 205, 232
Амперметр 214
Амплитуда 255
Анализ спектральный 367,416
Анализатор 358
Анизотропия 163
Аннигиляция 412
Античастицы 412
Аристотель 4
Атом 102
— теории Бора 387

База 223
Беккерель 396
Бета-лучи 395
Бетатрон 246
Биения 258
Биопризма Френеля 346
Болометр 222

Вакуум 422
Ватт 77
Вектор индукции магнитной 228
— напряженности поля электростатического 181
— перемещения 14
— скорости 17
— ускорения 21
Вес тела 59
Взаимодействие гравитационное 56, 432
— межмолекулярное 105
-сильное 9, 413, 432
-слабое 9,413, 432
———электромагнитное 313, 432
Влажность абсолютная 149
— относительная 150
Возгонка 147
Волна звуковая 284
— когерентная 345
— опорная 355
— поперечная 274
— предметная 355
— продольная 275
— стоячая 281
— сферическая 276
— электромагнитная 315, 325
Волны упругие 273
— электромагнитные 315
Вольт 185, 209
Время оседлой жизни молекул 107
Вселенная 419, 421
Высота тона 285

Газ 106
— идеальный ПО
— электронный 190
Галактика 417, 423
Гамма-излучение 395
Гармонические колебания 256
— механические 256
— электромагнитные 290
Гармонический осциллятор 255
Генератор оптический квантовый 390
— тока 297, 303
Генри 248
Гигрометр 150
Гипотеза Планка 375, 431
Год световой 417
Голография 355
Громкость звука 284

Давление I 10
— гидростатическое 160
— добавочное (лапласовское) 160
— молекулярное 157
Двигатель вечный первого рода 132
———второго рода 138
— дизель 141
— карбюраторный 140
— реактивный 141
— тепловой 139
Движение 4
— броуновское 103
— колебательное 255
— криволинейное 12
— механическое 11
— периодическое 255
— равномерное 19
— равнопеременное 23
— реактивное 72
— тепловое 101
Декремент затухания 266,294
Дефект массы 401, 415
Деформация тела упругая 164
Диамагнетики 230
Диаметр молекулы эффективный 106
Динамика классическая 10
Диод полупроводниковый 223
Диоптрия 332
Диполь электрический 183
Дисперсия аномальная и нормальная 363
— света 362
Дифракция волн 283
— на решетке 353
— на щели 352
— света 350
Диффузия 104
Диэлектрики дипольные полярные 189
— кристаллические 189
— нейтральные неполярные 189
Длина волны 277, 316, 326
Доза биологическая 411
Дуализм квантово-волновой 9
Дыра черная 428
Дырка 220, 379

Единицы физической величины 7

— фотона 375
Индуктивность 247
— взаимная 248
— соленоида 249
Индукция электромагнитная 242
Инертность 48
Интерференция волн 278
— света 344
Интерферометр Майкельсона 349
Инфразвук 284
Испарение 147
Источник тока 204

Капилляр 159
Карно 135, 137
Картина мира 8
Квазары 418
Квант 375
Кельвин 138
Килограмм 49
Кинематика 10
Кипение 151
Когерентность 345
Колебания вынужденные 268, 295
— гармонические 256
— затухающие 255, 265
— свободные 261
— электромагнитные 290
Количество вещества 103
— теплоты 129
Коллектор 223
Кольца Ньютона 249
Контур колебательный 290
— пробный 227
Конденсаторы 192
Конденсация 148
Космология 419
Коэффициент давления температурный 116
— затухания 269
— размножения 405
— трения 61
КПД термический 136
— цикла Карно 136
Кристаллы 163
— жидкие 171
Кристаллизация 170
Кулон 205

Лазер 391
Линза 331
Линия напряженности поля электрического 181
— индукции магнитной 229
Ломоносов 100
Лупа 336
Луч 327
— необыкновенный 361
— обыкновенный 361
Лучи рентгеновские 369

Максимум дифракционный 353
— интерференционный 345
Макромир 4
Масса 4, 48
— критическая 406
— молярная 103
— тела 49
— фотона 375
Материальная точка 11
Материя 4
Маятник математический 262
— пружинный 263
Мезоны 412
Мениск 159
Метод зон Френеля 352
— исследования статистический 100
— термодинамический 100
Метр 16
Механика классическая 10
Микромир 4
Микроскоп 336
Минимум дифракционный 353
— интерференционный 345
Модели атома 386, 387
— Вселенной 421
— идеального газа 110
Молекула 102
Моль 103
Монокристалл 163
Мощность мгновенная 78
— средняя 77

