

В. А. Касьянов

# ФИЗИКА

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

# 10

класс



 дрофа

В. А. Касьянов

# ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано  
Министерством просвещения  
Российской Федерации

*8-е издание, переработанное*

МОСКВА



2019

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

10  
класс

 | российский  
учебник



## 1

# Физика в познании вещества, поля, пространства и времени

## § 1. Что изучает физика

**Возникновение физики.** Любое природное явление имеет множество характеристик и признаков. Например, море ассоциируется с водой и пеной, рябью и набегающими волнами, шумом приливов и отливов, водорослями и рыбами. Гроза сопровождается ливневыми потоками воды, разрядами молнии, раскатами грома.

Стремление понять окружающий мир, увидеть общее в разных природных явлениях, понять причины, порождающие их, а также желание предсказать их возникновение привело к зарождению науки.

Любознательному человеку интересно узнать, чем отличаются различные звуки и что у них общего, что определяет разный цвет тел, что общего между падением тел на Землю и движением звёзд и планет.

*Физика — наука, занимающаяся изучением самых общих закономерностей явлений природы, свойств и структуры окружающего нас мира.* Поэтому её понятия и законы используются в самых разных областях научного знания: геологии, химии, биологии и др.

Задачи, стоящие перед физикой, определяют особенности физического метода исследования: от эксперимента к количественным формулировкам законов, которые проверяются практикой.

Начало физике положил итальянский учёный *Галилео Галилей*, поставивший первые физические эксперименты и предложивший теоретическое объяснение движения тел. До Галилея изучение движения основывалось на чисто философских идеях и было описательным.

Изучая падение тел разной массы, Галилей не просто наблюдал за их движением, но и *измерял высоту*, с которой падают тела, и *определял время* их падения. В результате измерений Галилеем были получены *количественные* соотношения между величинами.

**Базовые физические величины в механике.** Среди многочисленных физических величин существуют основные (базовые) величины, через которые с помощью определённых количественных соотношений выра-

жаются все остальные. Такими величинами являются *длина* и *время*, характеризующие изменение расположения тел, и *масса*, определяющая гравитационные и инерционные свойства.

С целью измерения необходимо задать эталон единицы измерения. Так, метр — единица длины, равная расстоянию, которое проходит свет в вакууме за  $1/299\,792\,458$  с.

Секунда — единица времени, равная  $9\,192\,631\,770$  периодам излучения изотопа атома цезия-133.

Килограмм — единица массы, равная массе международного эталона килограмма.

**Кратные и дольные единицы.** Определив в Международной системе единиц (СИ) основные единицы (метр — для длины, секунда — для времени, килограмм — для массы) в зависимости от диапазона измерений, удобно использовать единицы, большие или меньшие по величине. Эти *кратные* и *долные единицы* отличаются от системных по порядку величины и обозначаются с помощью соответствующих десятичных приставок (табл. 1).

**Диапазон восприятия органов чувств.** Органы чувств человека являются источником информации об окружающем мире. Они помогают ему приспособиться к изменениям внешней среды. Вместе с тем у органов чувств сравнительно узкий диапазон воспринимаемых информационных сигналов.

Например, органы *осзания* не позволяют отличать друг от друга мелкие шероховатости и различать слабые раздражители. Рецепторы *вкуса* чувствительны только к ограниченному набору химических соединений

Таблица 1

### Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Степень	Приставка	Символ	Пример	Степень	Приставка	Символ	Пример
$10^{18}$	экса-	Э	эксаджоуль, ЭДж	$10^{-1}$	деци-	д	децибел, дБ
$10^{15}$	пета-	П	петаватт, ПВт	$10^{-2}$	санти-	с	сантиметр, см
$10^{12}$	тера-	Т	терагерц, ТГц	$10^{-3}$	милли-	м	миллиметр, мм
$10^9$	гига-	Г	гигавольт, ГВ	$10^{-6}$	микро-	мк	микрограмм, мкг
$10^6$	мега-	М	мегаватт, МВт	$10^{-9}$	нано-	н	нанометр, нм
$10^3$	кило-	к	килоом, кОм	$10^{-12}$	пико-	п	пикофарад, пФ
$10^2$	гекто-	г	гектопаскаль, гПа	$10^{-15}$	фемто-	ф	фемтометр, фм
10	дека-	да	деканьютон, даН	$10^{-18}$	атто-	а	аттокулон, аКл



и веществ. Органы *обоняния* реагируют лишь на некоторые газы, пары и их смеси в узком диапазоне концентрации. Достаточно велики возможности восприятия звука малой и большой громкости (интенсивности) органами *слуха*. Однако частотный диапазон сигналов, принимаемых человеческим ухом, ограничен (16 Гц — 20 кГц). Через орган *зрения* человек получает наибольший объём информации по сравнению с другими органами чувств. Однако человеческий глаз не может воспринимать излучение сверхвысокой интенсивности и различать последовательные короткие сигналы (длительностью менее 0,05 с). Видимый свет занимает чрезвычайно узкий (по сравнению со спектром возможных излучений) диапазон длин волн от 0,38 до 0,78 мкм. Крайне невелика и разрешающая способность глаза: минимальный размер объекта, различаемого глазом, оказывается около 50—80 мкм.

Вспомним притчу о пяти слепых, пытавшихся представить себе, что такое слон. Первый слепой, взобравшийся на спину слона, считал, что это стена. Второй, ощупывающий ногу слона, решил, что это колонна. Третий, взявший в руки хобот, принял его за трубу. Слепой, дотрагивающийся до бивня, думал, что это сабля, а слепой, поглаживающий хвост слона, заподозрил, что это верёвка.

Аналогично недостаток чувственных восприятий, казалось бы, неизбежно должен привести к неоднозначным и противоречивым представлениям о структуре окружающего мира. «Жизненный опыт» оказывается недостаточным при изучении явлений, характеризующихся пространственными размерами и временным интервалом, недоступными для непосредственного наблюдения. В этих условиях дополнительную информацию можно получить с помощью приборов и экспериментальных установок. Они существенно расширяют диапазон принимаемых информационных сигналов.

**Физика и культура.** Взаимосвязи физики и культуры многогранны. Художественная литература является источником знаний о единстве мира, путях его познания, о возможных направлениях развития приложений физических явлений (научная фантастика). Физические основы акустики совершенствуют запись и воспроизведение звука, музыкальных произведений, рассматривая музыкальные инструменты как физико-акустические приборы. В то же время компьютерная обработка информации позволяет интенсифицировать изобразительные средства телевидения и кинематографа. Новые строительные материалы, разрабатываемые в научных лабораториях, дают возможность современной архитектуре существенно совершенствовать строительные конструкции и проектировать их на основе физических законов. Радиоуглеродный метод геохронологии позволяет с большой точностью определить как возраст древнейших памятников культуры (рукописей, картин, скульптур, строений и т. д.), так и время вымирания доисторических животных.

## В О П Р О С Ы

1. Что является предметом изучения физики?
2. Почему именно Галилео Галилея считают первым физиком?
3. Какие физические величины называют базовыми или основными?
4. Почему ограниченность диапазона восприятия органов чувств препятствует формированию научных представлений об окружающем мире?
5. Чем ограничен диапазон восприятия органов осязания, вкуса, обоняния и слуха? Что компенсирует недостаток восприятия органов чувств человека при формировании представлений о структуре окружающего мира?

## § 2. Эксперимент. Закон. Теория

**Особенности научного эксперимента.** Суть любого научного эксперимента состоит в наблюдении явления и измерении физических величин, его характеризующих.

В ходе эксперимента выявляют характер изменения наблюдаемых величин или их постоянство. Результаты таких исследований формулируются в виде определённых количественных и качественных закономерностей.

*Физический закон — соотношение между физическими величинами, устойчиво проявляющееся при определённых условиях в эксперименте.*

Особая ценность закона, полученного из опыта, состоит в том, что с его помощью часто можно описать не только изучаемое явление, но и ряд других явлений и экспериментов. Сравнительно небольшого числа основных, фундаментальных физических законов достаточно для описания многих природных явлений.

*Научная гипотеза* является предположением о том, что существует связь между известным и вновь объясняемым явлением.

Дав количественное описание падения тел на землю, Галилей не ответил на вопрос, почему они падают. **Исаак Ньютон**, основоположник фундаментальной физической теории, высказал гипотезу, согласно которой причина падения тел — притяжение их к Земле. Ньютоном же была создана классическая теория тяготения.

*Научная теория содержит постулаты, определения, гипотезы и законы, объясняющие наблюдаемое явление.*

Результаты теории постоянно проверяются *экспериментом*, являющимся *критерием правильности теории*.

Ни одна физическая теория не может быть признана окончательной и верной навсегда. Всегда существует вероятность, что новые наблюдения потребуют её уточнения или создания новой теории.



**Фундаментальные физические теории.** Особую роль в физике играет *фундаментальная* теория, способная предсказывать новые экспериментальные эффекты, которые не могут быть объяснены в рамках прежней теории. Примером является общая теория относительности *Альберта Эйнштейна*. Она количественно точно по сравнению с теорией тяготения Ньютона описала отклонение светового луча в поле тяготения.

Особенностью фундаментальных физических теорий является их *пре-емственность*. Более общая теория включает частные, уже известные законы и определяет границы применимости предыдущей теории. Так, механика Ньютона в течение двух столетий прекрасно описывала поведение макроскопических тел. Однако движение тел со скоростью, близкой к скорости света, она объяснить не смогла. Специальная теория относительности Эйнштейна, основанная на постулатах, отличных от ньютоновских, объяснила законы движения тел, движущихся со скоростью, сравнимой со скоростью света, например элементарных частиц, испускаемых Солнцем. Для небольшой скорости (много меньшей скорости света) результаты теории относительности совпадают с результатами классической механики Ньютона. Это совпадение и определяет одну из границ применимости теории Ньютона.

**Модельные приближения.** Физические законы — лишь ступени познания окружающего мира. Изучение природных явлений часто невозможно без введения упрощающих предположений.

Подобные приближения называют *модельными*. В разговорной речи слово «модель» используется применительно к небоскрёбу, железной дороге, демонстраторам одежды и т. д.

**Модель в физике — упрощённый аналог физической системы (процесса), сохраняющий её (его) главные черты.**

Например, при изучении полёта теннисного мяча в воздухе следует иметь в виду, что он не идеально сферичен и не идеально твёрд. На его движение оказывают влияние сопротивление воздуха и ветер. При движении мяч может вращаться, а сила тяжести, действующая на него, изменяется с высотой. Строго говоря, следует принимать во внимание и вращение Земли. Однако, если учитывать все эти факторы, проанализировать движение мяча практически невозможно. Тем не менее, пренебрегая размерами мяча, сопротивлением воздуха, вращением Земли и считая постоянной силу тяжести, можно рассчитать, что мяч движется по параболической траектории. Результаты теоретического расчёта достаточно точно описывают реальную траекторию движения мяча (хотя и несколько отличающуюся от параболической). Это означает, что создан-

ная модель содержит главные черты системы, а мы пренебрегли не самыми существенными её характеристиками. В то же время теория принципиально расходится с экспериментом, если пренебречь силой притяжения мяча к Земле. В этом случае мяч должен двигаться равномерно и прямолинейно, а не по параболе.

**Пределы применимости физической теории.** Успех описания явления зависит от того, насколько удачно выбрана физическая модель, насколько она адекватна явлению.

Для описания сложных физических систем используется целый ряд стандартных физических моделей: материальная точка, абсолютно твёрдое тело, математический маятник, идеальный проводник, изолятор и т. д.

*Любая теория является описанием некоторой модели физической системы, некоторым приближением к реальности* и поэтому в дальнейшем может быть развита и обобщена. В этом смысле одни и те же модели могут использоваться для объяснения различных физических явлений. Эйнштейна восхищало то, что «можно так много сделать, зная так мало».

### В О П Р О С Ы

1. В каком случае соотношение между физическими величинами можно назвать физическим законом?
2. В чём ценность фундаментальных законов?
3. Перечислите основные компоненты физической теории.
4. Для чего в физике вводят модельные приближения?
5. Приведите примеры стандартных физических моделей.

## § 3. Идея атомизма

**Атомистическая гипотеза.** Греческий философ *Демокрит* в V в. до н. э. предположил, что *все вещества состоят из невидимых человеческим глазом малых частиц — атомов* (от греч. atomos — неделимый). Атомистическая гипотеза впервые в научном познании предполагала существование объектов, недоступных восприятию органов чувств человека. На протяжении многих лет такие выдающиеся учёные, как М. В. Ломоносов, А. Авогадро, Р. Клаузиус, Д. Бернулли, Ж. Перрен, Дж. Максвелл, Д. Гиббс, А. Эйнштейн, создавали теоретические и экспериментальные предпосылки для подтверждения атомистической гипотезы. Эта гениальная идея получила экспериментальное подтверждение в XIX в., в работах английского физика и химика *Джона Дальтона*. Объясняя химические превращения и реакции, он пришёл к выводу, что каждому химическому элементу соответствует свой тип мельчайших



невидимых атомов, а все вещества состоят из химических соединений атомов.

Последующая классификация атомов была осуществлена Д. И. Менделеевым в Периодической системе химических элементов в порядке возрастания массы. В настоящее время насчитывается всего 118 химических элементов. Это означает, что многообразный окружающий мир сконструирован примерно из сотни типовых блоков — атомов.

Современная техника позволила заглянуть непосредственно в глубь вещества — с помощью электронного микроскопа получены изображения атомов.

**Модели в микромире.** Исследования структуры вещества на меньших пространственных масштабах привели к открытию новых простейших кирпичиков мироздания. В 1897 г. английский физик *Джозеф Томсон* обнаружил ещё одну частицу — *электрон*. По своим характеристикам электрон не вписывается в Периодическую систему химических элементов Д. И. Менделеева.

Открытие английским физиком *Эрнестом Резерфордом* в 1911 г. атомного ядра привело к созданию *планетарной модели атома*. Согласно этой модели, атом состоит из *ядра*, вокруг которого вращаются электроны.

Последующие эксперименты (1914—1932) показали, что атомное ядро состоит из тяжёлых (по сравнению с электроном) частиц: электронной-нейтральных *нейтронов* и положительно заряженных *протонов*. Заряд протона равен по величине и противоположен по знаку отрицательному заряду электрона. В целом атом электронейтрален, так как число протонов в ядре равно числу электронов в атоме.

Число протонов в ядре определяет химические свойства атома и его место в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.

Согласно современным представлениям, протон и нейтрон являются сложными частицами, состоящими из трёх *кварков* (рис. 1).

К настоящему времени открыто свыше 400 различных *элементарных частиц*.

**Элементарная частица — микрообъект, который невозможно расщепить на составные части.**

Лёгкие частицы образуют группу *лептонов* (от *греч.* leptós — мелкий), а тяжёлые — группу *адронов* (от *греч.* hadrós — сильный). Особую группу составляют частицы — *переносчики взаимодействий* (например, *фотон* является переносчиком электромагнитного взаимодействия).

## В О П Р О С Ы

1. В чём состояла гипотеза Демокрита о строении вещества?
2. Какие выводы следовали из экспериментов Д. Дальтона?
3. От чего зависят химические свойства атома и его место в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева?
4. С помощью Интернета найдите, какова современная модель строения атома. Найдите в ней элементы модели атома по Резерфорду.
5. На какие три группы подразделяют элементарные частицы?

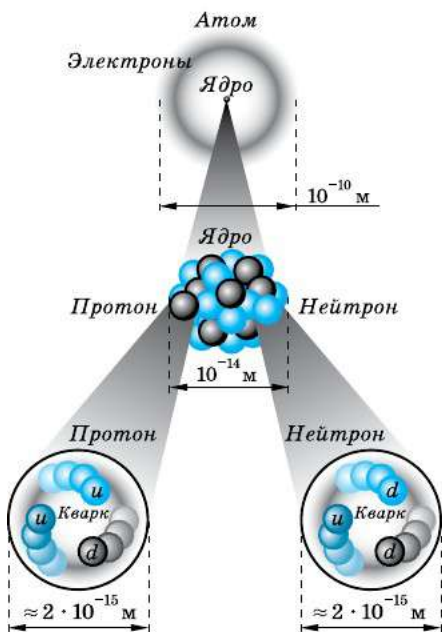
## § 4. Фундаментальные взаимодействия

**Виды взаимодействий.** Упорядоченность расположения небесных тел во Вселенной объясняется их взаимодействием друг с другом. Структура вещества этих тел стабильна благодаря связям между составляющими его частицами. Несмотря на то что в веществе содержится большое число различных элементарных частиц, существует лишь четыре вида фундаментальных взаимодействий между ними: *гравитационное, слабое, электромагнитное* и *сильное*. Все процессы и явления в природе (падение яблока, взрыв сверхновой звезды, прыжок кузнечика или радиоактивный распад веществ) происходят в результате этих взаимодействий.

**Фундаментальные взаимодействия** — взаимодействия, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействия.

**Характеристики взаимодействий.** *Гравитационное взаимодействие* универсально: в нём участвуют все элементарные частицы. Оно определяет движение планет, звёзд, галактик.

*Электромагнитное взаимодействие* связывает между собой заряженные частицы, например электроны и ядра в атомах и молекулах.









### ▲ 1

**Структура атома:** протон и нейтрон — частицы, состоящие из трёх кварков



Таблица 2

### Взаимодействия, в которых участвуют основные элементарные частицы

Лептон	Нейтральный (нейтрино)	Заряженный (электрон)	Цветовое обозначение взаимодействий		
			Гравитационное 	Слабое 	Электромагнитное 
Адрон	Нейтральный (нейтрон)	Заряженный (протон)			
					
Фотон					

*Слабое взаимодействие* присуще всем частицам, кроме фотона, и определяет радиоактивный распад тяжёлых элементов, реакции термоядерного синтеза на Солнце.

*Сильное взаимодействие* определяет связи только между адронами. Оно обеспечивает связь кварков в протонах и нейтронах, исключительную прочность связи протонов и нейтронов в ядрах атомов и тем самым стабильность вещества в земных условиях.

В таблице 2 представлены важнейшие элементарные частицы, принадлежащие к основным группам: адроны, лептоны, переносчики взаимодействий (например, фотоны). Там же показаны типы взаимодействий, в которых эти частицы могут участвовать.

Важнейшей характеристикой фундаментального взаимодействия является его *радиус действия* (табл. 3).

**Радиус действия взаимодействия — максимальное расстояние между частицами, за пределами которого их взаимодействием можно пренебречь.**

При малом радиусе действия взаимодействие называют *короткодействующим*, при большом — *дальнодействующим*.

*Сильное и слабое взаимодействия являются короткодействующими*. Их интенсивность быстро убывает при увеличении расстояния между частицами. Такие взаимодействия проявляются на небольшом расстоянии, недоступном для восприятия органами чувств. По этой причине сильное и слабое взаимодействия были открыты позже других, лишь в XX в., с помощью сложных экспериментальных установок.

Таблица 3

## Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

Взаимодействие	Взаимодействующие частицы	Радиус действия, м
Гравитационное	Все	$\infty$
Слабое	Все, кроме фотона	$10^{-17}$
Электромагнитное	Заряженные частицы	$\infty$
Сильное	Адроны	$10^{-15}$

*Электромагнитное и гравитационное взаимодействия являются дальнедействующими.* Такие взаимодействия медленно убывают при увеличении расстояния между частицами и не имеют конечного радиуса действия.

Физические представления о фундаментальных взаимодействиях постоянно уточняются.

В 1967 г. *Шелдон Глэшоу, Абдус Салам и Стивен Вайнберг* создали теорию, согласно которой электромагнитное и слабое взаимодействия представляют собой проявление *единого электрослабого взаимодействия*. Если взаимодействие между элементарными частицами происходит на расстоянии, меньшем радиуса действия слабых сил ( $10^{-17}$  м), то различие между электромагнитным и слабым взаимодействиями исчезает.

В настоящее время экспериментальную проверку проходит теория *«великого объединения»*. Согласно этой теории существуют лишь два типа взаимодействий: *объединённое* и *гравитационное*. Не исключено, что все четыре взаимодействия являются частными проявлениями единого взаимодействия. На предпосылках таких предположений мы остановимся более подробно при обсуждении теории возникновения Вселенной (модель Большого взрыва).

### В О П Р О С Ы

1. Как расположить в порядке возрастания интенсивности фундаментальные взаимодействия?
2. Для взаимодействия каких частиц характерно каждое фундаментальное взаимодействие?
3. Какие фундаментальные взаимодействия являются короткодействующими, а какие — дальнедействующими? Чему равен их радиус действия?
4. Какое взаимодействие называют электрослабым?
5. Какие взаимодействия описывает теория «великого объединения»?

## ТВОРЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Напишите эссе «Эксперименты в моей жизни».
2. Какие события, происходящие с вами в школьной жизни, в семье, можно считать закономерностями? В чём отличие и общность этих и физических закономерностей? Ответ представьте в виде таблицы.
3. В каких взаимодействиях участвуете вы? Ответ представьте в виде схемы. Можно ли назвать эти взаимодействия фундаментальными? Почему?
4. Подготовьте фотоальбом «Идея атомизма: прошлое, настоящее, будущее».
5. В каких величинах «измеряются» доброта, толерантность, любовь?

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Физика** — наука, занимающаяся изучением самых общих закономерностей явлений природы, свойств и структуры окружающего нас мира.
- **Базовые физические величины** — величины, через которые выражаются все остальные. Базовыми физическими величинами в механике являются длина, время и масса.
- **Органы чувств** человека являются источником информации об окружающем мире.
- **Физический закон** — соотношение между физическими величинами, устойчиво проявляющееся при определённых условиях в эксперименте.
- **Научная теория** содержит постулаты, определения, гипотезы и законы, объясняющие наблюдаемое явление. Критерий правильности теории — **физический эксперимент**.
- Границы применимости теории определяются физическими упрощающими предположениями, сделанными при постановке задачи и в процессе вывода соотношений.
- **Модель в физике** — упрощённый аналог физической системы (процесса), сохраняющий её (его) главные черты.
- **Элементарная частица** — микроскопический объект, который невозможно расщепить на составные части. Элементарные частицы подразделяются на три группы: адроны, лептоны, переносчики взаимодействий.
- **Фундаментальные взаимодействия** — взаимодействия, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействий. Существует четыре вида фундаментальных взаимодействий: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное.
- **Гравитационное взаимодействие** присуще всем частицам. Оно определяет процесс образования и структуру Вселенной.
- **Слабое взаимодействие** ответственно за взаимодействие всех частиц, кроме фотона.
- **Электромагнитное взаимодействие** связывает между собой частицы, содержащие электрические заряды. Оно объединяет атомы и молекулы в вещество.
- **Сильное взаимодействие** определяет связи только между адронами. Оно обуславливает связь кварков в протонах и нейтронах, связь протонов и нейтронов в атомном ядре.