— тока электрическая 214,302

Наблюдения 5
Напряженность поля диполя 183
——электрического 181
Напряжение 210
Натяжение поверхностное 157
Начало термодинамики первое 132
——второе 137
Невесомость 60
Нейтрино 412
Нейтрон 400
Нуль Кельвина 121
Нуклон 400
Ньютон 10, 45

Однородность времени 11
— пространства 11
Ом 207
Оптика геометрическая 324
— просветленная 350
— физическая 324
Опыты Резерфорда 386
— Ремсра и Майкельсона 326
— Штерна 108
Осциллятор гармонический 255
Отражение полное 330
Ось оптическая 331

Пар насыщенный 148
— перегретый 152
Парамагнетики 230
Параметры состояния 109
Парсек 417
Паскаль (единица давления) НО
Переход электронно-дырочный 222
Период колебаний 255, 262
— полураспада 396
Плавление 169
Плазма 107
Плоскость поляризации 360
Плотность тока 204
— энергии поля магнитного 250
——электростатического 195
Поверхности эквипотенциальные 186
Позитрон 411
Показатель преломления среды 329
Поле вихревое 229
— гравитационное 57
— магнитное 226
— потенциальное 184
— электрическое вихревое 245
— электростатическое 180
— электромагнитное 226, 313
Поликристалл 163
Полиморфизм 164
Полупроводники 219
Поляризатор 358
Поляризация волн 357
— света 358

Нейтрон 400
Нуль Кельвина 121
Нуклон 400
Ньютон 10, 45

Однородность времени 11
— пространства 11
Ом 207
Оптика геометрическая 324
— просветленная 350
— физическая 324
Опыты Резерфорда 386
— Ремера и Майкельсона 326
— Штерна 108
Осциллятор гармонический 255
Отражение полное 330
Ось оптическая 331

Пар насыщенный 148
— перегретый 152
Парамагнетики 230
Параметры состояния 109
Парсек 417
Паскаль (единица давления) 110
Переход электронно-дырочный 222
Период колебаний 255, 262
— полураспада 396
Плавление 169
Плазма 107
Плоскость поляризации 360
Плотность тока 204
— энергии поля магнитного 250
——электростатического 195
Поверхности эквипотенциальные 186
Позитрон 411
Показатель преломления среды 329
Поле вихревое 229
— гравитационное 57
— магнитное 226
— потенциальное 184
— электрическое вихревое 245
— электростатическое 180
— электромагнитное 226, 313
Поликристалл 163
Полиморфизм 164
Полупроводники 219
Поляризатор 358
Поляризация волн 357
— света 358
Порядок ближний 156
— дальний 164
— интерференционного максимума 245
——минимума 245
Постоянная Авогадро 103
— Больцмана120
— гравитационная 56
— Лошмидта 103
— магнитная 232
— молярная газовая 119
— Планка 375
— распада радиоактивного 396
— решетки дифракционной 354
— Ридберга 385, 389
— электрическая 180
Постулаты Бора 387
Потенциал поля электростатического 185
Поток индукции магнитной (магнитный поток) 233
Правило правого винта 229
— левой руки 231, 235
— Ленца 244
Призма Николя 361
Принцип Гюйгенса 351
— Гюйгенса—Френеля 351
— суперпозиции полей 182,345
Природа света 324
Проводимость 206
— полупроводника 219
— дырочная (вентильная) 221
— примесная 220
— собственная 220
— электронная (n-типа) 221
— p-n-перехода односторонняя 222
— удельная 207
Пространство 4
Протон 400,411
Процесс адиабатный 134
— изобарный изохорный 115, 133
— изотермический 114, 134
— круговой (цикл) 135
— необратимый 126
— обратимый 126
— термодинамический 114, 126
Психрометр 150
Путь 14, 16
— оптический 347
— Млечный 417

Работа выхода электрона из металла 378
— сил поля магнитного 234
——электростатического 184
— силы 73, 75, 76
— тока электрического 214, 301
Равновесие тепловое ИЗ
Радиоактивность естественная 395
— искусственная 403
Радиосвязь 318
Радиоастрономия 323
Радиолокация 322
Радиопередатчик 319
Радиоприемник 318, 320
Радиус действия молекулярного 156
Разность потенциалов 185
— оптическая 347
— хода волн 345
Распад радиоактивный 395
Реактор ядерный 405
Реакция термоядерная 425
цепная 404
— экзотермическая 402
— эндотермическая 402
— ядерная 402
Резонанс 268, 301
Решетка дифракционная 353
— кристаллическая 163
— трехмерная (пространственная) 163, 369
Ротор 303

Самоиндукция 247
Сверхпроводимость 208
Свет естественный 324, 359
— плоскополяризованный 359
Световоды 330
Секунда 8
Серия Бальмера 385
— Лаймана 385
— Пашена 385
Сечение кристалла главное 361
Сила гравитационная (всемирного тяготения) 56
— звука 284
— Лоренца 234
нормального давления 61
— поверхностного натяжения 157
— оптическая 332
— тока 204
— трения 60
— тяжести 59

— упругости 62
— электродвижущая индукции 244
——источника тока 208
Силы квазиупругие 260
— молекулярные 104
— потенциальные 74
— сторонние 203
Сименс 207
Сингулярность 422, 431
Синтез термоядерный 425
Система декартова 12
— замкнутая 71
— единиц 8
— инерциальная 45
— отсчета 12
— Солнечная 428
термодинамическая 126
Скорость 17
— вторая космическая 89
— дрейфа 205
— звука 284
— квадратичная 108
— линейная 34
— мгновенная 18
— наиболее вероятная 109
первая космическая 58
— света в вакууме 316, 327
— средняя арифметическая 108
— угловая 36
Смачивание 158
Смещение красное 420
Солнце 426, 428
Сопротивление емкостное 298
— индуктивное 299
— полное (общее) 300
— удельное 207
— электрическое 206
Состояние вещества сингулярное 422, 431
Спектр атома водорода 384
———линейчатый 388
— дифракционный 354, 364
— звезд 364
— испускания 365
— поглощения 366
— Солнца 364
Сублимация 147, 171

Текучесть 107, 156
Телевидение 322
Телескоп 338
Тело аморфное 163, 164
— изотропное 163
— кристаллическое 163
— отсчета 12
— рабочее 139
— твердое 11
Температура термодинамическая 116, 119
Теория близкодействия 225
— молекулярно-кинетическая 101
— света квантовая 376
Теплообмен 129
Термодинамика 125
Термодинамический процесс адиабатический 134
— изобарный 133
— изотермический 134
— изохорный 133
— круговой 135
— обратимый 135
— равновесный 136
Ток индукционный 246
— переменный 296
— постоянный 204
— проводимости 203
— электрический 203
Точка материальная 11
— росы 150
Траектория 18, 31
Трансформатор 249, 304
Трение покоя 61
— скольжения 60
Триод полупроводниковый (транзистор) 223
Трубка рентгеновская 369

Угловая скорость 36
Угол Брюстера 360
Удар неупругий 86
— упругий 86
Узлы решетки кристаллической 107, 163
Ультразвук 286
Уравнение бегущей волны 278
— гармонических колебаний 256
— изобары 115
— изотермы 115
— изохоры 116
— Клапейрона 118
— Клапейрона —Менделеева 119, 121
— молекулярно-кинетической теории 112
— состояния идеального газа 117
— теплового баланса 131, 152
— Эйнштейна для фотоэффекта внешнего 378
Ускорение 23
— свободного падения 29
— тангенциальное 22
— центростремительное 36
Ускорители заряженных частиц 237

Фаза колебаний 256
Фарад 192
Ферромагнетики 230
Физика атомная 394
— квантовая 374
— молекулярная 100
Фокус 332
Формула Бальмера обобщенная 385
— линзы 333
— Томсона 292
Формулы сериальные 385, 389
Фотон 375,411,422
Фотоэлементы 380
Фотоэффект внешний 376
— внутренний 379
— многофотонный 378
Фронт волновой 276
Функция распределения молекул по скоростям 108

Характеристика вольт-амперная 206
Хрупкость 167

Центр масс 49
Цикл Карно 136
——обратный 135
——прямой 135
— протон-протонный 427
— углеродный 427
Циклотрон 237

Частицы элементарные 411
Частота вращения 34
— колебаний 255
— собственная 261, 294
— циклическая 255
Число квантовое главное 390