## 2

## Кинематика материальной точки

### § 5. Траектория. Закон движения

**Описание механического движения.** Формой существования вещества во Вселенной является движение. Оно является причиной изменений, происходящих в окружающем нас мире. По поверхности Земли и вблизи неё перемещаются, например, вода, песок, атмосферный воздух, транспорт и т. д. Земля вращается вокруг собственной оси и вокруг Солнца, которое вместе со всеми планетами Солнечной системы перемещается относительно центра Галактики. Вселенная как целое расширяется. В движении участвует каждый атом любого тела.

Движение тела как целого относительно других тел с течением времени называют *механическим движением*.

*Кинематика изучает механическое движение тел, не рассматривая причины, которыми это движение вызывается.* Для описания механического движения тела необходимо знать положение тела в пространстве в любой момент времени. Указать положение тела при его движении одной точкой можно лишь в случае, когда размеры и форма тела несущественны.

Например, при описании полёта пули к мишени нет необходимости учитывать размеры пули. Поэтому в механике часто используется простейшая физическая модель — *материальная точка*.

---

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

---

Землю, движущуюся вокруг Солнца, можно рассматривать как материальную точку, так как радиус Земли много меньше расстояния от Зем-





ли до Солнца ( $R_{\oplus} \ll r_{\odot}$ ). Подобное неравенство в физике означает, что  $R_{\oplus}$  меньше  $r_{\odot}$  по крайней мере на порядок, т. е.  $R_{\oplus} < 0,1r_{\odot}$ .

В то же время Землю нельзя считать материальной точкой во всех «земных» задачах, когда рассматривается движение самолётов, кораблей, поездов, автомобилей.

Указать положение материальной точки в реальном физическом пространстве можно лишь относительно положения других тел.

**Тело отсчёта** — произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение движущейся материальной точки (или тела).

При описании механического движения космических ракет, искусственных спутников Земли в качестве тела отсчёта обычно рассматривают Землю, считая её неподвижной материальной точкой. При описании движения Земли и планет за тело отсчёта принимается Солнце.

**Траектория.** Очень важным понятием при описании движения тела является *траектория* — последовательность точек (линия), в которых находилось тело в процессе своего движения.

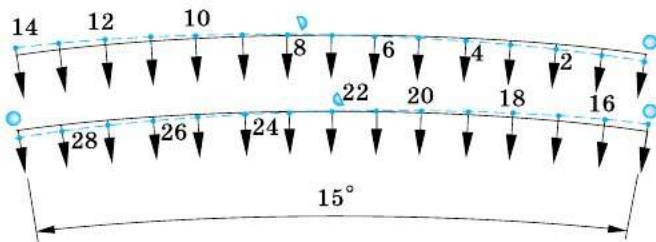
В разных системах отсчёта траектория движения материальной точки может быть различной (рис. 2, 3). Возможно и непосредственное наблюдение траектории материальной точки: искры, летящие при сварке; след в небе от ракеты или реактивного самолёта; линия, рисуемая мелом на доске или ручкой в тетради; лыжный след.

**Закон движения.** Положение материальной точки в пространстве в произвольный момент времени (например, теннисный мяч, движущийся



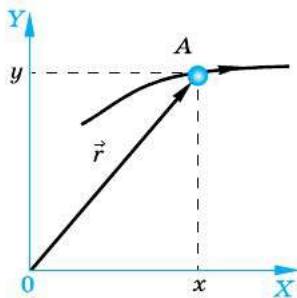
▲ 2

Траектория Луны относительно Земли (геоцентрическая система отсчёта)



▲ 3

Траектория Луны относительно Солнца (гелиоцентрическая система отсчёта). Пунктир — траектория Земли, стрелки направлены к Солнцу



щийся относительно Земли) можно определить, если ввести систему отсчёта.

**Система отсчёта — совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и часов.**

Выберем произвольное начало отсчёта и координатные оси  $X$  и  $Y$  (рис. 4). Отметим положение  $A$  материальной точки в произвольный момент времени  $t$ .

Совокупность координат  $x(t)$ ,  $y(t)$  в момент времени  $t$  определяет закон движения материальной точки в координатной форме. В дальнейшем материальную точку мы будем называть либо частицей, либо телом.

Положение точки можно задать и с помощью радиуса-вектора  $\vec{r}$ , проведённого из начала отсчёта в данную точку.

**Закон (или уравнение) движения в векторной форме** — зависимость радиуса-вектора от времени.

Вектор  $\vec{r}(t)$  на рисунке 5 отслеживает движение пчелы относительно начала отсчёта системы  $XYZ$ . Рассмотрим связь радиуса-вектора и координат тела в произвольный момент времени. Для простоты перейдём от движения в трёхмерном пространстве к движению на плоскости (рис. 6).

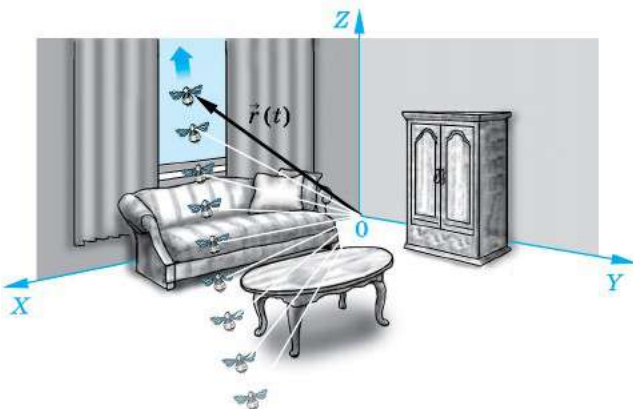
Предположим, что в момент времени  $t$  движущееся тело проходит точку  $A$ . Длина радиуса-вектора (или его модуль  $|\vec{r}| = r$ ) характеризует расстояние, на котором точка  $A$  находится от начала координат. На таком же расстоянии от точки  $O$  находятся все точки, лежащие на окружности радиусом  $r$ . Дополнительную информацию о положении точки  $A$  даёт угол  $\alpha$ , который вектор  $\vec{r}$  образует с осью  $X$ . Координаты  $x$  и  $y$  связаны с  $r$  и  $\alpha$  следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha, \\ y = r \sin \alpha. \end{cases}$$

Проекция радиуса-вектора на координатную ось равна координате тела по этой оси:

$$r_x = x, \quad r_y = y. \quad (1)$$

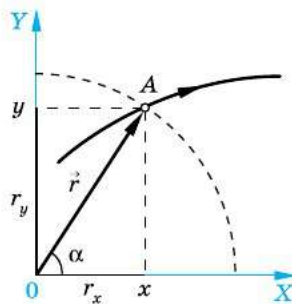
Проекции вектора на координатные оси  $X$  и  $Y$  — скалярные величины.



## ▲ 5

*Изменение радиуса-вектора с течением времени при полёте пчелы*

Таким образом, от векторной записи закона движения к скалярной можно перейти через проекции на оси  $X$  и  $Y$ .



## ▲ 6

*Связь радиуса-вектора с координатами в произвольный момент времени*

$$\begin{cases} r_x = x, \\ r_y = y \end{cases}$$

## В О П Р О С Ы

1. Какое движение называется механическим?
2. В каком случае тело можно считать материальной точкой?
3. Что составляет систему отсчёта?
4. Произойдёт ли столкновение двух кораблей, если траектории их движения пересекаются?
5. Зависимость какой величины от времени определяет закон движения тела?

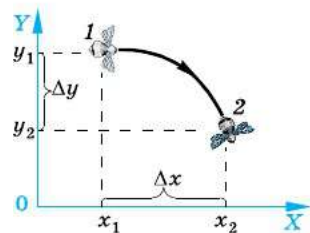
## § 6. Перемещение

**Перемещение — векторная величина.** Изменение положения движущегося тела в пространстве можно характеризовать либо изменением его координат, либо изменением радиуса-вектора.

**Изменение любой величины — разность её конечного и начального значений.**

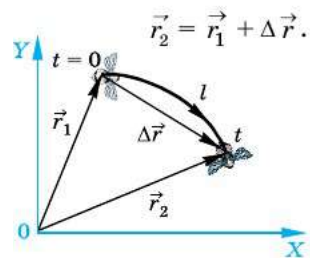
Изменение координат при движении материальной точки может быть как положительным, так и отрицательным (рис. 7).





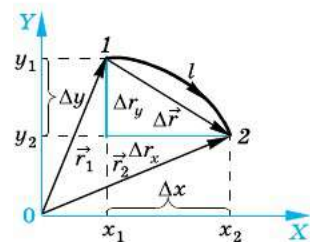
## ▲ 7

Изменение координат пчелы при движении между точками 1 и 2



## ▲ 8

Перемещение — изменение радиуса-вектора



## ▲ 9

Взаимосвязь векторного и координатного описания перемещения частицы

Например, при перемещении пчелы из точки 1 в точку 2 координата пчелы по оси  $X$  возрастает ( $x_2 > x_1$ ), поэтому изменение координаты положительно ( $\Delta x = x_2 - x_1 > 0$ ). По оси  $Y$  координата пчелы уменьшается ( $y_2 < y_1$ ), следовательно, изменение координаты отрицательно ( $\Delta y = y_2 - y_1 < 0$ ).

Рассмотрим изменение радиуса-вектора при движении материальной точки.

На рисунке 8 начальное и конечное положения пчелы характеризуются не координатами, а начальным  $\vec{r}_1$  и конечным  $\vec{r}_2$  радиусами-векторами.

Вектор  $\Delta\vec{r}$ , проведённый из конца радиуса-вектора  $\vec{r}_1$  в конец радиуса-вектора  $\vec{r}_2$ , называют *перемещением* тела за промежуток времени  $t$ .

**Перемещение — вектор, проведённый из начального положения материальной точки в конечное.**

Перемещение характеризует изменение радиуса-вектора материальной точки:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Перемещение показывает, на какое расстояние и в каком направлении смещается тело из начального положения за данное время.

Модуль вектора перемещения  $\Delta\vec{r}$  не равен в общем случае *пути*  $l$ , пройденному телом (см. рис. 8).

**Путь — расстояние, пройденное телом вдоль траектории.**

Совмещение рисунков 7 и 8 показывает (рис. 9), что проекция вектора перемещения на ось  $X$  совпадает с изменением координаты по оси  $X$  ( $\Delta r_x = \Delta x$ ). Соответственно проекция вектора  $\Delta\vec{r}$  на ось  $Y$  равна изменению координаты  $y$  ( $\Delta r_y = \Delta y$ ). Подобные равенства ещё раз подчёркивают взаимосвязь и эквивалентность векторного и координатного методов описания движения.



**Сложение перемещений.** Перемещение — векторная величина, поэтому действия с векторами перемещений подобны действиям с любыми векторами.

Так, результирующее перемещение автомобиля из точки  $A$  в точку  $C$  (рис. 10) складывается из двух последовательных перемещений (из точки  $A$  в точку  $B$  и из точки  $B$  в точку  $C$ ). Перемещение автомобиля из точки  $A$  в точку  $B$ , лежащую на середине расстояния  $AC$ , равно вектору  $\vec{d}/2$ . Таким же вектором  $\vec{d}/2$  определяется перемещение из точки  $B$  в точку  $C$ , а  $AC = \vec{d}$ .

**Результирующее перемещение равно векторной сумме последовательных перемещений.**

Сложение перемещений, направленных под углом друг к другу, удобно выполнять по правилу треугольника (рис. 11).

При движении автомобиля по пути  $ADC$  перемещение из точки  $A$  в точку  $C$  равно

$$\vec{d} = \vec{a} + \vec{b}.$$

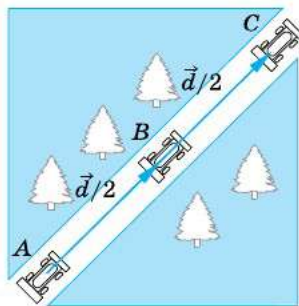
Результирующее перемещение — вектор, проведённый из начала первого перемещения  $\vec{a}$  в конец второго  $\vec{b}$ . Выбор пути  $AEC$  соответствует перемещению  $\vec{d} = \vec{b} + \vec{a}$ .

*Результат сложения перемещений не зависит от последовательности, в которой происходят эти перемещения.*

**Путь и перемещение.** Расстояние, на которое смещается движущаяся материальная точка от начального положения, и направление, в котором это смещение происходит, характеризует *векторная величина — перемещение*.

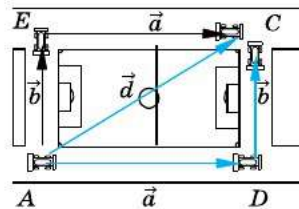
Результирующее расстояние, которое проходит материальная точка, двигаясь из начального положения в конечное, определяет положительная *скалярная величина — путь*.

Если тело движется прямолинейно из точки 1 в точку 2, расстояние между которыми  $l$ , то пройденный путь равен  $l$  (рис. 12). Модуль вектора перемещения, соединяющего эти точки, также равен  $l$ .



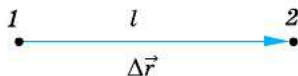
### ▲ 10

*Результирующее перемещение при прямолинейном движении*



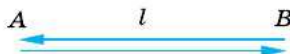
### ▲ 11

*Результирующее перемещение при изменении направления движения*



### ▲ 12

Равенство модуля вектора перемещения и пройденного телом пути при прямолинейном движении в одном направлении:  $\Delta r = l$



### ▲ 13

Отличие модуля перемещения от пройденного пути при прямолинейном движении с изменением направления

Путь равен модулю вектора перемещения только при прямолинейном движении в одном направлении.

Если направление прямолинейного движения изменяется, то путь больше модуля вектора перемещения.

Например, автобус, движущийся из пункта  $A$  в пункт  $B$ , а затем возвращающийся обратно в  $A$ , проходит путь  $2l$  (рис. 13). При этом его перемещение за время движения равно нулю:

$$\vec{AB} + \vec{BA} = 0.$$

При криволинейном движении путь тоже больше модуля перемещения, так как длина дуги всегда больше длины стягивающей её хорды (см. рис. 8).

## В О П Р О С Ы

1. Что характеризует вектор перемещения?
2. Дайте определение пути, пройденного телом. Может ли путь быть меньше модуля вектора перемещения?
3. При каком движении путь, пройденный телом, равен модулю перемещения?
4. Будет ли путь равен модулю перемещения при вращательном движении?
5. Найдите путь и перемещение конца минутной стрелки часов длиной 10 см, совершившей полный оборот.

## § 7. Скорость

**Средняя путевая скорость.** Изменение положения движущегося тела в пространстве характеризуют векторная величина — перемещение и скалярная — путь. Однако они не показывают, как быстро происходит это изменение.

Для того чтобы узнать, кто бежит быстрее, спортсмены пробегают определённую дистанцию (например, 100 м). Чем меньше времени затрачивает

спортсмен, тем быстрее он бежит, тем больше его *скорость*. Скорость является пространственно-временной характеристикой движения тела.

Сравнивать скорость бегунов можно и иначе: по расстоянию, которое они пробегают за одно и то же время (например, за 1 с). Чем больше это расстояние, тем больше скорость спортсмена.

Если автомобиль проехал путь  $l = 500$  м за промежуток времени  $t = 20$  с (рис. 14), то можно предположить, что за секунду он проезжал 25 м. Однако на самом деле в течение первых пяти секунд автомобиль мог двигаться медленно, следующие восемь секунд стоять, а последние семь секунд двигаться очень быстро. Поэтому путь, который тело проходит в среднем за секунду, характеризует *среднюю путевую скорость*.

**Средняя путевая скорость** — скалярная величина, равная отношению пути к промежутку времени, затраченному на его прохождение:

$$v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}. \quad (2)$$

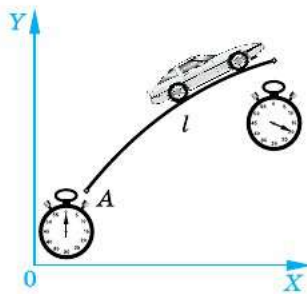
Единица скорости — *метр в секунду* (м/с). Часто используют и другие единицы, например км/ч.

Средняя скорость движения некоторых тел очень мала: ледники «текут» со скоростью около метра в неделю, разломы земной коры смещаются на несколько сантиметров в год, Луна удаляется от Земли на 4 см в год.

**Мгновенная скорость.** Средняя скорость, как и любая средняя величина, является достаточно приблизительной характеристикой движения. Так, стрелка спидометра автомобиля, проезжающего по городу 15 км за 30 мин (со средней скоростью 30 км/ч), не замрёт на цифре 30, а будет показывать *скорость движения в данный момент времени (в данное мгновение)* — *мгновенную скорость*. Чем меньше интервал времени, тем меньше за это время успевает измениться скорость, тем точнее её можно определить (рис. 15).

Если за промежуток времени  $\Delta t$  частица проходит путь  $\Delta l$ , то модуль мгновенной скорости (или просто скорость) определяется следующим образом:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (\text{при } \Delta t \rightarrow 0). \quad (3)$$



### ▲ 14

Средняя скорость прохождения пути

$$\text{автомобилем } v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}$$



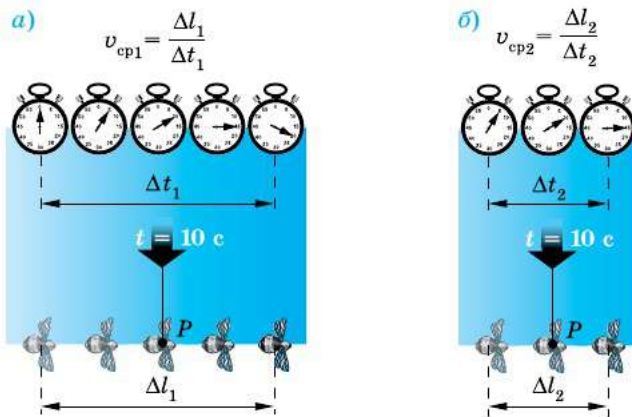


## 15 ▶

Определение мгновенной скорости из опыта:

а — оценка мгновенной скорости пчелы в точке  $P$  в момент времени  $t = 10$  с ( $\Delta t_1 = 20$  с);

б — приближение средней скорости  $v_{cp}$  по величине к мгновенной при уменьшении интервала времени ( $\Delta t_2 = 10$  с)



Например, если за очень малый промежуток времени  $\Delta t = 10^{-6}$  с (одна миллионная доля секунды) тело проходит путь  $\Delta l = 10$  мкм =  $10^{-5}$  м, то его скорость, согласно формуле (3), равна

$$v = \frac{10^{-5} \text{ м}}{10^{-6} \text{ с}} = 10 \text{ м/с.}$$

Это означает, что, продолжая двигаться с той же скоростью (с которой тело двигалось  $10^{-6}$  с) в течение секунды, тело прошло бы путь 10 м. В этом и заключается физический смысл модуля мгновенной скорости.

Модуль мгновенной скорости численно равен расстоянию, которое может пройти тело за единицу времени, продолжая двигаться так же, как оно двигалось в данный момент времени.

В таблице 4 приведена примерная скорость различных объектов.

**Вектор скорости.** По формуле (3) можно найти лишь модуль мгновенной скорости, но не её направление. Для определения скорости как вектора воспользуемся другой векторной величиной — перемещением.

На рисунке 16 показаны векторы перемещения  $\Delta \vec{r}_1, \Delta \vec{r}_2, \Delta \vec{r}_3, \Delta \vec{r}_4$  самолёта относительно точки 0, пролетающего последовательно по криволинейной траектории точки 1, 2, 3, 4. Для определения мгновенной скорости самолёта в точке 0 рассмотрим, согласно формуле (3), предельный переход к малым интервалам времени. Чем меньше время полёта, отсчитываемое от 0, тем на меньшее расстояние  $\Delta l$  удаляется самолёт от этой точки. При  $\Delta t \rightarrow 0$  самолёт как бы обратимо фиксируется видеокамерой в точках 4, 3, 2, 1. При этом вектор перемещения самолёта, соединяющий начальную и конечную точки, поворачивается против хода часовой стрелки, уменьшаясь по длине. При неограниченном уменьшении интервала времени длина дуги  $\Delta l$ , уменьшаясь, стремится к длине хорды  $\Delta r$ . Заменяя

Таблица 4

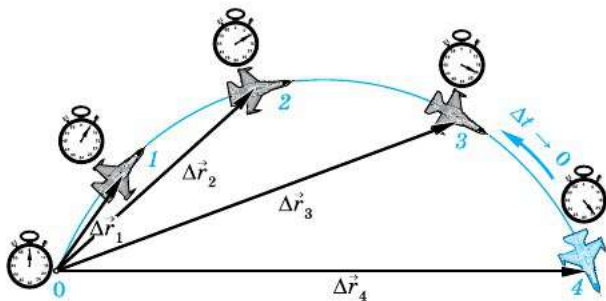
## Примерная скорость различных объектов

Объект	Скорость, м/с	Объект	Скорость, м/с
Муравей	0,01	Реактивный истребитель	800
Пловец	2	Луна вокруг Земли	1000
Спринтер	11	Спутник связи	3000
Автомобиль (в городе)	15	Искусственный спутник Земли (околоземная круговая орбита)	7900
Рыба-парусник	30	Земля вокруг Солнца	29600
Спортивный автомобиль	70	Радиоволны, свет, рентгеновское излучение	300000000
Авиалайнер	270		
Звук в воздухе (при 20 °С)	343		
Реактивный автомобиль	340		
Пуля	700		

в формуле (3)  $\Delta l$  на вектор перемещения  $\Delta \vec{r}$  за промежуток времени  $\Delta t$ , можно определить вектор мгновенной скорости.