Шкала термодинамическая температурная 138
Шум 285

Эволюция звезд 428
Эксперимент 5

Электрическая емкость 191
— конденсатора плоского 192
——сферического 192
— проводника 191
— системы проводников 191
Электрон 177
Электроны свободные 203
Эмиттер 223
Энергия 5, 78
внутренняя 127
- звезд 426
- кванта 375
- кинетическая 81
- конденсатора заряженного 194
- поля магнитного 249
——электромагнитного 293, 314
——электростатического 195
- потенциальная 82, 83
— связи ядра 401
— Солнца 426
— удельная 401
Эффект Вавилова — Черенкова 398
Эхо 286

Явление капиллярное 159
Ядро атома 400
— галактики 417

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ..... 3

Введение ..... 4

РАЗДЕЛ I

**МЕХАНИКА**

Глава 1. **Кинематика** ..... 11

1.1. Механическое движение (11). 1.2. Перемещение. Путь (13). 1.3. Скорость (17). 1.4. Равномерное прямолинейное движение (18). 1.5. Ускорение (21). 1.6. Равноускоренное прямолинейное движение (23). 1.7. Равнозамедленное прямолинейное движение (26). 1.8. Свободное падение (28). 1.9. Движение тела, брошенного под углом к горизонту (31). 1.10. Равномерное движение по окружности (34).

Глава 2. **Законы механики Ньютона** ..... 44

2.1. Первый закон Ньютона (44). 2.2. Сила (46). 2.3. Масса (48). 2.4. Импульс тела (50). 2.5. Второй закон Ньютона (51). 2.6. Третий закон Ньютона (54). 2.7. Закон всемирного тяготения (55). 2.8. Гравитационное поле (56). 2.9. Сила тяжести. Вес (59). 2.10. Силы в механике (60).

Глава 3. **Законы сохранения в механике** ..... 70

3.1. Закон сохранения импульса (70). 3.2. Реактивное движение (72). 3.3. Работа силы (73). 3.4. Мощность (77). 3.5. Энергия (78). 3.6. Кинетическая энергия (79). 3.7. Потенциальная энергия (81). 3.8. Закон сохранения полной механической энергии (84). 3.9. Применение законов сохранения (86)

РАЗДЕЛ II

**ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ**

Глава 4. **Основы молекулярно-кинетической теории. Идеальный газ** ..... 101

4.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории (101). 4.2. Размеры и масса молекул и атомов (101). 4.3. Броуновское движение. Диффузия (103). 4.4. Силы и энергия межмолекулярного взаимодействия (104). 4.5. Строение газообразных, жидких и твердых тел (106). 4.6. Скорости движения молекул и их измерение (108). 4.7. Параметры состояния идеального газа (109). 4.8. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов (111). 4.9. Температура и ее измерение (113). 4.10. Газовые законы (114). 4.11. Абсолютный нуль температуры. Термодинамическая шкала температуры (116). 4.12. Уравнение состояния идеального газа. Молярная газовая постоянная (117).

Глава 5. **Основы термодинамики**.....125
**5.1.** Основные понятия и определения (125). **5.2.** Внутренняя энергия (126). **5.3.** Работа и теплота как формы передачи энергии (128). **5.4.** Теплоемкость. Удельная теплоемкость. Уравнение теплового баланса (130). 5.5. Первое начало термодинамики (131). 5.6. Адиабатный процесс (134). **5.7.** Принцип действия тепловой машины. КПД теплового двигателя (135). **5.8.** Второе начало термодинамики (137). 5.9. Холодильная машина. Тепловой двигатель (138).

Глава 6. **Свойства паров**.....147
**6.1.** Испарение и конденсация (147). **6.2.** Насыщенный пар и его свойства (148). 6.3. Абсолютная и относительная влажность воздуха. Точка росы (149). **6.4.** Кипение. Перегретый пар (151).

Глава 7. **Свойства жидкостей**.....155
**7.1.** Характеристика жидкого состояния вещества (155). **7.2.** Поверхностный слой жидкости. Энергия поверхностного слоя (157). **7.3.** Явления на границе жидкости с твердым телом. Капиллярные явления (158).

Глава 8. **Свойства твердых тел**.....163
**8.1.** Характеристика твердого состояния вещества (163). **8.2.** Упругие свойства твердых тел. Закон Гука (164). **8.3.** Механические свойства твердых тел (166). **8.4.** * Тепловое расширение твердых тел и жидкостей (167). **8.**5. Плавление и кристаллизация (169).