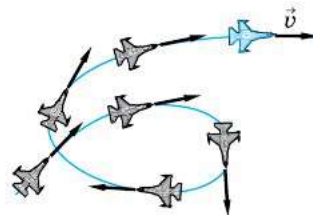
**Скорость (мгновенная скорость)** — векторная физическая величина, равная отношению перемещения тела к предельно малому промежутку времени, за который это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (4)$$



## ▲ 16

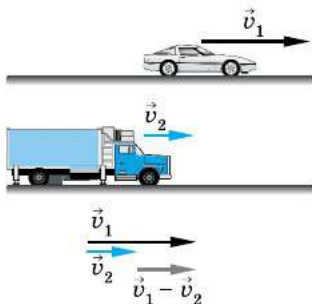
Переход к предельно малым интервалам времени



## ▲ 17

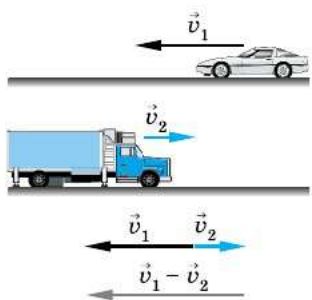
Направление вектора мгновенной скорости самолёта (касательная к траектории в сторону движения)





### ▲ 18

*Относительная скорость при движении в одном направлении*



### ▲ 19

*Относительная скорость при встречном движении*

Пропорциональность векторов  $\vec{v}$  и  $\Delta\vec{r}$  (коэффициент пропорциональности равен  $\frac{1}{\Delta t}$ ) означает, что направление скорости  $\vec{v}$  совпадает с направлением перемещения  $\Delta\vec{r}$ . При  $\Delta t \rightarrow 0$  вектор  $\Delta\vec{r}$  соединяет две бесконечно близкие точки на траектории. Следовательно, вектор  $\Delta\vec{r}$ , так же как и вектор  $\vec{v}$ , *направлен по касательной к траектории*.

*Мгновенная скорость тела направлена по касательной к траектории тела в сторону его движения* (рис. 17). В дальнейшем для краткости мы будем опускать слово «мгновенная».

**Относительная скорость.** Предположим, что скорость двух материальных точек  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  определена в одной и той же системе отсчёта.

*Относительная скорость* — скорость одной материальной точки в системе отсчёта, связанной с другой. Если тела движутся поступательно, относительная скорость равна разности скоростей этих тел:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2. \quad (5)$$

При движении тел в одном направлении модуль относительной скорости равен разности скоростей (рис. 18). При встречном движении (рис. 19) тела сближаются с относительной скоростью, равной сумме их скоростей, поэтому встречное столкновение автомобилей, поездов столь опасно.

## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте определение средней путевой скорости.
2. Как определяется мгновенная скорость при прямолинейном движении?
3. Может ли мгновенная скорость быть больше (меньше) средней скорости?
4. Что такое вектор мгновенной скорости? Куда он направлен? Почему?
5. Какая скорость называется относительной? В каком случае относительная скорость больше: при движении тел в одном направлении или при встречном?



## З А Д А Ч И

- Докажите, что средняя скорость автобуса, движущегося из пункта  $A$  в пункт  $B$  со скоростью  $v_1$ , а из  $B$  в  $A$  — со скоростью  $v_2$ , меньше либо равна  $(v_1 + v_2)/2$ .
- Самолёт пролетел первую треть пути со скоростью 1100 км/ч, а оставшийся путь — со скоростью 800 км/ч. Найдите среднюю скорость его полёта.
- Пассажир поезда, идущего со скоростью 60 км/ч, наблюдает встречный состав в течение 4 с. Длина каждого поезда 200 м. С какой скоростью двигался встречный состав?

## § 8. Равномерное прямолинейное движение

**График скорости.** При *прямолинейном движении* тела вектор скорости не изменяется по направлению, модуль скорости при этом может оставаться постоянным или изменяться с течением времени.

При *равномерном прямолинейном движении* за любые равные промежутки времени тело совершает равные перемещения.

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

$$\vec{v} = \text{const.}$$

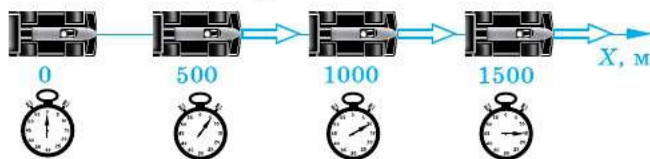
Рассмотрим равномерное прямолинейное движение болида «Формулы-1», движущегося со скоростью 100 м/с (рис. 20).

Выбрав ось  $X$  вдоль направления движения болида, можно утверждать, что проекция его скорости по оси  $X$  остаётся постоянной:

$$v_x = \text{const} = 100 \text{ м/с.}$$

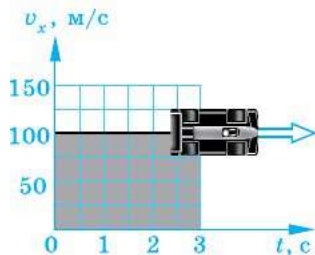
На рисунке 21 приведён график зависимости  $v_x(t)$ . С помощью графика скорости можно определить перемещение тела за определённый промежуток времени.

$$v_x = 100 \text{ м/с}$$



20

Равномерное прямолинейное движение болида «Формулы-1»



За 3 с болид пройдёт 300 м. Это расстояние численно равно площади прямоугольника под графиком скорости.

*Площадь прямоугольника под графиком зависимости проекции скорости движения от времени равна проекции перемещения тела за соответствующее время.*

Перемещение при равномерном прямолинейном движении тела по оси  $X$  за время  $t$  можно рассчитать так:

$$\Delta x = v_x t.$$

С учётом того, что

$$\Delta x = x - x_0,$$

получаем **закон равномерного прямолинейного движения:**

$$x = x_0 + v_x t.$$

Если совместить начало отсчёта оси  $X$  с начальной координатой ( $x_0 = 0$ ), то закон равномерного прямолинейного движения примет вид

$$x = v_x t. \quad (6)$$

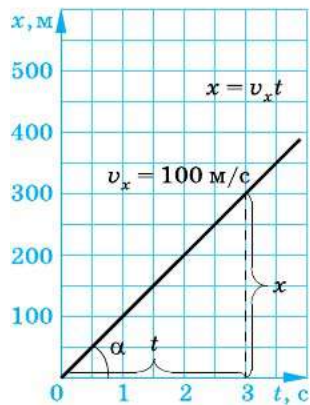
**График равномерного прямолинейного движения.** Графиком линейной зависимости (6) координаты тела от времени является прямая линия, проходящая через начало координат (при  $t = 0$ ,  $x = 0$ ). На рисунке 22 приведён график равномерного прямолинейного движения болида, перемещающегося со скоростью 100 м/с. По известной ординате  $x$  и абсциссе  $t$  из формулы (6) можно найти проекцию скорости:

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

Чем больше скорость движения тела, тем больше в данный момент времени ордината  $x$  и тем больше угол наклона  $\alpha$  прямой к оси  $X$ . Соответственно *большой угол наклона прямой*

## ▲ 21

*Графический способ нахождения перемещения при равномерном прямолинейном движении тела*



## ▲ 22

*График равномерного прямолинейного движения болида «Формулы-1», перемещающегося со скоростью 100 м/с*

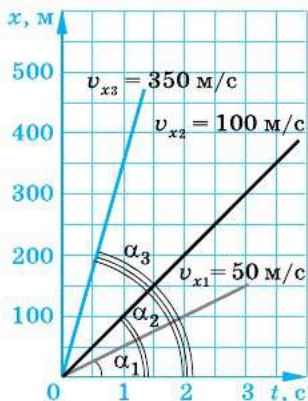
$x(t)$  означает большую скорость движения. На рисунке 23 для сравнения приведены графики движения автомобиля, болида и сверхзвукового гоночного автомобиля с реактивным двигателем, движущихся со скоростями 50, 100 и 350 м/с соответственно.

Чем круче идёт линия графика движения, тем больше скорость движения тела:

$$v_{x3} > v_{x2} > v_{x1}, \quad \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1.$$

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте основной отличительный признак равномерного прямолинейного движения.
2. При равномерном прямолинейном движении средняя скорость совпадает с мгновенной. Почему?
3. Как изменяется со временем координата тела при равномерном прямолинейном движении?
4. Как по графику зависимости  $v_x(t)$  определяется проекция перемещения тела на ось  $X$  при равномерном прямолинейном движении?
5. Как угол наклона графика зависимости  $x(t)$  при равномерном прямолинейном движении зависит от скорости?



### ▲ 23

*Графики движения тел, перемещающихся с различной скоростью*

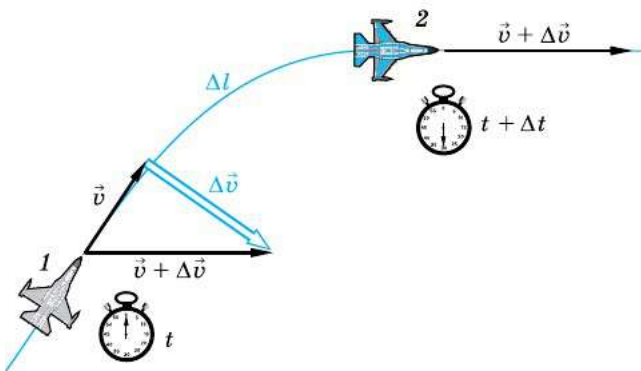
### З А Д А Ч И

1. Тело движется в направлении, противоположном оси  $X$ , со скоростью 200 м/с. Постройте график зависимости  $v_x(t)$ . Найдите графически перемещение тела по оси  $X$  за первые 4 с движения.
2. Постройте графики равномерного движения бегунов, стартующих из начала отсчёта в противоположных направлениях с проекциями скоростей  $v_{x1} = 5$  м/с и  $v_{x2} = -8$  м/с соответственно. Определите графически расстояние между бегунами через 5 с после начала движения.
3. Два поезда, находящиеся на расстоянии 750 км, движутся навстречу друг другу со скоростями  $v_1 = 150$  км/ч и  $v_2 = 200$  км/ч соответственно. Найдите графически и рассчитайте теоретически, через какой промежуток времени и на каком расстоянии от пункта 1 они встретятся.

## § 9. Ускорение

**Вектор мгновенного ускорения.** Равномерное прямолинейное движение характеризуется постоянной во времени скоростью, что крайне редко встречается в реальных условиях. В общем случае скорость движения





## 24

Изменение скорости  $\Delta v$  при криволинейном движении за промежуток времени  $\Delta t$

тела зависит от времени. Физической величиной, характеризующей изменение скорости с течением времени, является *ускорение*. Для определения мгновенного ускорения рассмотрим движение самолёта от точки 1 к точке 2 (рис. 24).

Расстояние  $\Delta l$  между точками 1, 2 самолёт пролетает за промежуток времени  $\Delta t$ . Набирая высоту, самолёт ускоряется, увеличивая скорость от  $\vec{v}$  (в точке 1) до  $\vec{v} + \Delta\vec{v}$  (в точке 2). Совместив начала векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{v} + \Delta\vec{v}$ , найдём их разность  $\Delta\vec{v}$  — изменение скорости за промежуток времени  $\Delta t$ . Отношение  $\Delta\vec{v}/\Delta t$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta t$  определяет *вектор мгновенного ускорения*:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (\text{при } \Delta t \rightarrow 0). \quad (7)$$

**Мгновенное ускорение — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости к предельно малому промежутку времени, в течение которого это изменение произошло.**

Размерность ускорения следует из определения и равна

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

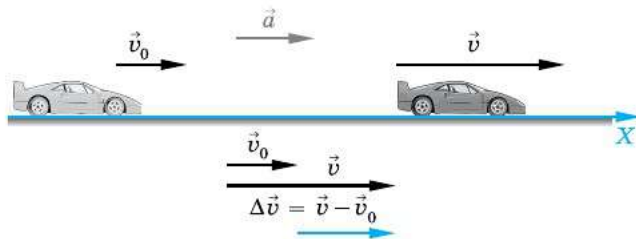
Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с<sup>2</sup>).

**Векторы ускорения при прямолинейном движении.** Найдём направление ускорения разгоняющегося автомобиля на прямолинейном участке пути (рис. 25).

25

Направление ускорения при прямолинейном ускоренном движении

$$\vec{a} \uparrow \vec{v}$$



Конечная скорость автомобиля больше начальной, поэтому вектор изменения скорости  $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$  ориентирован вдоль направления движения так же, как и вектор ускорения  $\vec{a}$ , всегда параллельный  $\Delta \vec{v}$ .

При прямолинейном ускоренном движении тела вектор ускорения параллелен (сонаправлен) вектору скорости:

$$\vec{a} \uparrow \vec{v}.$$

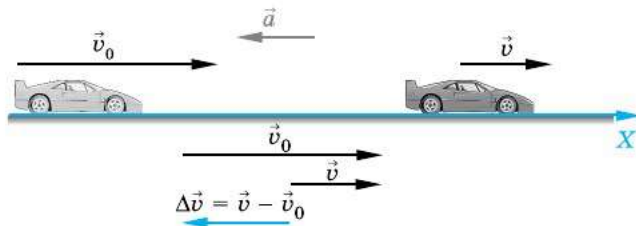
Вектор ускорения направлен вдоль траектории движения только тогда, когда она прямолинейная.

При торможении автомобиля на прямолинейном участке (рис. 26) конечная скорость  $v$  меньше начальной  $v_0$ , поэтому вектор изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  так же, как и вектор ускорения  $\vec{a}$ , направлен противоположно скорости.

26

Направление ускорения при прямолинейном замедленном движении

$$\vec{a} \downarrow \vec{v}$$



При прямолинейном замедленном движении тела вектор ускорения антипараллелен (направлен противоположно) вектору скорости:

$$\vec{a} \downarrow \vec{v}.$$

Направление и величина ускорения вместе с начальной скоростью и координатой определяют скорость и закон движения тела.

### В О П Р О С Ы

1. Какая физическая величина характеризует изменение скорости тела с течением времени?
2. Сформулируйте определение мгновенного ускорения.

3. При каком движении вектор ускорения направлен вдоль траектории?
4. Почему при прямолинейном ускоренном движении вектор ускорения параллелен вектору скорости?
5. Почему при прямолинейном замедленном движении вектор ускорения антипараллелен вектору скорости?

## § 10. Прямолинейное движение с постоянным ускорением

**Равноускоренное прямолинейное движение.** Зная ускорение и начальную скорость тела, можно найти его скорость в любой последующий момент времени. Если *модуль* ускорения тела, движущегося прямолинейно, остаётся постоянным, то движение тела может быть либо ускоренным (равноускоренное движение), либо замедленным (равнозамедленное движение), либо последовательной совокупностью этих движений (равнопеременное движение).

**Равноускоренное прямолинейное движение — прямолинейное движение, при котором ускорение параллельно (сонаправлено) скорости и постоянно по модулю:**

$$\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v},$$

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

В таблице 5 приведены примерные ускорения ряда объектов.

Таблица 5

### Примеры ускорений

Объект	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	Объект	Ускорение, м/с <sup>2</sup>
Электропоезд при начальном разгоне	0,6	Ракета при запуске спутника	60
Свободно падающее тело	9,8	Пуля в стволе автомата	$6 \cdot 10^5$

Рассмотрим *равноускоренное прямолинейное движение с некоторой начальной скоростью*. Пусть, имея в начальный момент времени ско-



рость  $v_{0x} = v_0 = 5$  м/с вдоль оси  $X$ , мотоциклист движется с постоянным ускорением  $a_x = a = 1$  м/с<sup>2</sup> (рис. 27, а).

Тогда его скорость в конце первой секунды ( $v_1$ ) будет 6 м/с, в конце второй ( $v_2$ ) — 7 м/с. Через 5 с скорость мотоциклиста станет равна

$$v_5 = 5 \text{ м/с} + 1 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ с} = 10 \text{ м/с}.$$

Запишем полученную зависимость в общем виде. В произвольный момент времени  $t$  скорость мотоциклиста вдоль оси  $X$  можно определить по формуле

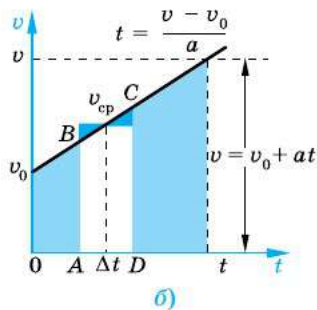
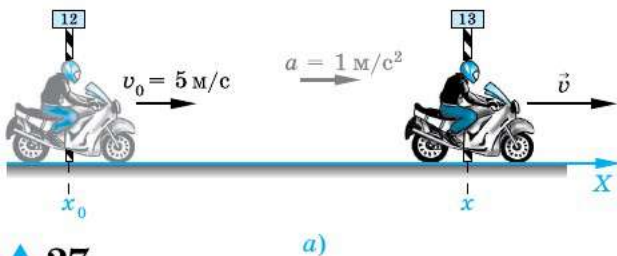
$$v = v_0 + at. \quad (8)$$

Таким образом, зависимость скорости тела от времени при равноускоренном прямолинейном движении является линейной.

Графиком зависимости  $v(t)$  является прямая линия с положительным тангенсом угла наклона (рис. 27, б), начинающаяся на оси ординат из точки  $v_0$ .

Для бесконечно малого интервала времени  $\Delta t$  можно считать, что скорость тела не изменяется и равна средней  $v_{cp}(\Delta t)$  скорости его движения за этот промежуток времени (см. рис. 27, б).

В случае неизменной скорости площадь прямоугольника под графиком  $v_{cp}(t)$  равна перемещению  $\Delta x$  тела за соответствующий промежуток времени  $\Delta t$ . Площадь этого прямоугольника равна площади трапеции  $ABCD$  под графиком зависимости скорости от времени. Перемещение тела за промежуток времени  $t$  складывается из отдельных последовательных перемещений за бесконечно малые интервалы времени  $\Delta t$ .



## ▲ 27

Равноускоренное прямолинейное движение:

а — начальные условия  $v_0 = 5$  м/с,  $x_0 = 12$  км;

б — линейная зависимость скорости движения по оси  $X$  от времени

Площадь фигуры под графиком зависимости скорости движения от времени численно равна перемещению тела вдоль оси  $X$  за время  $t$  при равноускоренном движении.

Как известно, площадь трапеции равна произведению полусуммы оснований на её высоту. В нашем случае основания равны  $v_0$  и  $(v_0 + at)$ , а высота —  $t$ . Соответственно

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

Учитывая, что перемещение по оси  $X$  равно разности конечной  $x$  и начальной  $x_0$  координат тела, получаем закон равноускоренного прямолинейного движения:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет рассчитать координату мотоциклиста (относительно километрового столба, мимо которого проедет мотоциклист, изображённый на рисунке 27) через 40 с после начала движения. Подставляя начальные данные  $x_0$ ,  $v_0$ , а также ускорение  $a$  и время  $t$  в формулу (9), получаем

$$x = \left( 12\,000 + 5 \cdot 40 + \frac{1 \cdot 40^2}{2} \right) \text{ м} = 13\,000 \text{ м} = 13 \text{ км}.$$

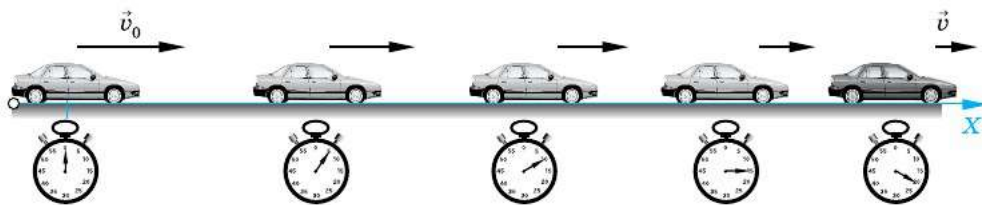
Это означает, что через 40 с, проехав 1 км, мотоциклист проедет мимо столба с отметкой 13 км.

**Равнозамедленное прямолинейное движение.** Так же часто, как равноускоренное движение, встречается и *равнозамедленное движение*.

**Равнозамедленное прямолинейное движение — прямолинейное движение, при котором ускорение антипараллельно (противоположно направлению) скорости и постоянно по модулю:**

$$\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}, \\ a = \text{const.}$$

При равнозамедленном движении вдоль оси  $X$  (например, при торможении автомобиля) ускорение направлено противоположно скорости (рис. 28).



## 28

Равнозамедленное прямолинейное движение (начальная скорость  $v_0$ , начальная координата  $x_0 = 0$ )

К моменту времени  $t$  скорость движения тела уменьшается на величину  $\Delta v = -at$ . Если начальная скорость движения тела равна  $v_0$ , то его скорость вдоль оси  $X$  в момент времени  $t$  можно найти из соотношения

$$v = v_0 - at. \quad (10)$$

Скорость тела при равнозамедленном прямолинейном движении линейно уменьшается с течением времени (рис. 29).

Перемещение при равнозамедленном движении тела, так же как и в случае равноускоренного движения, можно определить графически.

Перемещение за промежуток времени  $t$  при равнозамедленном движении численно равно площади трапеции под графиком зависимости скорости движения от времени.

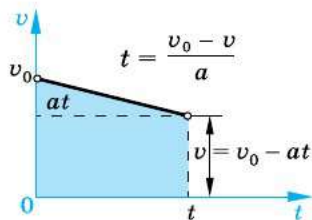
Основания трапеции равны  $v_0$  и  $v_0 - at$ , её высота равна  $t$ . Найдём площадь трапеции и, соответственно, перемещение тела:

$$\Delta x = \frac{v_0 + (v_0 - at)}{2} t.$$

Учитывая, что  $\Delta x = x - x_0$ , получаем закон равнозамедленного прямолинейного движения:

$$x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}. \quad (11)$$

29 ►  
Линейная зависимость скорости от времени при равнозамедленном движении вдоль оси  $X$ . Площадь трапеции численно равна перемещению  $\Delta x$  тела за промежуток времени  $t$





**Равнопеременное прямолинейное движение.** Если при равноускоренном прямолинейном движении  $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v}$ , при равнозамедленном  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}$ , то при равнопеременном движении взаимная ориентация этих векторов может изменяться.

**Равнопеременное прямолинейное движение — прямолинейное движение с постоянным по модулю и направлению ускорением:**

$$\vec{a} = \text{const.}$$

Например, равнопеременным является движение камня, брошенного с Земли вертикально вверх: как при его подъёме, так и при его спуске ускорение камня постоянно по модулю и направлено вниз.

В процессе этого движения изменяется направление скорости: при подъёме она направлена вверх, при спуске — вниз. Равнозамедленное движение камня вверх и последующее равноускоренное падение можно рассматривать как равнопеременное движение.

При равнопеременном движении проекция скорости тела на ось  $X$  зависит от времени следующим образом:

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \quad (12)$$

где  $v_{0x}$  и  $a_x$  — проекции начальной скорости и ускорения тела на ось  $X$ .

*Зависимости скорости от времени при равноускоренном (8) и равнозамедленном (10) движении можно рассматривать как частные случаи равнопеременного движения.*

В случае равноускоренного движения вдоль оси  $X$  проекции вектора начальной скорости и ускорения на эту ось — положительны (см. рис. 25):

$$v_{0x} = v_0, \quad a_x = a.$$

При равнозамедленном движении проекция на ось  $X$  вектора начальной скорости положительна, а вектора ускорения — отрицательна (см. рис. 26):

$$v_{0x} = v_0, \quad a_x = -a.$$

Учитывая это, выражения (9) и (11) можно обобщить, записав закон равнопеременного прямолинейного движения:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (13)$$

## В О П Р О С Ы

1. Какое понятие является наиболее общим: равноускоренное движение; равнозамедленное; равнопеременное?
2. Чем равноускоренное движение отличается от равнозамедленного, происходящего в том же направлении?
3. Определите направление ускорения авиалайнеров, если один ускоренно летит на восток, а другой — замедленно на запад.
4. Как определяется графически перемещение тела при равноускоренном и равнозамедленном движениях?
5. Какая кривая определяет зависимость координаты от времени при равнопеременном движении?

## З А Д А Ч И

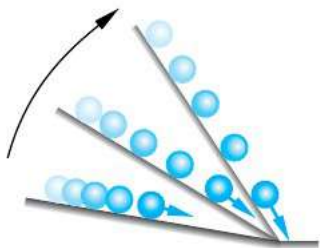
1. Через какой промежуток времени с момента старта мотоциклист, двигаясь с постоянным ускорением  $a = 5 \text{ м/с}^2$ , разовьёт скорость  $v = 90 \text{ км/ч}$ ? На каком расстоянии от места старта это произойдёт?
2. Используя данные задачи 1, постройте график зависимости скорости мотоциклиста от времени. Найдите графически перемещение мотоциклиста при достижении им скорости  $90 \text{ км/ч}$ .
3. Автомобиль движется в северном направлении со скоростью  $90 \text{ км/ч}$ . Найдите модуль и направление его постоянного ускорения при торможении перед светофором за  $4 \text{ с}$ . Рассчитайте длину тормозного пути автомобиля.

## § 11. Свободное падение тел

**Падение тел в отсутствие сопротивления воздуха.** Самый распространённый вид равнопеременного движения — свободное падение тел в поле тяготения Земли.

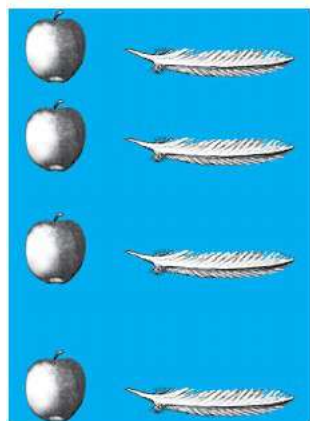
**Все тела независимо от их массы в отсутствие сопротивления воздуха падают на Землю с одинаковым ускорением, называемым ускорением свободного падения.**

Впервые это утверждение экспериментально было доказано Галилеем. Из-за отсутствия точных часов Галилей не мог измерять достаточно надёжно малые интервалы времени падения тел на Землю. Учёный исследовал скольжение шаров по наклонной плоскости (рис. 30), угол наклона которой постепенно приближался к прямому. При фиксированном угле наклона плоскости шар скатывается с постоянным ускорением. При увеличении угла наклона плоскости ускорение шаров возрастает. Результа-



### ▲ 30

Опыт Галилея



### ▲ 31

Синхронное свободное падение яблока и пера в вакууме

Свободно падающее тело вначале движется как в вакууме, с ускорением свободного падения, так как при небольшой скорости сила сопротивления воздуха пренебрежимо мала. Увеличение скорости падения тела приводит к увеличению силы сопротивления воздуха и уменьшению ускорения тела. Когда сила сопротивления воздуха становится равной силе притяжения тела к Земле, ускорение тела оказывается равным нулю. Вблизи Земли тела, падающие с большой высоты, имеют постоянную скорость.

ты экспериментов показали, что при любом угле наклона расстояние, проходимое шаром по плоскости, пропорционально квадрату времени движения. Например, за удвоенный промежуток времени шар проходил расстояние в 4 раза большее.

Выводы Галилея были подтверждены английским учёным **Робертом Бойлем**, наблюдавшим синхронное падение различных предметов в сосуде, из которого был откачан воздух (рис. 31).

Воздух из сосуда откачали для того, чтобы исключить силу сопротивления воздуха, препятствующую движению тел. Ускорение свободного падения тел на Землю впервые измерил **Христиан Гюйгенс** в 1656 г. с помощью маятниковых часов. Вблизи поверхности Земли ускорение свободного падения равно

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Правильность выводов Галилея и Бойля была наглядно продемонстрирована американскими астронавтами. Наблюдения Д. Скотта и Дж. Ирвина свободного падения птичьего пера и молотка на поверхность Луны показали, что в отсутствие атмосферы предметы падают с одной и той же высоты за одинаковый промежуток времени, т. е. с одинаковым ускорением. Ускорение свободного падения тел на Луне примерно в 6 раз меньше, чем на Земле:

$$g_{\text{л}} = 1,6 \text{ м/с}^2.$$

**Падение тел в воздухе.** В воздухе падение тел происходит иначе, чем в вакууме. На тело, движущееся в воздухе, действует сила сопротивления



Таблица 6

## Скорость падения различных тел с большой высоты на Землю

Падающее тело	Скорость падения на Землю, м/с
Перо птицы	0,4
Лист бумаги	0,5
Снежинка	1
Парашютист (раскрытый парашют)	7
Монета	9
Парашютист (нераскрытый парашют)	60
Большой камень	100
Пуля (крупного калибра)	200

Например, скорость падения капель дождя и градин на Землю около 30 км/ч. В отсутствие атмосферы они достигали бы Земли со скоростью пули. Впрочем, надуманность этой ситуации очевидна: без атмосферы не было бы ни капель дождя, ни града, ни жителей Земли.

Лёгкие тела с большой площадью поверхности (снежинки, листья) через короткий промежуток времени начинают двигаться в воздухе равномерно с небольшой скоростью.

Скорость тяжёлых предметов при падении в атмосфере Земли возрастает в течение нескольких первых секунд, а затем остаётся постоянной (порядка 100 м/с). В таблице 6 приведена примерная конечная скорость падения различных тел с большой высоты на Землю.

### В О П Р О С Ы

1. При каких условиях падение тел на Землю можно считать равноускоренным движением?
2. Опишите эксперименты Галилея и Бойля, подтвердившие постоянство ускорения тел, свободно падающих на Землю.
3. Является ли равноускоренным падение тел вблизи поверхности Луны?
4. Чем отличается падение тел в воздухе от их падения в безвоздушном пространстве?
5. Почему раскрытие парашюта существенно уменьшает скорость приземления парашютиста?

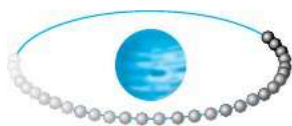
## § 12. Кинематика периодического движения

**Виды периодического движения.** Повторяющиеся, циклические явления в окружающем нас мире, такие как смена времён года, смена дня и ночи, солнечные и лунные затмения, перемещение звёзд и планет по небосклону, колебания маятников и пружин, классифицируются как периодические.

**Периодическое движение** — движение, повторяющееся через равные промежутки времени.

Важнейшей характеристикой такого движения является *период*.

**Период** — минимальный интервал времени, через который движение повторяется.



### ▲ 32

Вращательное движение спутника Юпитера

Период измеряется в *секундах* (с).

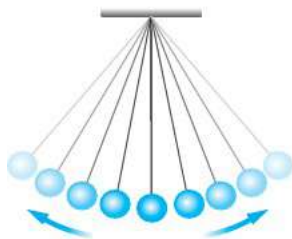
Через период тело вновь попадает в начальную точку движения и повторяет свой путь по прежней траектории.

Различают два вида периодических движений: *вращательное* и *колебательное*.

**Вращательное движение** — движение в одном направлении по плоской (или пространственной) замкнутой траектории (рис. 32) (подобно движению Земли по орбите вокруг Солнца и т. п.).

**Колебательное движение** — движение вдоль одного и того же ограниченного интервала с изменением направления движения (рис. 33) (подобно колебаниям маятника).

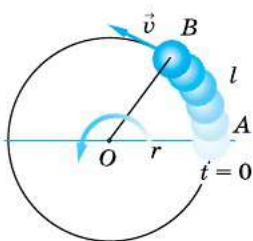
**Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.** Если размеры тела, движущегося по окружности, много меньше радиуса окружности, то тело можно рассматривать как материальную точку. С помощью этой простейшей модели можно описывать вращение Земли вокруг Солнца, электрона вокруг ядра атома.



### ▲ 33

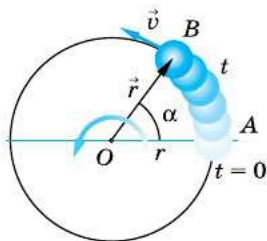
Колебательное движение маятника





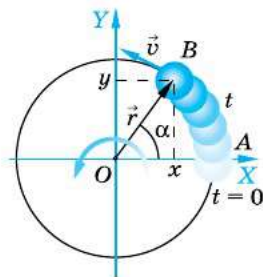
## ▲ 34

*Определение положения частицы по пройденному ею пути  $l$  по окружности*



## ▲ 35

*Определение положения частицы по углу поворота  $\alpha$  радиуса-вектора  $\vec{r}$  относительно его начального положения*



## ▲ 36

*Определение положения частицы на окружности с помощью закона движения в координатной форме  $x(t)$ ,  $y(t)$*

Рассмотрим движение материальной точки (частицы) со скоростью  $v$  по окружности радиусом  $r$ . Предположим, что в начальный момент времени частица находится в точке  $A$ , а её движение происходит против хода часовой стрелки (рис. 34).

Положение частицы в пространстве в произвольный момент времени  $t$  можно определить тремя способами.

1. Задав путь  $l$ , пройденный частицей от начальной точки  $A$  до точки  $B$  (см. рис. 34) через время  $T$ .

2. Задав угол поворота  $\alpha$  радиуса-вектора  $\vec{r}$  относительно его начального положения (рис. 35).

3. Задав закон движения в координатной форме (зависимость координат частицы от времени) (рис. 36).

Найдём время одного оборота по окружности  $T$ , для чего разделим длину окружности  $l = 2\pi r$  на скорость частицы:

$$T = \frac{2\pi r}{v}. \quad (14)$$

Через это время частица возвращается в точку  $A$ , а затем продолжает вращение против хода часовой стрелки вокруг точки  $O$ .

**Период вращения — время одного оборота по окружности.**

В таблице 7 приведён период вращения вокруг собственной оси некоторых тел Солнечной системы.



Таблица 7

Период вращения вокруг собственной оси Солнца, ближайших планет Солнечной системы и Луны

Небесное тело	Период $T$ , зв. сут <sup>1</sup>	Небесное тело	Период $T$ , зв. сут
Солнце	25,4	Марс	1,03
Меркурий	58,6	Сатурн	0,43
Венера	243	Юпитер	0,41
Земля	1	Луна	27,3

Другой характеристикой вращательного движения является *частота*.

**Частота вращения — число оборотов в единицу времени.**

Частота связана с периодом вращательного движения соотношением

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (15)$$

Единица частоты — *герц* (Гц):

$$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

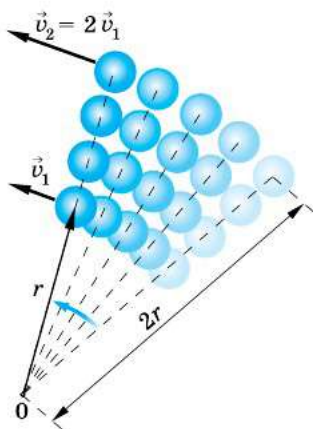
Используя формулы (14) и (15), можно получить выражение для линейной скорости при движении по окружности:

$$v = \frac{2\pi}{T} r = 2\pi\nu r. \quad (16)$$

В соответствии с формулой (16) скорость бусинок, закреплённых на вращающейся нитке, растёт пропорционально расстоянию до оси вращения (рис. 37).

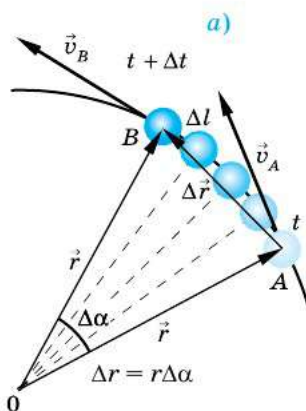
Движение частицы по окружности удобно также характеризовать величиной, называемой *угловой скоростью*. Угловая скорость  $\omega$  равна отношению угла поворота  $\alpha$  радиуса-вектора ко времени  $t$ , в течение которого этот поворот произошёл:  $\omega = \frac{\alpha}{t}$ . В СИ угловую скорость измеряют в *радианах в секунду* (рад/с).

<sup>1</sup> Звёздные сутки; 1 зв. сут = 23 ч 56 мин 4 с.



37

Зависимость линейной скорости от расстояния до оси вращения



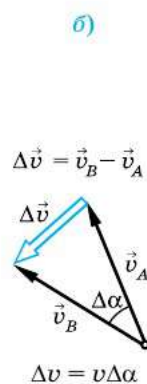
38

Ускорение при равномерном движении тела по окружности:

*a* — при  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $\Delta\alpha \rightarrow 0$ ;

*б* — при  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $\Delta\vec{v} \perp \vec{v}_A$ ,  $\Delta\vec{v} \perp \vec{v}_B$

$$a_n = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$



**Центростремительное ускорение.** Скорость тела — векторная величина. Любое изменение вектора скорости во времени означает появление ускорения:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \text{ (при } \Delta t \rightarrow 0\text{)}.$$

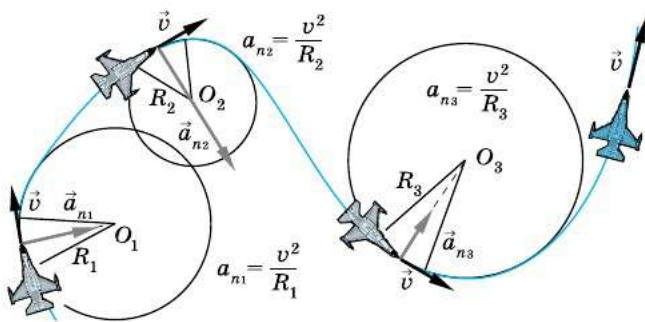
При этом  $\Delta\vec{v}$  может характеризовать не только изменение модуля скорости, но и её направления.

Если изменяется только модуль скорости, то происходит прямолинейное ускоренное движение. Если скорость тела изменяется только по направлению, то тело будет двигаться равномерно по криволинейной траектории.

Чтобы найти направление ускорения, возникающего при движении по окружности с постоянной по модулю скоростью, рассмотрим положения тела на окружности в точках *A* и *B* в достаточно близкие моменты времени *t* и *t* +  $\Delta t$  (рис. 38, *a*).

Обозначим через  $\Delta\alpha$  угол поворота радиуса-вектора  $\vec{r}$  при перемещении  $\Delta\vec{r}$ . Совместив начала векторов скорости в точках *A* и *B*, найдём изменение скорости  $\Delta\vec{v}$  как разность конечной  $\vec{v}_B$  и начальной  $\vec{v}_A$  скоростей ( $|\vec{v}_A| = |\vec{v}_B| = v$ ) (рис. 38, *б*).





### 39

Нормальное ускорение самолёта при равномерном движении по криволинейной траектории

Пусть  $\Delta t \rightarrow 0$ , в этом случае точки  $A$  и  $B$  бесконечно сближаются, так что  $\Delta\alpha \rightarrow 0$ . Так как сумма углов в треугольнике равна  $180^\circ$ , а  $\Delta\alpha \rightarrow 0$ , то каждый угол при основании  $\Delta v$  стремится к  $90^\circ$ . Это означает, что вектор  $\Delta\vec{v}$  в случае, когда  $\Delta t \rightarrow 0$ , направлен перпендикулярно скорости. Так как скорость направлена по касательной к окружности, то перпендикуляр к касательной направлен по радиусу к центру окружности. Следовательно, вектор  $\Delta\vec{v}$ , а значит, и вектор ускорения перпендикулярен, или нормален, скорости (отсюда появление индекса  $n$  и название *нормальное ускорение*). Так как вектор ускорения направлен к центру окружности, это ускорение иногда называют *центростремительным*.

При движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью его ускорение направлено перпендикулярно скорости, по радиусу к центру окружности.

Найдём модуль центростремительного ускорения:

$$\frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{v}{r} \text{ (см. рис. 38), откуда } \Delta v = \frac{v}{r} \Delta r \Rightarrow a_n = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{r} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}.$$

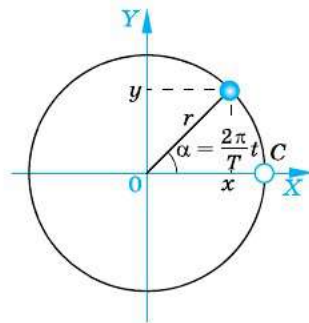
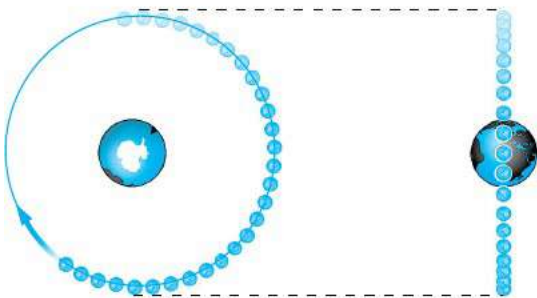
Таким образом,

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2}{T^2} r = 4\pi^2 v^2 r. \quad (17)$$

Выбор необходимой расчётной формулы зависит от того, какая кинематическая величина  $v$ ,  $T$  или  $r$  известна.

По формуле (17) вычисляется нормальное ускорение при движении по окружности с постоянной по модулю скоростью. Аналогичную формулу можно использовать при движении тела с переменной по модулю скоростью по произвольной криволинейной траектории, где  $r$  — также переменная величина — радиус кривизны траектории. Это объясняется тем, что любая сложная кривая на небольшом участке может быть заменена дугой окружности (рис. 39).





#### ▲ 40

*Представление о круговом движении Луны вокруг Земли как о колебательном при наблюдении в плоскости орбиты*

#### ▲ 41

*К выводу закона движения по окружности с постоянной по модулю скоростью в координатной форме*

**Колебательное движение.** Взаимосвязь двух видов периодического движения (вращательного и колебательного) особенно наглядно проявляется при наблюдении вращения Луны вокруг Земли в плоскости орбиты (рис. 40).

Для того чтобы вывести закон колебательного движения, рассмотрим движение тела по окружности радиусом  $r$  с центром в начале координат. Если при  $t = 0$  частица находится в точке  $C$  (рис. 41), то её координаты по осям  $X$  и  $Y$  связаны с радиусом окружности  $r$  и углом поворота  $\alpha$  следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha, \\ y = r \sin \alpha. \end{cases}$$

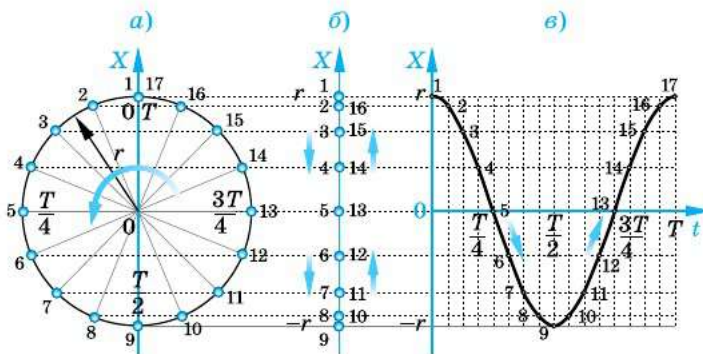
Если период вращения частицы по окружности равен  $T$ , то за промежуток времени  $t$  её радиус-вектор поворачивается на угол

$$\alpha = \frac{2\pi}{T}t,$$

поэтому закон вращательного движения в координатной форме имеет вид

$$\begin{cases} x = r \cos \frac{2\pi}{T}t, \\ y = r \sin \frac{2\pi}{T}t. \end{cases}$$

(18)



## ▲ 42

Связь вращательного движения Луны вокруг Земли с её колебательным движением в плоскости орбиты:

- a* — положение Луны через равные промежутки времени  $\Delta t = T/16$  при наблюдении перпендикулярно плоскости орбиты;  
*b* — положение Луны при наблюдении в плоскости орбиты;  
*в* — график колебания Луны в плоскости орбиты

При этом координаты изменяются со временем по законам синуса и косинуса.

**Гармонические колебания** — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально).

Можно построить график функции  $x(t)$ , отметив положение Луны на орбите вокруг Земли в шестнадцати различных точках (рис. 42, *a*), разделённых по времени  $\frac{1}{16}$  периода вращения  $T$ . Положения Луны в плоскости орбиты показаны на рисунке 42, *b*. На рисунке 42, *в* построена зависимость  $x(t)$ . По оси времени равномерно нанесены деления через равные промежутки времени  $\Delta t = T/16$ . Через период  $T$  Луна вновь проходит через первоначальное положение, а график зависимости  $x(t)$  периодически продолжается.

**Частота колебаний — величина, равная числу полных колебаний, совершаемых в единицу времени:**

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

Единица частоты колебаний — *герц* (Гц).

### В О П Р О С Ы

1. Какое движение называют периодическим? Что такое период движения?
2. Какие параметры характеризуют положение тела на окружности?
3. Почему движение по окружности с постоянной по модулю скоростью является ускоренным? Куда направлено нормальное ускорение и чему оно равно?
4. Приведите примеры взаимосвязи вращательного и колебательного движений.
5. Какие колебания называют гармоническими?

### З А Д А Ч И

1. Найдите линейную скорость вращения Земли вокруг Солнца, считая её орбиту круговой с радиусом  $r_{\odot} = 1,5 \cdot 10^8$  км.
2. Северная широта Москвы составляет  $55^{\circ}45'$ . С какой скоростью москвичи вращаются вместе с земным шаром вокруг его оси? Радиус Земли принять равным 6400 км.
3. Найдите ускорения конца секундной, минутной и часовой стрелок наручных часов, если их длина равна соответственно 1,5 см, 1 см и 0,5 см.