РАЗДЕЛ III
**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

Глава 9. **Электрическое поле**.....177
**9.1.** Электрические заряды. Закон сохранения заряда (177). **9.2.** Закон Кулона (178). **9.3.** Электрическое поле. Напряженность электрического поля (180). **9.4.** Принцип суперпозиции полей (182). **9.5.** Работа сил электростатического поля (183). **9.6.** Потенциал. Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности (185). **9.**7. Связь между напряженностью и разностью потенциалов электрического поля (187). **9.8.** Диэлектрики в электрическом поле. Поляризация диэлектриков (188). **9.9.** Проводники в электрическом поле (190). **9.10.** Конденсаторы (191). **9.11.** Энергия заряженного конденсатора (194). **9.12.*** Энергия электрического поля (195).

Глава 10. **Законы постоянного тока**.....203
**10.1.** Условия, необходимые для возникновения и поддержания электрического тока (203). **10.2.** Сила тока и плотность тока (204). **10.3.** Закон Ома для участка цепи без ЭДС (206). **10.4.** Зависимость электрического сопротивления от материала, длины и площади поперечного сечения проводника (207). **10.5.*** Зависимость электрического сопротивления проводников от температуры (207). **10.6.** Электродвижущая сила источника тока (208). **10.**7. Закон Ома для полной цепи (210). **10.8.** Соединение проводников (211). **10.9.** Соединение источников электрической энергии в батарею (212). **10.10.** Закон Джоуля-Ленца (213). **10.11.** Работа и мощность электрического тока (214). **10.12.** Тепловое действие тока (214).

Глава 11. **Электрический ток в полупроводниках**.....219
**11.1.** Собственная проводимость полупроводников (219). **11.2.** Полупроводниковые приборы (222)

Глава **12. Магнитное поле** ..... **225**
**12.1.** Магнитное поле **(225)**. **12.2.** Вектор индукции магнитного поля **(228)**. **12.3.** Действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током. Закон Ампера **(230)**. **12.4.** * Взаимодействие токов **(231)**. **12.5.** Магнитный поток **(233)**. **12.6.** Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле **(233)**. **12.7.** Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца **(234)**. **12.8.*** Определение удельного заряда. Ускорители заряженных частиц **(235)**.

Глава **13. Электромагнитная индукция** ..... **242**
**13.1.** Электромагнитная индукция **(242)**. **13.2.** Вихревое электрическое поле **(245)**. **13.3.** Самоиндукция **(247)**. **13.4.** Энергия магнитного поля **(249)**.

РАЗДЕЛ IV
**КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

Глава **14. Механические колебания** ..... **255**
**14.1.** Колебательное движение **(255)**. **14.2.** Гармонические колебания **(256)**. **14.3.** Свободные механические колебания **(260)**. **14.4.** Линейные механические колебательные системы **(261)**. **14.5.** Превращение энергии при колебательном движении **(264)**. **14.6.** Свободные затухающие механические колебания **(265)**. **14.7.** Вынужденные механические колебания **(268)**.

Глава **15. Упругие волны** ..... **273**
**15.1.** Поперечные и продольные волны **(273)**. **15.2.** Характеристики волны **(275)**. **15.3.** Уравнение плоской бегущей волны **(277)**. **15.4.** Интерференция волн **(278)**. **15.5.** Понятие о дифракции волн **(283)**. **15.6.** Звуковые волны **(284)**. **15.7.** Ультразвук и его применение **(286)**.

Глава **16. Электромагнитные колебания** ..... **290**
**16.1.** Свободные электромагнитные колебания **(290)**. **16.2.** Превращение энергии в колебательном контуре **(293)**. **16.3.*** Затухающие электромагнитные колебания **(293)**. **16.4.** Генератор незатухающих колебаний **(295)**. **16.5.** Вынужденные электромагнитные колебания **(295)**. **16.6.** Переменный ток. Генератор переменного тока **(296)**. **16.7.** Емкостное и индуктивное сопротивления переменного тока **(298)**. **16.8.** Закон Ома для электрической цепи переменного тока **(300)**. **16.9.** Работа и мощность переменного тока **(301)**. **16.10.** Генераторы тока **(303)**. **16.11.** Трансформаторы **(304)**. **16.12.*** Токи высокой частоты **(306)**. **16.13.** Получение, передача и распределение электроэнергии **(306)**.

Глава **17. Электромагнитные волны** ..... **313**
**17.1.** Электромагнитное поле как особый вид материи **(313)**. **17.2.** Электромагнитные волны **(315)**. **17.3.** Вибратор Герца. Открытый колебательный контур **(316)**. **17.4.** Изобретение радио А.С.Поповым. Понятие о радиосвязи **(318)**. **17.5.** Применение электромагнитных волн **(322)**.