### Т В О Р Ч Е С К И Е    З А Д А Н И Я

1. Используя средства различных графических редакторов, изобразите траекторию своего движения в течение дня.
2. Определите координаты своего жизненного пространства (результат представьте в виде рисунка). Отметьте в этом пространстве свои перемещения.
3. Какие параметры вашей жизнедеятельности можно описать как векторные величины (назовите не менее трёх)? Ответ аргументируйте.
4. Какие профессии требуют понимания законов кинематики?
5. Опишите, какие процессы в вашей жизни имеют периодический характер. Каков их период? Ответ представьте в виде таблицы.



## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**Механическое движение** — движение тела как целого относительно других тел с течением времени.

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

**Система отсчёта** — совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и часов.

**Траектория** — последовательность точек (линия), в которых находилось тело в процессе своего движения.

**Радиус-вектор** — вектор, соединяющий начало отсчёта с положением материальной точки в произвольный момент времени.

**Закон движения** — зависимость радиуса-вектора или координат от времени.

**Перемещение** — вектор, проведённый из начального положения материальной точки в конечном.

**Путь** — расстояние, пройденное телом вдоль траектории.

**Средняя путевая скорость** — скалярная величина, равная отношению пути к промежутку времени, затраченному на его прохождение:

$$v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}.$$

**Скорость (мгновенная скорость)** — векторная физическая величина, равная отношению перемещения тела к предельно малому промежутку времени, за который это перемещение произошло:

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

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

**Мгновенная скорость** тела направлена по касательной к траектории тела в сторону его движения.

**Относительная скорость** — скорость одной материальной точки в системе отсчёта, связанной с другой. При поступательном движении относительная скорость двух тел равна разности векторов скоростей тел:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2.$$

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

**Закон равномерного прямолинейного движения** по оси  $X$ :

$$x = x_0 + v_x t,$$

где  $x_0$  — начальная координата тела,  $v_x$  — проекция скорости тела на ось  $X$ .

**Мгновенное ускорение** — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости тела к предельно малому промежутку времени, в течение которого это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с<sup>2</sup>).

**Равноускоренное прямолинейное движение** — прямолинейное движение, при котором ускорение

параллельно (сонаправлено) скорости и постоянно по модулю.

■ **Равнозамедленное прямолинейное движение** — прямолинейное движение, при котором ускорение антипараллельно (противоположно направлено) скорости и постоянно по модулю.

■ **Равнопеременное прямолинейное движение** — прямолинейное движение с постоянным по модулю и направлению ускорением.

■ Закон равнопеременного прямолинейного движения

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

где  $v_{0x}$  и  $a_x$  — проекции начальной скорости и ускорения тела на ось  $X$ .

Проекция скорости на ось  $X$  при равнопеременном движении линейно зависит от времени:

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

■ В отсутствие сопротивления воздуха все тела независимо от их массы падают на Землю с одинаковым ускорением, называемым

ускорением свободного падения ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ).

■ **Периодическое движение** — движение, повторяющееся через равные промежутки времени.

■ **Период** — минимальный интервал времени, через который движение повторяется.

■ **Период вращения** — время одного оборота по окружности.

■ **Нормальное (центростремительное) ускорение** — ускорение тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью по криволинейной траектории, направленное перпендикулярно его скорости. Модуль нормального ускорения тела при движении по окружности радиусом  $r$ :

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2}{T^2} r = 4\pi^2 \nu^2 r,$$

где  $v$  — скорость тела,  $T$  — период вращения,  $\nu$  — частота вращения.

■ **Гармонические колебания** — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально).



## § 13. Принцип относительности Галилея

**Принцип инерции.** Кинематика описывает механическое движение математически, не объясняя физических причин его существования и изменения, отвечая лишь на вопрос, как движется тело.

Причины, определяющие характер механического движения, т. е. ответ на вопрос, почему движется тело, даёт *динамика* (от *греч.* dynamis — сила).

Согласно современным физическим представлениям, характер движения тела определяется его взаимодействием с другими телами.

Для того чтобы тело, находящееся в покое, изменило положение в пространстве, необходимо оказать на него некоторое воздействие. Ещё Аристотель утверждал: «Движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает своё действие». Это подтверждают повседневный опыт и непосредственные наблюдения: например, тележка, которую перестают толкать, быстро останавливается на шероховатой поверхности.

Чем лучше смазаны оси колёс и чем ровнее дорога, тем большее расстояние проходит тележка до остановки после прекращения воздействия. В идеализированном эксперименте (который невозможно реализовать в действительности), когда горизонтальная дорога абсолютно гладкая, т. е. когда исключены все внешние воздействия, тележка будет катиться без остановки по инерции.

**Инерция — явление сохранения состояния движения или покоя по отношению к инерциальной системе отсчёта в отсутствие внешних воздействий.**

*Движение по инерции — движение тела, происходящее при скомпенсированных внешних воздействиях.*



**Инерциальные системы отсчёта.** Равномерное прямолинейное движение и состояние покоя физически эквивалентны в том смысле, что они существуют без внешнего воздействия. Кроме того, понятия «движение» и «покой» относительны и зависят от выбора системы отсчёта.

Например, стол в комнате, неподвижный относительно системы отсчёта, связанной с домом, движется вместе с Землёй в системе отсчёта, связанной с её осью или Солнцем, а вместе с Солнечной системой движется вокруг центра Галактики в расширяющейся Вселенной.

Однако эквивалентность и взаимозаменяемость состояния покоя и равномерного прямолинейного движения возможны лишь *в инерциальных системах отсчёта*, покоящихся или движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга.

**Инерциальная система отсчёта — система отсчёта, в которой тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на тело не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.**

Если систему отсчёта, связанную с Землёй, можно рассматривать как инерциальную, то и системы отсчёта, связанные с кораблём, плывущим по прямой с постоянной скоростью, или с автобусом, движущимся равномерно и прямолинейно, также будут инерциальными. Но как только корабль или автобус начинают увеличивать (или уменьшать) свою скорость, связанные с ними системы отсчёта перестают быть инерциальными.

Системы отсчёта, в которых принцип инерции не выполняется, называют *неинерциальными*. Когда автобус резко трогается с места, пассажира отбрасывает назад, в сторону, противоположную направлению движения. Следовательно, скорость пассажира относительно автобуса изменяется в отсутствие внешних сил и система отсчёта, связанная с автобусом, является неинерциальной.

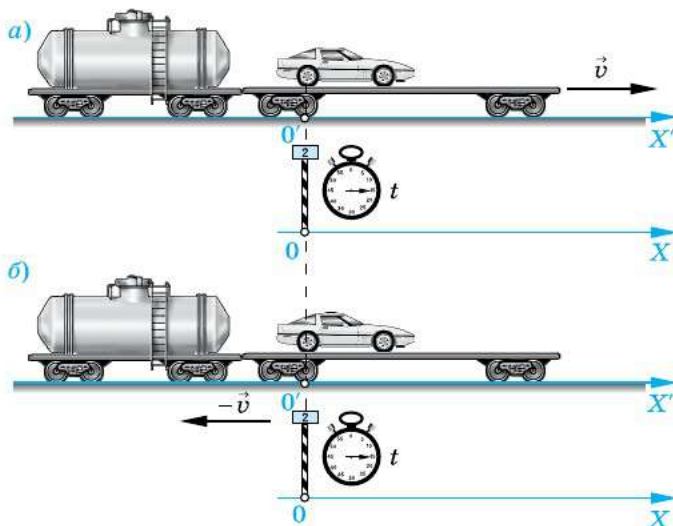
Рассмотрим примеры возможных инерциальных систем отсчёта (рис. 43).

Предположим, что на платформе поезда, движущегося со скоростью  $\vec{v}$  относительно железнодорожного полотна, находится автомобиль. Относительно движущейся системы отсчёта  $X'$  (связанной с вагоном) автомобиль покоится, а относительно неподвижной системы отсчёта  $X$  (связанной с Землёй) он движется равномерно прямолинейно со скоростью поезда. Таким образом, обе системы отсчёта ( $X$  и  $X'$ ) являются инерциальными.

## 43

Относительность состояния покоя и равномерного прямолинейного движения в различных инерциальных системах отсчёта:

*a* — скорость автомобиля, находящегося на платформе, относительно земли равна  $\vec{v}$ ;  
*б* — скорость километрового столба относительно платформы равна  $-\vec{v}$



В то же время километровый столб покоится в неподвижной системе отсчёта  $X$  и движется со скоростью  $-\vec{v}$  относительно движущейся системы отсчёта  $X'$  (как это кажется машинисту поезда, смотрящему из окна электровоза).

**Преобразования Галилея.** Найдём, как связаны между собой координаты и скорость тела в различных инерциальных системах отсчёта. Предположим, что автомобиль, находящийся на платформе поезда, идущего со скоростью  $\vec{v}$ , равномерно движется вдоль неё со скоростью  $v_{x'}$  относительно платформы (рис. 44, *a*).

Через промежуток времени  $t$  платформа сместится от километрового столба на расстояние  $vt$ . Автомобиль за этот промежуток времени проедет по платформе расстояние

$$x' = v_{x'}t \quad (19)$$

и будет находиться от столба на расстоянии

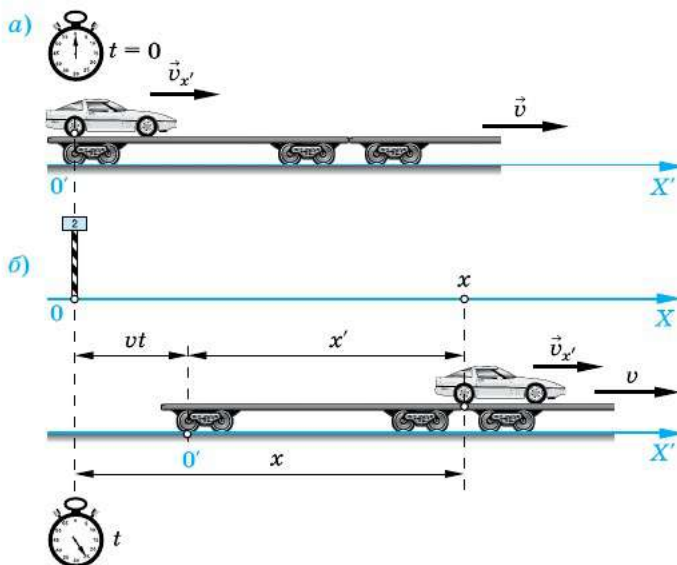
$$x = x' + vt \quad (20)$$

(рис. 44, *б*). Координаты тела (автомобиля) в различных инерциальных системах отсчёта  $X$  и  $X'$  связывают **преобразования Галилея**:

$$x = x' + vt. \quad (21)$$

## 44 ▶

Преобразования Галилея:  
 $X$  — неподвижная система отсчёта;  
 $X'$  — движущаяся система отсчёта



Время в классической механике является абсолютным: оно едино для наблюдателей во всех инерциальных системах отсчёта. Движущиеся и неподвижные часы идут в одинаковом темпе и (после синхронизации) показывают одинаковое время.

Скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта:

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

Разделив почленно выражение (20) на время  $t$ , получим **закон сложения скоростей**:

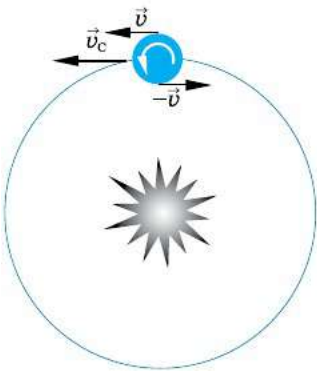
$$v_x = v_{x'} + v. \quad (22)$$

Преобразования Галилея и закон сложения скоростей справедливы, если скорость движения тела или инерциальной системы отсчёта много меньше скорости распространения света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Если платформа движется со скоростью  $v = 60$  км/ч, а автомобиль едет относительно неё в направлении движения поезда со скоростью  $v_{x'} = 10$  км/ч, то скорость автомобиля относительно железнодорожного полотна  $v_x = 70$  км/ч.

Если бы автомобиль двигался по платформе с той же скоростью, но в противоположном направлении, то его скорость относительно полотна дороги была бы равна 50 км/ч.





Из-за вращения Земли вокруг своей оси для точки, находящейся на её затенённой стороне, скорость вращения  $v$  прибавляется к скорости движения  $v_c$  по орбите вокруг Солнца (рис. 45).

Скорость движения освещённой стороны меньше, чем затенённой. Поэтому жители Земли ночью движутся вокруг Солнца быстрее, чем днём.

Движение инерциальной системы отсчёта не оказывает влияния на прямолинейное равномерное движение тела или его состояние покоя в этой системе.

#### ▲ 45

*Отличие скорости движения вокруг Солнца освещённой  $v_o$  и затенённой  $v_s$  сторон Земли:*

$$v_o = v_c - v,$$

$$v_s = v_c + v$$

**Во всех инерциальных системах отсчёта законы классической механики имеют один и тот же вид.**

В этом состоит *принцип относительности Галилея*.

Согласно принципу относительности Галилея, при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой вид математических формул, описывающих законы механики, не изменяется.

### В О П Р О С Ы

1. Что изучает динамика?
2. Какое движение называется движением по инерции?
3. В чём отличие между инерциальной и неинерциальной системами отсчёта?
4. Сформулируйте закон сложения скоростей. Приведите примеры, его иллюстрирующие.
5. Сформулируйте принцип относительности Галилея. Разъясните его смысл.

## § 14. Первый закон Ньютона

**Закон инерции.** Принцип инерции, сформулированный Галилеем, свидетельствует о том, что не всегда можно доверять очевидным выводам, сделанным на основе непосредственных наблюдений. К представлению

о движении по инерции удалось прийти лишь при анализе идеализированного эксперимента, когда отсутствуют трение и любые внешние воздействия на тело.

В 1687 г. принцип инерции Галилея был сформулирован Ньютоном в виде *первого закона динамики* (закона инерции).

Приведём современную формулировку этого закона.

### Первый закон Ньютона

**Существуют системы отсчёта, в которых все тела в отсутствие внешнего воздействия находятся в покое или движутся прямолинейно и равномерно.**

Тело движется прямолинейно и равномерно, если все воздействия на него скомпенсированы. При этом скорость тела либо постоянна (при прямолинейном равномерном движении), либо равна нулю (в состоянии покоя). Первый закон Ньютона выделяет особый класс систем отсчёта, называемых *инерциальными*. Понятие инерциальной системы отсчёта является идеализацией, потому что она связана с телом отсчёта, а все тела в природе в большей или меньшей степени взаимодействуют друг с другом. Во Вселенной практически невозможно найти тело, не испытывающее внешние воздействия, и непосредственно экспериментально подтвердить первый закон Ньютона. Однако с его помощью можно объяснить ряд опытов, что является косвенным подтверждением справедливости этого закона.

**Экспериментальные подтверждения закона инерции.** Монета лежит на лёгкой прозрачной пластмассовой пластинке, закрывающей горлышко сосуда. Резким щелчком по краю пластины её выбивают из-под монеты. Монета падает в бутылку (рис. 46).

При резком торможении автомобиля пассажиры, не пристёгнутые ремнями безопасности, продолжают по инерции движение вперёд, что может привести к травме.

Межпланетная космическая станция, запускаемая с Земли, на большом расстоянии от планеты движется практически прямолинейно и равномерно, вообще не расходуя топливо.

Облако раскалённого газа, образовавшегося при взрыве сверхновой звезды, по инерции расширяется в окружающее пространство от места взрыва (рис. 47). В момент фотографирования (1990) его диаметр составлял  $2 \cdot 10^{13}$  км.



#### ▲ 46

*Сохранение состояния покоя: монета проваливается в бутылку*





Таким образом, *из первого закона Ньютона следует, что тело может двигаться как при наличии, так и при отсутствии внешнего воздействия*. Следовательно, скорость сама по себе не показывает, действуют на тело внешние силы или нет. Ответ на фундаментальный вопрос, *какая физическая величина является однозначным показателем наличия внешнего воздействия*, был дан Ньютоном во втором законе.

## ▲ 47

*Расширение облака раскалённого газа, образовавшегося при взрыве сверхновой звезды (1987А), в космическом пространстве*

## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте первый закон Ньютона.
2. При каком условии скорость тела остаётся неизменной?
3. Почему, если резко выдернуть свёклу из земли, ботва рвётся, а если постепенно — нет?
4. Что произойдёт, если лист бумаги, на котором стоит стакан с водой, резко выдернуть; медленно тянуть?
5. Сформулируйте следствие первого закона Ньютона.

## § 15. Второй закон Ньютона

**Сила как мера взаимодействия тел.** Тело движется прямолинейно и равномерно по абсолютно гладкой поверхности лишь в случае, когда отсутствует внешнее воздействие. Если подтолкнуть тело в направлении движения, его скорость увеличится. Воздействие на тело в направлении, противоположном его движению, уменьшает скорость тела. Следовательно, внешнее воздействие изменяет скорость. Таким образом, *не скорость, а её изменение является показателем наличия или отсутствия внешнего воздействия*. При равномерном прямолинейном движении изменение скорости равно нулю, что свидетельствует об отсутствии внешнего воздействия.

*При воздействии на движущееся тело других тел его скорость может изменяться не только по модулю, но и по направлению.*

Направление внешнего воздействия может не совпадать с направлением скорости тела.

Рассмотрим удар бильярдного кия по шару в направлении, перпендикулярном скорости  $\vec{v}_0$  движения шара (рис. 48).

В результате удара силой  $\vec{F}$  шар получает дополнительную скорость в направлении действия силы. Вектор изменения скорости  $\Delta\vec{v}$  направлен в сторону силы  $\vec{F}$ .



Чем больше сила  $\vec{F}$ , тем больше изменение скорости  $\Delta\vec{v}$ , т. е. можно предположить, что

$$\Delta\vec{v} \sim \vec{F}. \quad (23)$$

Так как изменение скорости в единицу времени определяет ускорение тела  $\vec{a}$ , то

$$\Delta\vec{v} \sim \vec{a}. \quad (24)$$

Следовательно, ускорение тела пропорционально силе, действующей на тело:

$$\vec{a} \sim \vec{F}. \quad (25)$$

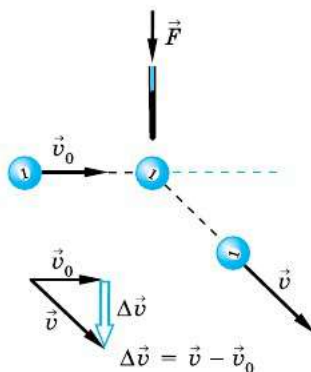
**Сила — векторная физическая величина, являющаяся мерой воздействия на тело со стороны других тел, в результате которого тело приобретает ускорение или деформируется.**

Сила является количественной мерой взаимодействия. Силы взаимодействия различной природы можно измерять в одних и тех же единицах с помощью одних и тех же приборов.

Пропорциональность между силой  $\vec{F}$  и ускорением  $\vec{a}$  справедлива для сил различной физической природы. Направление ускорения совпадает с направлением силы независимо от направления скорости тела (рис. 49).

Коэффициент пропорциональности между силой и ускорением для данного тела является постоянной величиной, не зависящей от модуля и направления силы. Он характеризует меру инертности тела. Инертность проявляется в том, что изменение скорости тела не может произойти мгновенно.

**Инертность — физическое свойство тела, которое заключается в том, что различные тела по-разному изменяют свою скорость при одном и том же внешнем воздействии.**



#### ▲ 48

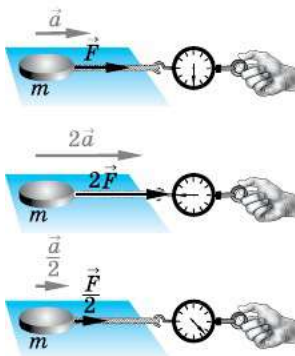
Изменение вектора скорости шара параллельно направлению удара:

$$\Delta\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{F}$$



#### ▲ 49

Совпадение направления ускорения с направлением силы (независимо от направления скорости тела)



Количественной мерой инертности является *масса* тела.

*Чем больше сила, действующая на тело определённой массы, тем большее ускорение оно приобретает* (рис. 50).

Опыт показывает, что, если имеются два тела разной массы, то телу большей массы труднее сообщить определённое ускорение, чем телу меньшей массы.

*Чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно приобретает при одной и той же действующей на него силе* (рис. 51).

Связь между ускорением тела и силой, действующей на него, можно представить в виде

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (26)$$

Единица силы определяется из формулы (26):

$$[F] = [m] [a] = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ Н}.$$

Единица силы — *ньютон* (Н).

1 Н — *сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup> в направлении действия силы.*

**Движение тела под действием нескольких сил.** Найдём ускорение тела при одновременном действии на него нескольких сил.

Если на тело массой  $m$  действует сила  $\vec{F}_1$ , то она вызывает его движение с ускорением  $\vec{a}_1$  (рис. 52, а).

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m}. \quad (27)$$

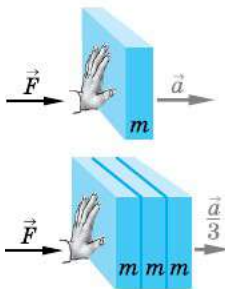
Согласно формуле (26)

Под действием силы  $\vec{F}_2$  (рис. 52, б) тело приобретает ускорение

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_2}{m}. \quad (28)$$

## ▲ 50

*Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на тело*



## ▲ 51

*Ускорение тела обратно пропорционально его массе*



При одновременном действии на тело сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  (рис. 52, в) тело будет двигаться с ускорением

$$\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_1}{m} + \frac{\vec{F}_2}{m}, \quad (29)$$

$$\text{или } \vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2}{m}.$$

Каждая из сил, действующих на тело, сообщает телу ускорение, которое она бы сообщила ему в отсутствие других сил.

В этом состоит *принцип независимости действия сил*.

В общем случае если на тело действует  $n$  сил ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ ), то результирующее ускорение тела определяется суммарной (*равнодействующей*) силой:

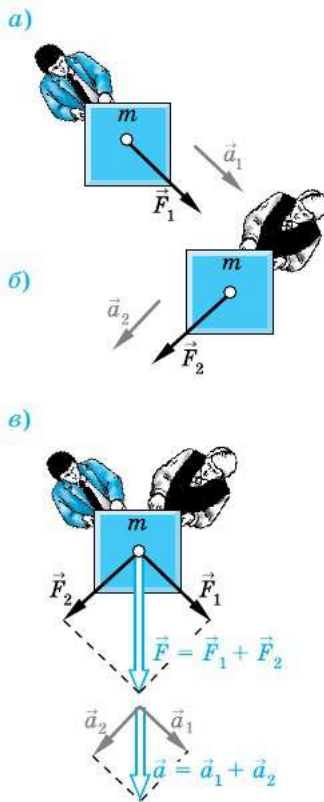
$$\Sigma \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \quad (30)$$

### Принцип суперпозиции сил

**Результирующая (равнодействующая) сила, действующая на тело со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми на него действует каждое из этих тел.**

Принцип суперпозиции сил справедлив для сложения сил различной природы. С его помощью возможно сложение силы гравитационной природы (например, силы тяжести тела) с силой электромагнитной природы (например, силой трения или силой реакции опоры).

Сформулируем *второй закон Ньютона*.



### 52 ▲

Ускорение, приобретаемое телом массой  $m$ :

$a$  — под действием силы  $\vec{F}_1$ :

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m};$$

$b$  — под действием силы  $\vec{F}_2$ :

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_2}{m};$$

$v$  — под действием сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2}{m}$$



## Второй закон Ньютона

В инерциальной системе отсчёта ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\Sigma \vec{F}}{m}. \quad (31)$$

При решении задач динамики второй закон Ньютона удобно записать иначе:

$$m\vec{a} = \Sigma \vec{F}. \quad (32)$$

*Произведение массы тела и его ускорения равно векторной сумме всех действующих на него сил.*

Второй закон Ньютона применим для описания движения тел со скоростью, много меньшей скорости распространения света в вакууме.

### В О П Р О С Ы

1. Какая физическая величина характеризует отсутствие или наличие внешнего воздействия?
2. Почему, находясь в купе поезда с зашторенным окном и хорошей звукоизоляцией, можно обнаружить, что поезд движется ускоренно, но нельзя определить, что он движется равномерно?
3. В чём проявляется свойство инертности? Какая физическая величина является мерой инертности?
4. Сформулируйте принцип суперпозиции сил.
5. Сформулируйте второй закон Ньютона. Каковы границы применимости этого закона?

### З А Д А Ч И

1. Тело массой  $m = 2$  кг, движущееся на восток, тормозится постоянной силой  $F = 10$  Н, направленной на запад. Чему равно и куда направлено ускорение тела?
2. Коляска массой  $m = 10$  кг движется на юг с ускорением  $a = 0,5$  м/с<sup>2</sup> под действием двух сил, одна из которых  $F_1 = 25$  Н направлена на юг. Куда направлена и чему равна сила  $F_2$ , действующая на коляску?
3. На тело массой  $m = 5$  кг действуют силы  $F_1 = 9$  Н и  $F_2 = 12$  Н, направленные на север и восток соответственно. Чему равно и куда направлено ускорение тела?

## § 16. Третий закон Ньютона

**Силы действия и противодействия.** Сила, сообщающая телу ускорение, является мерой *воздействия* на него другого тела. Эта сила возникает при *взаимодействии* между телами. Так как объекты взаимодействия равноправны, то на второе тело первое также действует с некоторой силой — *силой противодействия*.

Силы действия и противодействия, возникающие в результате взаимодействия тел, являются силами одной природы. Так, взаимодействие планет является гравитационным, стального бруска и магнита — электромагнитным.

Рассмотрим силы действия и противодействия на примере встречного столкновения двух одинаковых шаров из пластилина. Если скорости шаров одинаковы по модулю, то в результате столкновения они останавливаются (рис. 53). Покажем, что при этом столкновении силы действия и противодействия равны. Изменение скорости первого шара  $\Delta \vec{v}_1 = 0 - \vec{v} = -\vec{v}$  направлено влево. Изменение скорости второго шара  $\Delta \vec{v}_2 = 0 - (-\vec{v}) = \vec{v}$  направлено вправо и равно по модулю  $\Delta v_1$ . Ускорения шаров, характеризующие изменение их скорости в единицу времени, равны по модулю и противоположны по направлению:

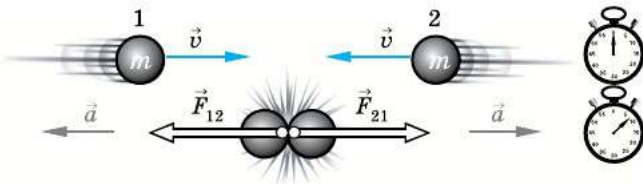
$$\vec{a}_1 = -\vec{a}_2.$$

Согласно второму закону Ньютона, сила, действующая на первый шар со стороны второго,  $\vec{F}_{12} = m\vec{a}_1$ . Аналогично сила, действующая на второй шар со стороны первого,  $\vec{F}_{21} = m\vec{a}_2$ .

Равенство сил действия и противодействия наблюдается и при столкновении тел произвольной массы, движущихся с различными скоростями.

В этом состоит *третий закон Ньютона*.

**53** ▶  
Равенство сил действия и противодействия при столкновении двух одинаковых шаров



### Третий закон Ньютона

Силы, с которыми две материальные точки действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (33)$$

Эти силы приложены к разным телам, всегда действуют парами и являются силами одной природы.

Ньютон сформулировал этот закон так: «Любому действию всегда препятствует равное и противоположное противодействие».

Третий закон Ньютона справедлив при любом соотношении масс взаимодействующих тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света в инерциальных системах отсчёта.

**Примеры действия и противодействия.** В качестве примеров действия и противодействия можно рассматривать любые столкновения и удары. Так, при столкновении двух автомобилей каждый автомобиль получает повреждения.

Ускорение, приобретаемое телами в результате их взаимодействия, зависит от соотношения масс тел.

Оценим ускорение, которое приобретает десантник массой  $m_2 = 84$  кг при выстреле из винтовки массой  $m_3 = 6$  кг. Пуля массой  $m_1 = 9$  г вылетает в горизонтальном направлении с ускорением  $a_1 = 10^5$  м/с<sup>2</sup>.

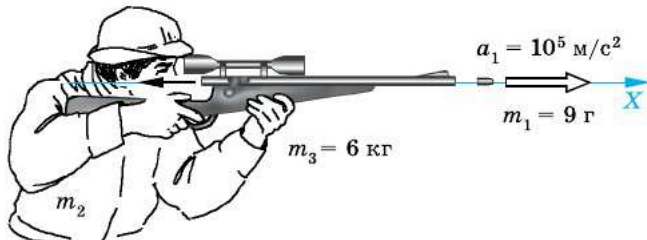
Сила, действующая на пулю,

$$\vec{F}_{12} = m_1 \vec{a}_1. \quad (34)$$

В свою очередь, на человека действует сила отдачи (рис. 54):

$$\vec{F}_{21} = (m_2 + m_3) \vec{a}_2,$$

где  $\vec{a}_2$  — ускорение, приобретаемое десанником.



#### 54

Отдача при выстреле как результат третьего закона Ньютона



По третьему закону Ньютона эти силы равны по модулю и противоположны по направлению, т. е.

$$F_{12} = F_{21}.$$

Тогда

$$m_1 a_1 = (m_2 + m_3) a_2. \quad (35)$$

Из последней формулы находим

$$a_2 = \frac{m_1 a_1}{m_2 + m_3} = 10 \text{ м/с}^2.$$

Так как масса десантника существенно больше массы пули, ускорение, им приобретаемое, на 4 порядка меньше ускорения пули.

Аналогично космический корабль многоразового использования, имеющий массу около 2000 т, при запуске (рис. 55) сообщает ускорение участкам земной коры. Это ускорение ничтожно, но всё же может быть зафиксировано сейсмическими датчиками.



### ▲ 55

*Запуск космического корабля многоразового использования*

## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте третий закон Ньютона.
2. Для каких фундаментальных взаимодействий применим третий закон Ньютона?
3. Каковы границы применимости третьего закона Ньютона?
4. С какой силой вы притягиваете к себе Землю?
5. Как ускорение, приобретаемое телами в результате парного столкновения, зависит от соотношения масс тел?

## § 17. Гравитационная сила. Закон всемирного тяготения

**Гравитационное притяжение.** Слово «гравитация» происходит от латинского слова *gravitas*, означающего «вес, тяжесть». Свободное падение тел на Землю издавна объяснялось наличием их таинственного притяжения к Земле. Астрономические наблюдения показали, что небесные тела также притягивают друг друга.

В 1685 г. Ньютон предположил, что движение земных объектов и небесных тел подчиняется общим закономерностям: *все тела притягива-*

ются друг к другу гравитационными силами. Единые универсальные законы справедливы для всей Вселенной: свободное падение яблока на Землю и движение Луны имеют общую причину — гравитационное притяжение к Земле. Радиус действия сил гравитационного притяжения неограничен.

**Закон всемирного тяготения.** Закон всемирного тяготения Ньютона определяет силу притяжения двух материальных точек.

### Закон всемирного тяготения

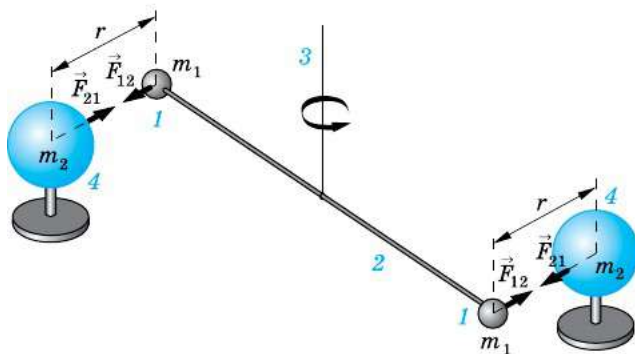
Между двумя любыми материальными точками действует сила гравитационного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек, обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними, направленная вдоль прямой, соединяющей материальные точки:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (36)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная (коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел).

В 1798 г. гравитационная постоянная была измерена английским физиком **Генри Кавендишем** с помощью *крутильных весов* (рис. 56).

Два шарика 1, имеющих одинаковую массу  $m_1$ , укреплены на концах лёгкого коромысла 2, подвешенного на упругой нити 3. Шарики находятся на расстоянии  $r$  от более массивных шаров 4 массой  $m_2$ . Под действием сил притяжения малых шаров к большим коромысло поворачивается. По углу закручивания нити определяется сила гравитационного притяжения  $F_{12}$  шариков массами  $m_1$  и  $m_2$ . Гравитационное притяжение



### 56

Принципиальная схема опыта Кавендиша по определению гравитационной постоянной

шаров также описывается законом всемирного тяготения, при этом  $r$  — расстояние между их центрами. Кавендиш нашёл числовое значение гравитационной постоянной. Последующие эксперименты лишь несколько уточнили его результат:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

*Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух тел, массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого.*

Эта сила столь мала, что мы не замечаем притяжения между окружающими нас телами и сами не ощущаем притяжения к ним. Значительным оказывается лишь притяжение тел к Земле благодаря её огромной массе. Гравитационное притяжение определяет характер движения тел вблизи Земли.

Земля не является материальной точкой при гравитационном взаимодействии с телами, находящимися на её поверхности. Тем не менее закон всемирного тяготения в виде формулы (36) справедлив для описания такого взаимодействия при условии, что  $r = R_{\oplus}$ .

Земля и Луна образуют единую систему двух тел, связанных гравитационным притяжением. Ускорения, приобретаемые Землёй и Луной под действием Солнца, примерно одинаковы, поэтому система Земля — Луна вращается как целое вокруг Солнца.

Гравитационное притяжение испытывают световые лучи при прохождении вблизи звёзд (например, Солнца). Отклонение их траектории от прямолинейной наблюдается при полном солнечном затмении, когда Луна «затеняет» Солнце.

Расчёт силы притяжения тел конечных размеров проводится с помощью принципа суперпозиции. При этом тела мысленно делятся на материальные точки, сила гравитационного взаимодействия которых определяется законом всемирного тяготения.

Суммирование этих сил даёт силу притяжения тел конечных размеров.

Закон всемирного тяготения в виде формулы (36) справедлив и для сферически симметричных тел, где под  $r$  подразумевается расстояние между их центрами.

### В О П Р О С Ы

1. В чём проявляется универсальность гравитационного притяжения?
2. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
3. Опишите опыт Кавендиша по определению гравитационной постоянной.



- Почему не приближаются друг к другу предметы, находящиеся в комнате, несмотря на их гравитационное притяжение?
- Во сколько раз уменьшается гравитационная сила притяжения к Земле космической ракеты, совершающей посадку на Луне?

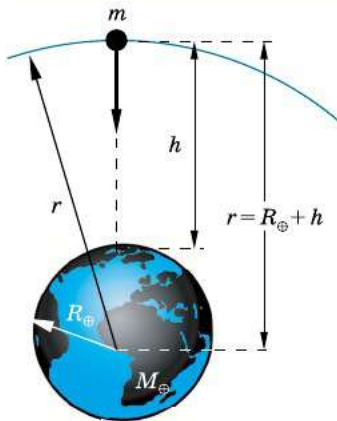
### З А Д А Ч И

- Во сколько раз сила гравитационного притяжения двух шаров массой по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга, меньше силы их притяжения к Земле?
- Сравните гравитационные силы, действующие на Луну со стороны Земли и Солнца. Масса Земли  $6 \cdot 10^{24}$  кг, масса Солнца  $2 \cdot 10^{30}$  кг. Среднее расстояние от Земли до Луны  $3,8 \cdot 10^8$  м, от Луны до Солнца  $1,5 \cdot 10^{11}$  м.
- Первый искусственный спутник Земли (был запущен в нашей стране в 1957 г.) вращался по орбите радиусом 6950 км. Чему был равен период его обращения?

## § 18. Сила тяжести

**Сила тяжести.** По закону всемирного тяготения все тела притягиваются друг к другу гравитационными силами.

**Сила тяжести — гравитационная сила, действующая на тело вследствие притяжения его Землёй.**



Например, на тело массой  $m$ , находящееся на высоте  $h$  над поверхностью Земли, действует гравитационная сила притяжения Земли (рис. 57):

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{r^2} = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}. \quad (37)$$

Гравитационное ускорение, приобретаемое телом под действием гравитационной силы, можно определить по второму закону Ньютона

$$a_g = G \frac{M_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}.$$

**Ускорение свободного падения.** Вблизи поверхности Земли (считаем, что  $h \ll R_{\oplus}$ )

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}. \quad (38)$$

▲ 57

Гравитационная сила  
в поле тяжести Земли

Следовательно,

$$a_g = \frac{F_g}{m} = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = g = 9,8 \text{ м/с}^2, \quad (39)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

**Ускорение свободного падения** — ускорение, приобретаемое телом под действием гравитационной силы вблизи поверхности небесных тел (планет, звёзд).

Напомним, что ускорение свободного падения у поверхности Земли не везде одинаково. Это связано с тем, что земной шар сплюснут у полюсов. Зависит ускорение свободного падения и от плотности пород, залегающих в недрах Земли.

В таблице 8 приведены ускорение свободного падения у поверхности планет Солнечной системы и Луны, значение которого зависит от их массы и радиуса.

*Таблица 8*

**Ускорение свободного падения на планетах Солнечной системы и Луне**

Планета	Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	Планета	Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>
Меркурий	3,7	Юпитер	26
Венера	8,9	Сатурн	12
Земля	9,8	Уран	11
Луна	1,6	Нептун	12
Марс	3,7		

*Сила тяжести*, действующая на тело массой  $m$  вблизи поверхности Земли, равна

$$\vec{F}_g = m\vec{g}.$$

Гравитационную силу, действующую на тело вблизи поверхности других планет, можно рассчитывать по этой же формуле (38).

**В О П Р О С Ы**

1. Каковы причины возникновения силы тяжести?
2. Как сила тяжести зависит от высоты подъёма тела над Землёй?
3. В каком приближении можно считать силу тяжести постоянной?

4. Дайте определение ускорения свободного падения.
5. Найдите в Интернете данные о средней плотности планет и, пользуясь таблицей 8, сделайте вывод о том, как гравитационное ускорение зависит от плотности планеты.

### З А Д А Ч И

1. Пользуясь таблицей 8, рассчитайте, во сколько раз сила тяжести космонавта на Меркурии меньше, чем на Земле.
2. Найдите ускорение свободного падения на поверхности планеты, если её масса равна массе Земли, а радиус в 2 раза меньше.
3. Во сколько раз масса Луны меньше массы Земли, если ускорение свободного падения на её поверхности  $g_{\text{Л}} = 1,6 \text{ м/с}^2$ ? Радиус Луны в 3,7 раза меньше радиуса Земли.

## § 19. Сила упругости. Вес тела

**Электромагнитная природа силы упругости.** Среди многочисленных сил электромагнитной природы наибольшее влияние на механическое движение тела оказывают две: *сила упругости* и *сила трения*.

Возникновение этих сил обусловлено силами электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами (электронами, протонами), входящими в состав атомов и молекул, из которых состоят все макроскопические тела.

**Сила упругости — сила, возникающая при малой деформации растяжения (сжатия) тела, направленная противоположно смещению частиц тела при деформации.**

*Сила упругости восстанавливает первоначальные размеры и форму тела.*

Наряду с упругими телами (теннисный мяч, стальной шар) существуют пластичные тела (пластилин, свинцовый шар), которые не восстанавливают свою форму после прекращения действия внешних сил. Их деформация не приводит к появлению силы упругости. Сила упругости зависит от величины деформации.

**Механическая модель кристалла.** Рассмотрим возникновение сил упругости при деформации кристаллического твёрдого тела. В таком теле атомы располагаются упорядоченно. Среднее расстояние между атомами не изменяется. Каждый атом находится в равновесии, так как силы при-



тяжения и отталкивания, действующие между соседними атомами, компенсируют друг друга. Характерная особенность сил взаимодействия соседних атомов состоит в том, что они подобны силам, действующим в растянутой или сжатой пружине.

При увеличении межатомного расстояния по сравнению с равновесным (растяжение пружины) атомы притягиваются друг к другу (пружина стремится сжаться). При уменьшении расстояния между атомами (сжатие пружины) возникают силы отталкивания (пружина стремится растянуться). Поэтому простейшей механической моделью кристалла являются шарики, соединённые нерастянутыми пружинами (рис. 58).

В этой модели шарики играют роль атомов, а с помощью связывающих их пружин наглядно демонстрируются особенности электромагнитного взаимодействия атомов. Предложенная механическая модель позволяет просто объяснить упругие свойства твёрдых тел.

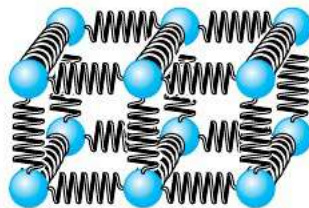
При растяжении твёрдого тела увеличивается среднее расстояние между атомами (при этом между шариками растягиваются все пружины). Суммарная сила притяжения атомов (сила упругости пружин) стремится сжать тело до первоначальных размеров.

При сжатии тела уменьшение межатомных расстояний (сжатие пружин) приводит к возникновению силы отталкивания атомов (растягивающей упругой силы). В результате эта сила стремится восстановить первоначальный объём тела.

Воздействие тела на опору (например, чайник давит на стол, автомобиль на дорогу) приводит к её сжатию, подобно сжатию пружины. При этом со стороны опоры возникает встречная сила — сила упругости (*сила реакции опоры*).

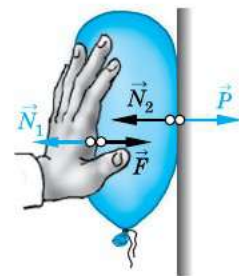
**Сила реакции опоры — сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно её поверхности.**

На рисунке 59 воздушный шарик прижимается к стене рукой с силой  $\vec{F}$ . На руку действует



### ▲ 58

*Механическая модель кристалла*



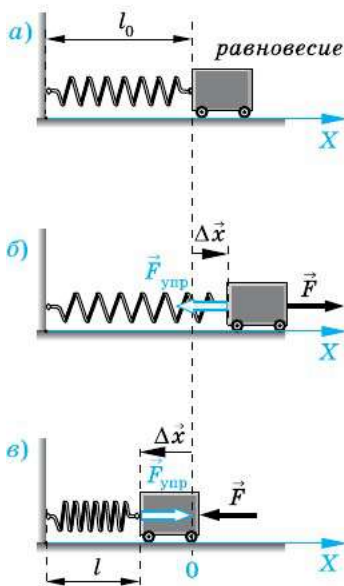
### ▲ 59

*Сжатие воздушного шарика под действием силы  $\vec{F}$  и силы реакции стены  $\vec{N}_2$*

сила реакции опоры  $\vec{N}_1$ . В свою очередь шарик действует на стену с силой  $\vec{P}$ , в результате чего возникает сила реакции стены  $\vec{N}_2$ .

При растяжении пружины, резинового шнура, нити возникает упругая сила натяжения.

**Сила натяжения — сила упругости, действующая на тело со стороны нити или пружины.**



**Закон Гука.** О величине силы упругости можно судить по степени растяжения или сжатия пружины.

*Чем больше растянута или сжата пружина, тем больше сила упругости.*

Пусть на тележку, прикреплённую пружиной малого диаметра длиной  $l_0$  к стенке и находящуюся в покое (рис. 60, а), вдоль оси  $X$  действует сила  $\vec{F}$  (рис. 60, б). Сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$ , действующая на пружину, направлена противоположно перемещению её правого конца. Модуль этого перемещения называется *удлинением*:

$$|\Delta \vec{x}| = \Delta l = |l - l_0|.$$

При сжатии на  $\Delta \vec{x}$  одномерной пружины силой  $\vec{F}$ , действующей на тележку противоположно оси  $X$  (рис. 60, в), сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$  также направлена противоположно перемещению  $\Delta \vec{x}$ . Чем больше растянута или сжата пружина (чем больше  $\Delta x$ ), тем больше сила упругости  $F_{\text{упр}}$ .

$$\vec{F}_{\text{упр}x} = -k \Delta x. \quad (40)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  — *жёсткость*. Жёсткость зависит от упругих свойств материала и размеров пружины (или тела).

### ▲ 60

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k \Delta \vec{x}$$

*Упругие силы растяжения и сжатия в пружине под действием внешней силы:*

*а — нерастянутая пружина;*

*б — растянута пружина;*

*в — сжатая пружина*

Единица жёсткости следует из формулы (40):

$$[k] = \frac{[F]}{[\Delta l]} = \text{Н/м}.$$

Единица жёсткости — *ньютон на метр* (Н/м).

Закон Гука, названный так в честь английского учёного, связывает модуль силы упругости и удлинение.

### **Закон Гука**

**Модуль силы упругости  $F_{\text{упр}}$ , возникающей при деформации тела, пропорционален его удлинению  $\Delta l$ :**

$$F_{\text{упр}} = k \Delta l. \quad (41)$$

В отличие от гравитационной силы, зависящей от расстояния между различными телами, сила упругости зависит от изменения расстояния между частями одного и того же тела.