РАЗДЕЛ V
**ОПТИКА**

Глава **18. Природа света** ..... **324**
**18.1.** Скорость распространения света **(324)**. **18.2.** Законы отражения и преломления света **(327)**. **18.3.** Полное отражение **(329)**. **18.4.** Линзы **(331)**. **18.5.*** Глаз как оптическая система **(334)**. **18.6.** Оптические приборы **(336)**.

Глава 19. **Волновые свойства света**.....344
19.1. Интерференция света. Когерентность световых лучей (344). 19.2. Интерференция в тонких пленках (347). 19.3.* Полосы равной толщины. Кольца Ньютона (348). 19.4. Использование интерференции в науке и технике (349). 19.5. Дифракция света (350). 19.6. Дифракция на щели в параллельных лучах (352). 19.7. Дифракционная решетка (353). 19.8.* Понятие о голографии (355). 19.9. Поляризация поперечных волн (357). 19.10. Поляризация света (358). 19.11. Двойное лучепреломление. Поляроиды (360). 19.12. Дисперсия света (362). 19.13.* Виды спектров (364). 19.14. Спектры испускания. Спектры поглощения (365). 19.15. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучения (367). 19.16. Рентгеновские лучи. Их природа и свойства (368).

РАЗДЕЛ VI

**ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

Глава 20. **Квантовая оптика**.....375
20.1. Квантовая гипотеза Планка. Фотоны (375). 20.2. Внешний и внутренний фотоэффект (376). 20.3. Типы фотоэлементов (380).

Глава 21. **Физика атома**.....383
21.1. Развитие взглядов на строение вещества (383). 21.2. Закономерности в атомных спектрах водорода (384). 21.3. Ядерная (планетарная) модель атома. Опыты Резерфорда (386). 21.4. Модель атома водорода по Бору (387). 21.5. Квантовые генераторы (390).

Глава 22. **Физика атомного ядра**.....394
22.1. Естественная радиоактивность (394). 22.2.* Закон радиоактивного распада (395). 22.3. Способы наблюдения и регистрации заряженных частиц (397). 22.4.* Эффект Вавилова-Черенкова (398). 22.5. Строение атомного ядра (399). 22.6. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность (402). 22.7. Деление тяжелых ядер. Ценная ядерная реакция (403). 22.8. Управляемая цепная реакция. Ядерный реактор (405). 22.9. Получение радиоактивных изотопов и их применение (407). 22.10. Биологическое действие радиоактивных излучений (410). 22.11. Элементарные частицы (411).

РАЗДЕЛ VII

**ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ**

Глава 23. **Строение и развитие Вселенной**.....417
23.1. Наша звездная система — Галактика (417). 23.2. Другие галактики. Бесконечность Вселенной (418). 23.3. Понятие о космологии (419). 23.4. Расширяющаяся Вселенная (420). 23.5. Модель горячей Вселенной (421). 23.6. Строение и происхождение галактик (423).

Глава 24. **Эволюция звезд. Гипотеза происхождения Солнечной системы**.....425
24.1. Термоядерный синтез (425). 24.2.* Проблемы термоядерной энергетики (425). 24.3. Энергия Солнца и звезд (426). 24.4. Эволюция звезд (428). 24.5. Происхождение Солнечной системы (428).

Заключение.....431

Ответы к задачам для самостоятельного решения.....433

Приложения.....435

Предметный указатель.....439

*Учебное издание*

**Дмитриева Валентина Феофановна**

**Физика для профессий и специальностей технического профиля**

**Учебник**

Редактор *Л. В. Честная*
Технический редактор *Н. И. Горбачева*
Компьютерная верстка: *Д. В. Федотов*
Корректор *Г.Н.Петрова*

Изд. № 106113838. Подписано в печать 05.03.2013. Формат 70 x 100/16.
Гарнитура «Петербург». Бумага офс. № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 36,4.
Тираж 15000 экз. Заказ № С-838.

ООО «Издательский центр «Академия», www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.
Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. AE51. H 16067 от 06.03.2012.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала ОАО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.
E-mail: idelpress@mail.ru

# ФИЗИКА

**ДЛЯ ПРОФЕССИЙ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

Учебник

ISBN 978-5-7695-9932-3

**Издательский центр «Академия»**
www.academia-moscow.ru