Закон Гука, как и любой другой физический закон, имеет определённую область применения. Он справедлив лишь при упругих деформациях. Деформацию можно считать упругой при малом удлинении одномерной пружины силой, направленной вдоль пружины, т. е. когда удлинение много меньше длины нерастянутой пружины:

$$\Delta l \ll l_0.$$

При значительных деформациях ( $\Delta l < l_0$ ) сила упругости перестаёт быть пропорциональной удлинению тела. При ещё больших деформациях она становится необратимой, и тело разрушается.

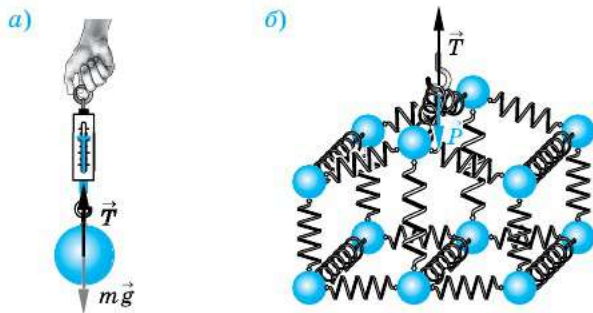
Как следует из закона Гука, *по удлинению пружины можно судить о силе, действующей на неё*. Этот факт используется для измерения сил с помощью *динамометра* — пружины с линейной шкалой, проградуированной в единицах силы.

**Вес тела.** На тело массой  $m$ , подвешенное на пружине, действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила натяжения  $\vec{T}$  (рис. 61, а).

В равновесии  $T = mg$ . По третьему закону Ньютона на пружину со стороны тела действует в направлении силы тяжести сила упругости, или вес, равный по модулю и противоположно направленный силе натяжения:

$$\vec{P} = -\vec{T}.$$





## 61

### Возникновение силы упругости

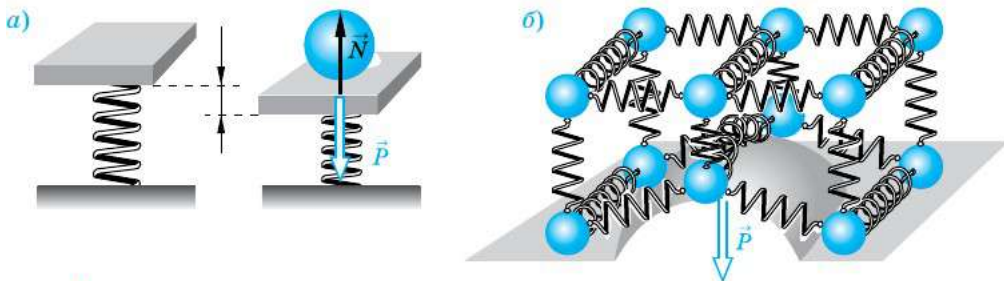
Возникновение этой силы можно наглядно представить с помощью механической модели кристалла. При подвешивании тела в результате действия силы тяжести пружинки между шариками растягиваются, стремясь затем сократиться (рис. 61, б). Поэтому на подвес (пружину) будет действовать сила упругости, направленная вниз.

Вес тела определяется суммарной силой притяжения между атомами, возникающей вследствие растяжения тела под действием силы тяжести.

**Вес тела — сила, с которой тело давит на опору или растягивает подвес вследствие своего движения или взаимодействия с другими телами.**

На тело массой  $m$ , находящееся на неподвижной горизонтальной опоре, действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила реакции опоры  $\vec{N}$ , равные по модулю,  $N = mg$  (рис. 62, а). Согласно третьему закону Ньютона, на опору действует вес

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$



## 62

### Возникновение силы упругости при размещении тела на опоре

Вес тела на неподвижной опоре определяется приростом суммарной силы отталкивания между атомами, возникающим из-за сжатия тела силой тяжести (рис. 62, б). В рассматриваемом случае вес тела равен по модулю и направлению силе тяжести:

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Сила тяжести приложена к телу, а вес приложен к опоре или подвешен. Природа этих сил различна:  $P$  — сила электромагнитной природы, а  $F_g$  — гравитационной.

### В О П Р О С Ы

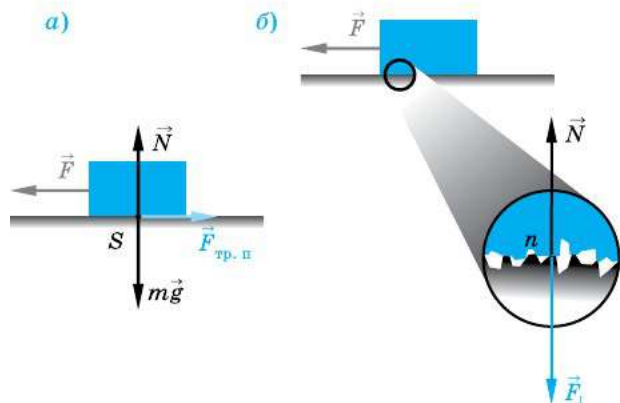
1. Какие взаимодействия определяют характер механических движений в макромире? Следствием какого взаимодействия являются силы упругости?
2. Какая механическая модель кристалла правильно описывает упругие силы, возникающие при его сжатии и растяжении?
3. Что является причиной возникновения силы реакции опоры; силы натяжения?
4. Сформулируйте закон Гука. Определите границы применимости закона Гука.
5. Где расположены точки приложения силы тяжести и веса тела?

### З А Д А Ч И

1. При растяжении стержня длиной  $l_0 = 70$  см среднее расстояние между атомами увеличилось на 1%. Найдите удлинение стержня.
2. Мяч прижимается ногой к стене и полу одновременно. Силы давления мяча на стену и пол одинаковы и равны  $F$ . Куда направлена и чему равна суммарная сила реакции опоры? Чему равен вес мяча?
3. Когда четыре человека массой по 70 кг садятся в автомобиль, пружина амортизатора автомобиля сжимается на 2,5 см. Найдите жёсткость одной пружины, если всего пружин четыре.

## § 20. Сила трения

**Трение покоя.** Сила трения, так же как и сила упругости, имеет электромагнитную природу. В отличие от силы реакции опоры (силы упругости, направленной перпендикулярно поверхности соприкосновения тел) сила трения всегда направлена вдоль соприкасающихся поверхностей.



## 63

Взаимодействие бруска с поверхностью стола:  
 а — силы взаимодействия  $\vec{F}_{\text{тр. п}}$ ,  $\vec{N}$ ;  
 б — пропорциональность силы трения покоя числу  $n$  взаимодействующих выступов и давлению  $p$  бруска на стол  $(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} \sim pr$

**Сила трения** — сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкосновения.

При контакте твёрдых тел возможны три вида трения — *трение покоя*, *трение скольжения*, *трение качения*.

*Трение покоя* — трение, возникающее при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

Предположим, что под действием внешней силы  $\vec{F}$ , приложенной к бруску параллельно поверхности, которой он соприкасается со столом, брусок остаётся в покое. Это означает, что на брусок со стороны стола действует *сила трения покоя* (рис. 63, а), препятствующая движению бруска. Сила трения покоя равна по модулю внешней силе, но направлена противоположно ей:  $\vec{F}_{\text{тр. п}} = -\vec{F}$ .

Возникновение этой силы обусловлено взаимодействием атомов, находящихся на поверхности соприкосновения тел. Наибольшая сила притяжения возникает между атомами веществ, находящимися на минимальном расстоянии друг от друга, т. е. на микроскопических выступах (рис. 63, б).

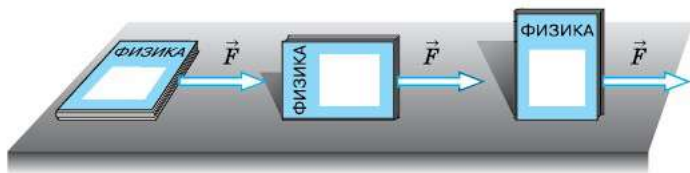
Когда приложенная сила достигает максимального критического значения  $(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}}$ , достаточного для разрыва связей между выступами, брусок начинает скользить по столу.

Естественно предположить, что максимальная сила трения покоя пропорциональна числу  $n$  взаимодействующих выступов и давлению  $p$  бруска на стол:  $(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} \sim np$ . Число  $n$  в свою очередь пропорционально пло-



64

Равенство сил, требующихся для сдвига книги (независимо от её положения)



щади поверхности соприкосновения тел:  $n \sim S$ . Давление равно отношению силы нормального давления  $F_{\perp}$ , действующей перпендикулярно поверхности соприкосновения тел, к площади поверхности  $S$ :  $p = \frac{F_{\perp}}{S}$ .

Поэтому *максимальная сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения поверхностей* (рис. 64).

По третьему закону Ньютона сила нормального давления  $F_{\perp}$  равна по модулю силе реакции опоры  $N$ .

Максимальная сила трения покоя  $(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}}$  пропорциональна силе нормального давления (а значит и силе реакции опоры):

$$(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} = \mu_{\text{п}} N, \quad (42)$$

где  $\mu_{\text{п}}$  — коэффициент трения покоя.

Коэффициент трения покоя зависит от характера обработки поверхности и от сочетания материалов, из которых состоят соприкасающиеся тела.

**Трение скольжения.** Трение скольжения возникает при относительном перемещении соприкасающихся тел.

*Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости движения соприкасающихся тел.*

Когда одно тело начинает скользить по поверхности другого, связи между атомами изначально неподвижных тел разрываются — трение уменьшается. При этом сила трения скольжения остаётся постоянной, несколько меньшей силы трения покоя. Как и максимальная сила трения покоя, сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления и, следовательно, силе реакции опоры:

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (43)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения ( $\mu < \mu_{\text{п}}$ ), зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

При ходьбе сила трения покоя, действующая на подошву, сообщает человеку ускорение. Передвигаясь по льду, человек старается идти неболь-

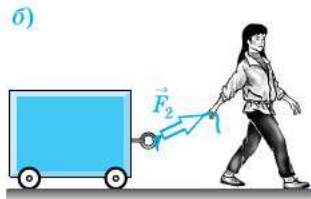
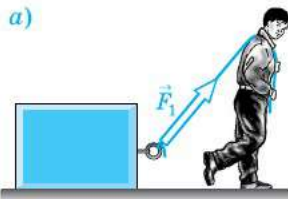
шими шагами: при большом шаге возрастает сила отталкивания ноги ото льда и начинается скольжение. Как видно из таблицы 9, коэффициент трения скольжения кожаной обуви о лёд вдвое меньше коэффициента трения покоя. Соответственно сила, сообщающая человеку ускорение, уменьшается в 2 раза.

Силу трения можно уменьшить с помощью смазки. Наиболее радикальным способом уменьшения сил трения, который в последнее время получает всё большее распространение, является создание «воздушной подушки» между соприкасающимися поверхностями.

Таблица 9

**Коэффициент трения покоя и скольжения для некоторых материалов**

Материал	$\mu_{\text{п}}$	$\mu$	Материал	$\mu_{\text{п}}$	$\mu$
Лёд — лёд	0,05—0,15	0,02	Сталь — сталь	0,6	0,4
Кожаная обувь — лёд	0,1	0,05	Кожаная обувь — ковёр	0,6	0,5
Сталь — лёд	0,1	0,05	Автошина — мокрый бетон	0,7	0,5
Автошина — лёд	0,3	0,02	Стекло — стекло	0,9	0,7
Кожаная обувь — дерево	0,3	0,2	Резиновая обувь — дерево	0,9	0,7
Дерево — дерево	0,5	0,5	Автошина — сухой бетон	1,0	0,8
Резина — асфальт	0,6	0,4	Обувь альпиниста — скала		



65

Сравнение сил трения скольжения и качения:  
а — скольжение груза;  
б — качение груза

**Трение качения.** Одно из самых гениальных изобретений человечества — колесо. Оно использовалось для транспортировки грузов ещё 5000 лет назад. Хорошо известно, что несравненно легче везти груз на тележке, чем тащить его (рис. 65).

Сила  $F_1$ , вызывающая скольжение груза (рис. 65, а), гораздо больше силы  $F_2$ , необходимой для того, чтобы его катить (рис. 65, б).

### В О П Р О С Ы

1. Какое фундаментальное взаимодействие определяет силу трения?
2. Какова причина возникновения силы трения? Перечислите возможные виды трения.
3. Чему равна сила трения покоя? Как находится максимальная сила трения покоя?
4. Что легче: удержать сани на склоне горы или перемещать их равномерно вверх по склону?
5. Куда направлена сила трения скольжения и чему она равна?

### З А Д А Ч И

1. Ластик может скользить по поверхности стола под действием постоянной силы  $F$ . При движении на какой грани сила трения скольжения ластика будет наибольшей? Размеры ластика  $50 \times 37 \times 14$  мм.
2. Найдите массу стального бруска, равномерно скользящего по горизонтальной стальной поверхности под действием силы  $F = 20$  Н. Сила направлена вдоль поверхности. Коэффициент трения скольжения приведён в таблице 9.
3. С какой силой упряжка собак равномерно перемещает сани с грузом массой  $m = 250$  кг, если коэффициент трения скольжения  $\mu = 0,1$ ?

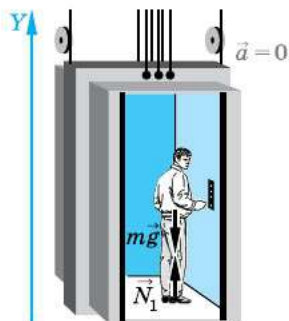
## § 21. Применение законов Ньютона

**Алгоритм решения задач по динамике**<sup>1</sup>. Для решения задач динамики целесообразно использовать следующий стандартный подход.

- *Изобразите силы, действующие на каждое тело в инерциальной системе отсчёта.*
- *Запишите для каждого тела второй закон Ньютона в векторной форме (32).*
- *Выберите координатные оси.* Если заранее известно направление ускорения, то целесообразно направить одну из осей вдоль ускорения,

<sup>1</sup> Синим цветом отмечены разделы параграфов и параграфы, содержащие дополнительный материал.





$$N_1 = mg$$

### ▲ 66

*Равенство веса тела силе тяжести в покоящемся или равномерно движущемся лифте*

а вторую (если она требуется) перпендикулярно ему.

- *Запишите второй закон Ньютона в проекциях на координатные оси. Получите систему уравнений для нахождения неизвестных величин.*
- *Решите полученную систему уравнений, используя аналитические выражения для всех сил и дополнительные условия.*

Воспользуемся предложенным подходом для решения конкретных задач динамики.

## КЛЮЧЕВЫЕ ЗАДАЧИ

Покажем с помощью законов Ньютона, что вес тела не всегда равен действующей на него силе тяжести.

### I. Вес тела в лифте

Человек массой  $m$  находится в лифте. Найдём силу давления человека на пол лифта (вес), если:

- а) лифт покоится или равномерно движется;
- б) лифт движется с постоянным ускорением  $\vec{a}$ , направленным вверх;
- в) лифт движется с постоянным ускорением  $\vec{a}$ , направленным вниз.

**Решение.**

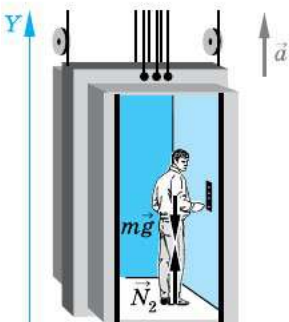
- а) *Ускорение лифта равно нулю ( $a = 0$ ).*

Изобразим силу тяжести  $m\vec{g}$  и силу реакции опоры  $\vec{N}_1$ , действующие на тело (рис. 66). Согласно третьему закону Ньютона, сила реакции опоры равна по модулю и противоположна по направлению весу тела  $\vec{P}_1$ . Поэтому большинство задач о нахождении веса тела сводятся к задачам определения силы реакции опоры.

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}_1.$$

Направим ось  $Y$  вертикально вверх.



$$N_2 > mg$$

### ▲ 67

*Перегрузка при движении лифта с постоянным ускорением, направленным противоположно ускорению свободного падения*

Запишем второй закон Ньютона через проекции сил на ось  $Y$ , учитывая, что  $a = 0$ :

$$0 = -mg + N_1,$$

$$P_1 = N_1 = mg.$$

Вес тела, находящегося в покое или движущегося равномерно и прямолинейно, равен силе тяжести.

б) Лифт движется с постоянным ускорением  $\vec{a}$ , направленным вверх (рис. 67).

Запишем второй закон Ньютона в проекции на ось  $Y$ :

$$ma = -mg + N_2.$$

Тогда

$$P_2 = N_2 = m(g + a). \quad (44)$$

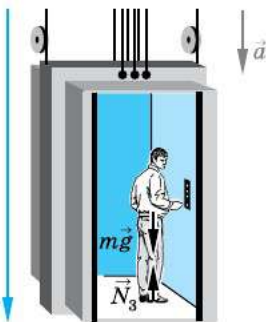
В этом случае вес больше, чем гравитационная сила. Возрастание веса (перегрузки) космонавты и пилоты реактивных самолётов особенно остро ощущают при взлёте и посадке, когда ускорение максимально. Количественно возрастание веса характеризуется *коэффициентом перегрузки*, который равен отношению ускорения тела к ускорению свободного падения.

Например, при посадке космический корабль может двигаться равнозамедленно с ускорением  $a = 6g$ , направленным от Земли вверх. В этом случае  $P_2 = 7mg$ , т. е. вес увеличивается в 7 раз, что у нетренированных людей может вызвать временную утрату зрения и потерю сознания. Отрицательные физиологические эффекты (табл. 10), связанные с перегрузками, легче переносятся космонавтом, если его тело располагается перпендикулярно направлению ускорения. Это позволяет выдерживать даже десяти-двенадцатикратное увеличение веса. Несмотря на все меры

**Таблица 10**

**Физиологические эффекты, связанные с перегрузками**

Ускорение	$\frac{P}{mg}$	Физиологический эффект
$2g$	3	Движение затруднено
$3g$	4	Ходьба невозможна
$4-6g$	5-7	Нарастающая нечёткость зрения, временная потеря зрения



$$N_3 < mg$$

## 68

Уменьшение веса по сравнению с силой тяжести

предосторожности, подобная перегрузка сопряжена с болью в груди, усталостью, частичной потерей периферического зрения.

в) Лифт движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вниз.

В этом случае удобно выбрать ось  $Y$ , направленную вниз (рис. 68).

Проецируя второй закон Ньютона на ось  $Y$ , получаем

$$ma = mg - N_3.$$

Следовательно,

$$P_3 = N_3 = m(g - a), \quad (45)$$

т. е. вес тела меньше силы тяжести.

Вес тела на экваторе меньше, чем на полюсах Земли, так как вследствие вращения Земли вокруг оси тело на экваторе движется с центростремительным ускорением.

При свободном падении  $\vec{a} = \vec{g}$ . Вес при этом становится равным нулю, т. е. возникает состояние невесомости.

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

Любое тело, свободно движущееся в гравитационном поле Земли, находится в состоянии невесомости. Длительное пребывание космонавта в состоянии невесомости существенно влияет на физиологические процессы в организме, приспособившемся к земной гравитации в результате длительной эволюции.

## II. Скольжение тела по горизонтальной поверхности

Найдём ускорение и силу реакции опоры тела массой  $m$ , движущегося по поверхности стола, под действием силы  $\vec{F}$ , направленной под углом  $\alpha$  к горизонтали (рис. 69). Коэффициент трения скольжения между телом и поверхностью стола равен  $\mu$ .

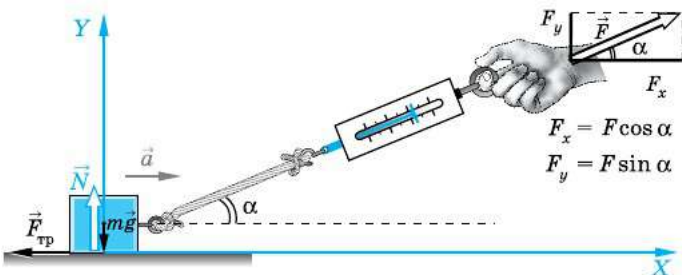
**Решение.**

На тело действуют: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила реакции опоры  $\vec{N}$ , сила  $\vec{F}$  и сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ , направленная противоположно скорости движения.

Второй закон Ньютона в векторной форме имеет вид

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{тр}}. \quad (46)$$





## 69

Уменьшение силы реакции опоры и силы трения скольжения за счёт вертикальной компоненты силы, приподнимающей тело

Направим ось  $X$  вдоль ускорения  $\vec{a}$ , а ось  $Y$  вертикально. Спроецируем уравнение (46) на оси  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{cases} ma = 0 + 0 + F \cos \alpha - F_{\text{тр}} & (\text{на ось } X), \\ 0 = -mg + N + F \sin \alpha + 0 & (\text{на ось } Y). \end{cases} \quad (47)$$

$$\begin{cases} ma = 0 + 0 + F \cos \alpha - F_{\text{тр}} & (\text{на ось } X), \\ 0 = -mg + N + F \sin \alpha + 0 & (\text{на ось } Y). \end{cases} \quad (48)$$

Согласно (43)

$$F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Подставляя выражение для силы трения в уравнение (47) системы, получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными  $N$  и  $a$ :

$$\begin{cases} ma = F \cos \alpha - \mu N, \\ 0 = -mg + N + F \sin \alpha. \end{cases} \quad (49)$$

$$\begin{cases} ma = F \cos \alpha - \mu N, \\ 0 = -mg + N + F \sin \alpha. \end{cases} \quad (50)$$

Из уравнения (50) находим силу реакции опоры  $N$ :

$$N = mg - F \sin \alpha. \quad (51)$$

Сила реакции опоры меньше силы тяжести, когда на тело кроме силы тяжести действуют силы, имеющие составляющую, направленную противоположно силе тяжести.

Вертикальная компонента внешней силы  $\vec{F}_y$  ( $F_y = F \sin \alpha$ ) приподнимает тело и уменьшает силу давления на опору, а следовательно, и силу трения. Аналогично, сила сопротивления движению корабля на воздушной подушке уменьшается за счёт подъёмной силы, приподнимающей корабль из воды. Подставляя  $N$  из выражения (51) в уравнение (49) системы (49)—(50)

$$ma = F \cos \alpha - \mu(mg - F \sin \alpha),$$

находим ускорение тела:

$$a = \frac{F \cos \alpha - \mu(mg - F \sin \alpha)}{m}. \quad (52)$$

## В О П Р О С Ы

1. В чём состоит стандартный подход к решению задач механики?
2. При каком движении лифта вес тела, находящегося в нём: равен силе тяжести; больше силы тяжести; меньше силы тяжести; равен нулю?
3. Какой способ перемещения холодильника по полу требует меньших усилий — когда его толкают или когда тянут?
4. Каковы возможные физиологические эффекты при перегрузках?
5. Под действием какой силы  $F$  (см. задачу II) тело движется равномерно?

## З А Д А Ч И

1. Собачья упряжка начинает тащить стоящие на снегу сани массой 100 кг с постоянной силой 114 Н. За какой промежуток времени сани проедут первые 200 м пути? Коэффициент трения скольжения полозьев о снег 0,1.
2. Вагон массой  $m$  соединён с электровозом массой  $M$  пружиной жёсткостью  $k$ . Найдите ускорение системы «вагон—электровоз», если на систему действует тормозящая сила  $F$ . Определите сжатие пружины.
3. Тепловоз тащит состав из трёх одинаковых вагонов массой  $m = 50$  т с силой  $F = 17\,940$  Н. Коэффициент трения качения колёс о рельсы  $\mu_{\text{кач}} = 0,002$ . С каким ускорением движется состав? Определите силы натяжения сцепок между вагонами.

## Т В О Р Ч Е С К И Е    З А Д А Н И Я

1. Каким образом меняются состояние, ощущения человека при «переходе» из инерциальной системы отсчёта в неинерциальную?
2. Напишите эссе «Движущие силы моего развития».
3. Какие события в вашей жизни свидетельствуют о выполнении/невыполнении законов Ньютона?
4. Подготовьте доклад «Трение при движении, «трение» в отношениях людей — причины, механизмы возникновения, виды».

## О С Н О В Н Ы Е    П О Л О Ж Е Н И Я

■ **Движение по инерции** — движение тела, происходящее при скомпенсированных внешних воздействиях.

■ **Инерциальная система отсчёта** (ИСО) — система отсчёта, в которой тело сохраняет состояние по-

кой или равномерного прямолинейного движения, если на тело не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.

■ Преобразования Галилея:

$$x = x' + vt,$$



где  $x$  — координата тела в ИСО  $X$ ;  $x'$  — координата тела в ИСО  $X'$ , движущейся относительно  $X$  со скоростью  $v$ .

■ **Закон сложения скоростей:**

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

где  $v_x$  — скорость тела в ИСО  $X$ ;  $v_{x'}$  — скорость тела в ИСО  $X'$ , движущейся относительно  $X$  со скоростью  $v$ .

■ **Принцип относительности Галилея:** во всех инерциальных системах отсчёта законы классической механики имеют один и тот же вид.

■ **Первый закон Ньютона:** существуют инерциальные системы отсчёта, в которых все тела в отсутствие внешнего воздействия движутся прямолинейно и равномерно.

■ **Сила** — векторная физическая величина, являющаяся мерой воздействия на тело со стороны других тел, в результате которого тело приобретает ускорение или деформируется.

Единица силы — *ньютон* (Н):

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2.$$

■ **Инертность** — физическое свойство тела, которое заключается в том, что различные тела поразному изменяют свою скорость при одном и том же внешнем воздействии.

■ **Принцип суперпозиции сил:** результирующая (равнодействующая) сила, действующая на тело со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми на него действует каждое из этих тел:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

■ **Второй закон Ньютона:** в инерциальной системе отсчёта ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\Sigma \vec{F}}{m}.$$

■ **Третий закон Ньютона:** силы, с которыми две материальные точки действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:

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

■ Все механические явления определяются электромагнитным и гравитационным взаимодействиями. Электромагнитными силами являются сила упругости и сила трения.

■ **Закон всемирного тяготения:** между двумя любыми материальными точками действует сила гравитационного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек, обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними, направленная вдоль прямой, соединяющей материальные точки:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

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

Гравитационная сила притяжения направлена вдоль прямой, соединяющей материальные точки.

■ **Сила тяжести** — гравитационная сила, действующая на тело вследствие притяжения его Землёй.



Вблизи поверхности Земли сила тяжести, действующая на тело массой  $m$ ,

$$F_g = mg.$$

■ **Сила упругости** — сила, возникающая при малой деформации растяжения (сжатия) тела, направленная противоположно смещению частиц тела при деформации.

■ **Сила реакции опоры** — сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно её поверхности.

■ **Сила натяжения** — сила упругости, действующая на тело со стороны нити или пружины.

■ **Закон Гука:** модуль силы упругости, возникающей при деформации тела, пропорционален его удлинению:

$$F_{\text{упр}} = k \Delta L.$$

■ **Сила трения** — сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкосновения.

■ **Сила трения покоя** равна по модулю и противоположно направлена силе, приложенной к покояще-

муся телу параллельно поверхности, которой оно соприкасается с другим телом.

■ **Максимальная сила трения покоя** пропорциональна силе реакции опоры:

$$(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} = \mu_{\text{п}} N,$$

где  $\mu_{\text{п}}$  — коэффициент трения покоя.

Сила трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения.

■ **Вес тела** — сила, с которой тело давит на опору или растягивает подвес вследствие своего движения или взаимодействия с другими телами.

**Перегрузка** — увеличение веса тела, вызванное его ускоренным движением.

**Невесомость** — состояние, при котором тело движется только под действием силы тяжести. Вес тела в состоянии невесомости равен нулю. В таких условиях находятся тела в космическом корабле.



## § 22. Импульс тела

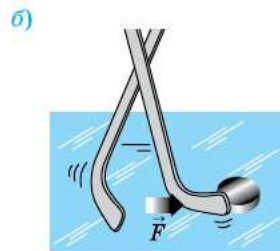
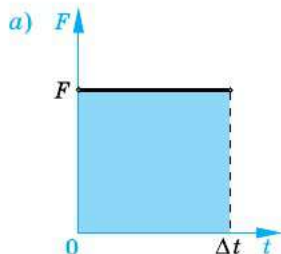
**Импульс тела.** Законы динамики позволяют описать эволюцию механической системы в результате действия на неё внешних сил и взаимодействия составляющих её элементов. Во многих случаях детальная информация о промежуточных состояниях системы не представляет существенного интереса. Наиболее важной является связь начального и конечного состояний системы, будь то рождение элементарных частиц или столкновение автомобилей. Поэтому в физике большое внимание уделяется поиску физических величин, сохраняющихся неизменными в процессе эволюции системы. Законы сохранения в классической механике могут быть получены из законов динамики Ньютона.

Рассмотрим сначала, как на движение тела влияет длительность действия силы.

Для упрощения математических оценок будем считать, что:

- модуль силы не зависит от координаты  $x$ ;
- сила, начиная действовать в момент времени  $t = 0$ , остаётся постоянной в течение времени  $\Delta t$  и затем прекращает своё действие, т. е. становится равной нулю при  $t > \Delta t$  (рис. 70, а).

Подобная зависимость силы от времени реализуется, например, при броске шайбы хоккеистом (рис. 70, б).



**70** ►  
Зависимость силы,  
действующей на шайбу  
при броске, от времени

Предположим, что до броска (при  $t < 0$ ) тело (шайба) массой  $m$  двигалось равномерно со скоростью  $\vec{v}_0$ . Под действием постоянной силы  $\vec{F}$  оно в течение времени  $\Delta t$  будет двигаться равноускоренно с ускорением  $\vec{a}$ :

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

Скорость, приобретаемую телом при равноускоренном движении за промежуток времени  $\Delta t$ , можно найти по формуле (8):

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t = \vec{v}_0 + \frac{\vec{F}}{m}\Delta t.$$

Перенося  $\vec{v}_0$  в левую часть равенства с противоположным знаком и умножая обе части полученного соотношения на  $m$ , получаем

$$m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \vec{F}\Delta t.$$

Правая часть этого выражения содержит величины, характеризующие внешнее воздействие на тело. Произведение силы и длительности её действия — *импульс силы*  $F\Delta t$  (его единица Н·с). Левая часть представляет собой изменение *импульса тела*, характеризующего движение тела.

**Импульс тела** — векторная физическая величина, равная произведению массы тела и его скорости и совпадающая по направлению со скоростью:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (53)$$

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

Импульс является фундаментальной и (как мы покажем в дальнейшем) сохраняющейся характеристикой состояния физической системы.

**Изменение импульса.** В начальный момент времени импульс тела  $\vec{p}_0 = m\vec{v}_0$ , поэтому

$$\vec{p} - \vec{p}_0 = \vec{F}\Delta t. \quad (54)$$

Это выражение является более общей формулировкой **второго закона Ньютона**.

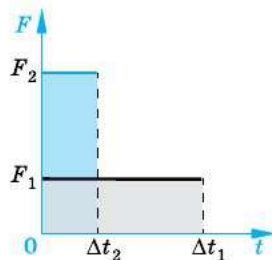
*Изменение импульса тела определяется импульсом силы, действующей на него.* Импульс силы характеризуется произведением силы на вре-



мя её действия. Следовательно, одинаковое воздействие на тело может оказать небольшая сила, действующая значительный промежуток времени, и большая сила, которая действует коротковременно. Этот эффект хорошо известен как хоккеистам, так и любителям хоккея. Скорость, приобретаемая шайбой при сильном броске, когда время контакта клюшки с шайбой оказывается порядка секунды, примерно совпадает с её скоростью при мощном, но коротковременном щелчке.

Если импульс силы  $\vec{F}_1\Delta t_1$  при броске шайбы равен импульсу силы при щелчке  $\vec{F}_2\Delta t_2$ , то площади заштрихованных прямоугольников равны (рис. 71). При этом, согласно соотношению (54), при броске и при щелчке шайбы будут одинаковы изменение импульса и конечная скорость шайбы.

В случае, когда на тело не действует внешняя сила ( $\vec{F} = 0$ ), импульс тела сохраняется:  $\vec{p} = \vec{p}_0$  (см. (54)).



### ▲ 71

*Равенство импульсов силы  $F_1\Delta t_1$  и  $F_2\Delta t_2$  при броске шайбы и при щелчке*

## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте определение импульса тела.
2. При каком условии импульс тела сохраняется?
3. Почему небольшая сила, действующая значительный промежуток времени, оказывает на движение тела такое же воздействие, как и большая сила, которая действует коротковременно?
4. Чем определяется изменение импульса тела?
5. При каком условии импульс тела сохраняется?

## З А Д А Ч И

1. По изогнутому под прямым углом шлангу течёт вода. Определите направление импульса силы, изменяющей направление потока воды, и направление силы, действующей на шланг.
2. Автомобиль массой 2000 кг, двигаясь на север со скоростью 90 км/ч, повернул на перпендикулярное шоссе, ведущее на восток. Определите направление и модуль изменения импульса автомобиля.
3. Мяч массой 100 г, движущийся со скоростью 108 км/ч, ударяется о стенку и отскакивает от неё с той же скоростью. Найдите изменение импульса мяча.

## § 23. Закон сохранения импульса

**Замкнутая система.** Рассмотрим систему, состоящую из двух тел, взаимодействующих друг с другом. Такую систему образуют, например, два шара массой  $m_1$  и  $m_2$ , движущихся навстречу друг другу с начальной скоростью  $\vec{v}_{01}$  и  $\vec{v}_{02}$  соответственно (рис. 72, а).

Пренебрегая внешними силами, действующими на шары (например, силой тяжести), данную систему тел можно считать *замкнутой*.

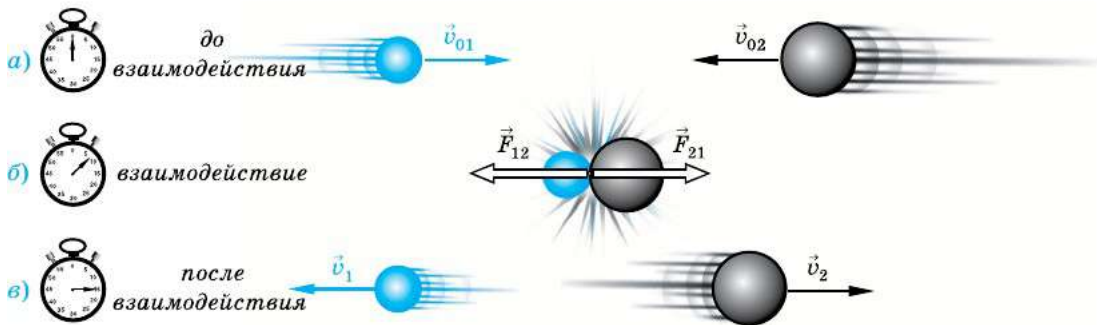
**Замкнутая система — система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю.**

Силы взаимодействия между телами системы называются *внутренними силами*. При столкновении шаров сила  $\vec{F}_{12}$ , которая действует на первый шар со стороны второго (рис. 72, б), по третьему закону Ньютона равна по модулю и противоположна по направлению силе  $\vec{F}_{21}$ , действующей на второй шар со стороны первого:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (55)$$

Согласно второму закону Ньютона,

$$\vec{F}_{12} = m_1 \vec{a}_1, \quad \vec{F}_{21} = m_2 \vec{a}_2. \quad (56)$$



### ▲ 72

Сохранение суммарного импульса шаров при их столкновении:

а — до взаимодействия;

б — в момент взаимодействия;

в — после взаимодействия

Обозначим скорость шаров после столкновения  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  (рис. 72, в), а длительность столкновения —  $\Delta t$ . Ускорение шаров

$$\vec{a}_1 = \frac{\Delta \vec{v}_1}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_{01}}{\Delta t}, \quad \vec{a}_2 = \frac{\Delta \vec{v}_2}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_{02}}{\Delta t}.$$

Подставляя эти выражения в уравнение (56) и используя соотношение (55), находим

$$m_1 \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_{01}}{\Delta t} = -m_2 \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_{02}}{\Delta t}.$$

**Закон сохранения импульса.** Сократив обе части уравнения на  $\Delta t$  и перегруппировав слагаемые в обеих его частях, получим **закон сохранения импульса**:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}. \quad (57)$$

Правая часть равенства — суммарный импульс системы в начальный момент времени, а левая — сумма импульсов тел после взаимодействия (столкновения). Это означает, что при столкновении суммарный импульс системы сохраняется.

### Закон сохранения импульса

**В инерциальной системе отсчёта суммарный импульс замкнутой системы тел остаётся постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой.**

Внутренние силы, изменяя импульсы отдельных тел системы, не изменяют её суммарный импульс (рис. 73). Импульс системы тел могут изменить только внешние силы.

Например, при взрыве снаряда сила давления газов (внутренняя сила) превышает силу тяжести снаряда (внешнюю силу) более чем в 10 000 раз. Поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что в момент взрыва импульс такой системы сохраняется.

Закон сохранения импульса, выведенный из законов Ньютона (справедливых для описания движения системы макрочастиц), имеет более широкую область применимости, чем эти законы. Импульс сохраняется и для систем микрочастиц, для которых законы Ньютона неприменимы.

Закон сохранения импульса справедлив только в инерциальных системах отсчёта.







### 73

*Возникновение значительной отдачи при использовании мощного брандспойта*

**Реактивное движение ракеты.** Закон сохранения импульса позволяет рассчитать характеристики тела при *реактивном движении*.

**Реактивное движение — движение, возникающее при отделении от тела с некоторой скоростью какой-либо его части.**

Важным примером реактивного движения является движение ракеты. Отделяющейся частью ракеты при таком движении является струя газов, образующихся при сгорании топлива. Когда реактивная струя с большой скоростью выбрасывается из ракеты, то ракета вследствие отдачи устремляется в противоположную сторону.

Для того чтобы ракета развила наибольшую скорость, её делают многоступенчатой. После выработки топлива соответствующая ступень отделяется, уменьшая общую массу ракеты. Это позволяет увеличить её скорость.

Исследования околоземного и межпланетного космического пространства проводятся с помощью многоступенчатых ракет. С их помощью в нашей стране был выведен на околоземную орбиту первый искусственный спутник Земли в 1957 г., обеспечен полёт Ю. А. Гагарина в космическом околоземном пространстве в 1961 г. Многоступенчатые ракеты доставили в 1969 г. астронавтов на поверхность Луны, позволили произвести исследования планет Солнечной системы.

Для межзвёздных полётов требуются значительно более высокие скорости. Учитывая, что ближайшие звёзды находятся на расстоянии около четырёх световых лет, для того чтобы путешествие заняло разумное время (40 лет в один конец), необходимо развить скорость порядка  $0,1$  скорости света  $c$ .



## В О П Р О С Ы

1. При каком условии систему тел можно считать замкнутой? Приведите примеры замкнутых систем.
2. Сформулируйте закон сохранения импульса. Как эффект отдачи используется в реактивном движении?
3. Камень дважды бросают под одним и тем же углом к горизонту: сначала с причала, затем из покоящейся на воде надувной резиновой лодки. Скорости камня относительно причала и лодки одинаковы. В каком случае дальность полёта камня больше и почему?
4. Почему лодка начинает отплывать от берега, когда человек выходит из неё на причал?
5. Почему для запуска космических кораблей с поверхности Земли используются многоступенчатые ракеты?

## З А Д А Ч И

1. Два шара массой  $m_1 = 1$  кг и  $m_2 = 2$  кг скользят по гладкой горизонтальной поверхности на запад и север со скоростью  $v_1 = 10$  м/с и  $v_2 = 5$  м/с соответственно. Определите направление и модуль импульса системы двух шаров.
2. Граната массой 1 кг, летящая со скоростью 20 м/с на запад, разрывается на два осколка. Один массой 0,2 кг начинает двигаться со скоростью 500 м/с в направлении полёта гранаты. В каком направлении и с какой скоростью полетит другой осколок?
3. Человек массой  $m = 70$  кг переходит с кормы лодки на нос. Масса лодки  $M = 130$  кг, её длина  $l = 4$  м. На какое расстояние и в какую сторону отплывёт лодка?

## § 24. Работа силы

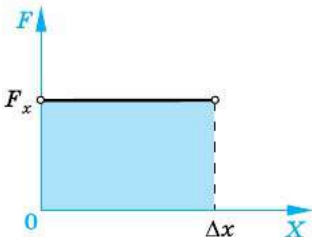
**Работа как пространственная характеристика действия силы.** Любая сила действует в определённой области пространства в течение конечного интервала времени и, как мы отмечали ранее, может зависеть как от времени, так и от координаты.

Если на тело, движущееся вдоль оси  $X$ , на перемещении  $\Delta \vec{x}$  действует сила  $\vec{F}$ , то можно ввести по аналогии *пространственную характеристику действия силы — работу*<sup>1</sup>.

**Работа — скалярная физическая величина, равная произведению проекции силы на ось  $X$  и перемещения тела вдоль этой оси:**

$$A = F_x \Delta x. \quad (58)$$

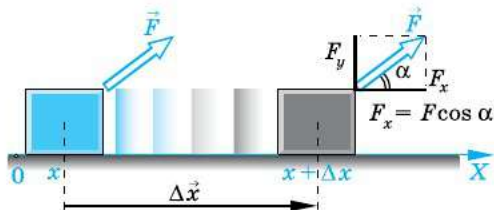
<sup>1</sup> Как мы увидим впоследствии, работа равна изменению другой фундаментальной физической величины — механической энергии, для которой также справедлив закон сохранения.



### ▲ 74

Геометрический смысл работы — площадь под кривой  $F_x(x)$ :

$$A = F_x \Delta x$$



### ▲ 75

Работа, совершаемая силой  $\vec{F}$  при перемещении тела на  $\Delta x$ .

Работа определяется проекцией силы  $F_x = F \cos \alpha$

Единица работы — джоуль (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2.$$

1 Дж — работа, совершаемая силой 1 Н при перемещении тела на 1 м.

Работа силы численно равна площади прямоугольника со сторонами  $F_x$  и  $\Delta x$  (рис. 74).

Проекция силы  $F_x$  в направлении вектора перемещения  $\vec{\Delta x}$  равна проекции вектора  $\vec{F}$  на ось X:

$$F_x = F \cos \alpha, \quad (59)$$

где  $\alpha$  — угол между вектором силы  $\vec{F}$  и вектором перемещения  $\vec{\Delta x}$  (рис. 75).

Подставляя выражение проекции силы в формулу работы, получаем

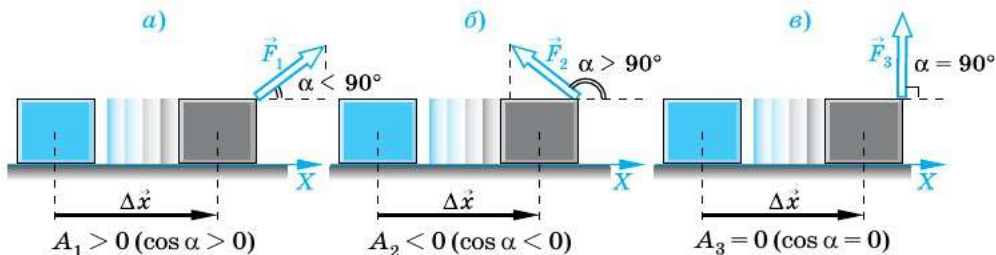
$$A = F \Delta x \cos \alpha. \quad (60)$$

**Работа силы  $\vec{F}$  при перемещении  $\vec{\Delta x}$  равна произведению модулей этих векторов и косинуса угла между ними.**

Сила и перемещение — векторные величины, характеризующиеся как модулем, так и направлением.

Работа — скалярная физическая величина. Знак работы (положительный или отрицательный) определяется знаком  $\cos \alpha$ .





## ▲ 76

*Зависимость знака работы от взаимной ориентации силы и перемещения*

Работа силы положительна ( $A_1 > 0$ ) (рис. 76, а), если угол  $\alpha$  острый ( $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ ),  $\cos \alpha > 0$ .

Работа силы отрицательна ( $A_2 < 0$ ), если угол  $\alpha$  тупой ( $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ ),  $\cos \alpha < 0$  (рис. 76, б).

Работа силы  $F_3$ , перпендикулярной перемещению, равна нулю (рис. 76, в).

Сила, действующая на движущееся тело со стороны другого тела, совершает работу. Например, гравитационная сила притяжения Земли и сила сопротивления воздуха совершают работу при падении капель дождя и метеоритов. Сила упругости совершает работу при распрямлении сжатой пружины и натянутой тетивы лука.

Если на тело действует несколько сил, то полная работа (работа всех сил) равна сумме работ, совершаемых каждой силой в отдельности.

**Работа сил реакции опоры, трения, тяжести.** Найдём работу сил, действующих на тело массой  $m$  (рис. 77), соскальзывающее с вершины наклонной плоскости (точка  $O$ ) к её основанию (точка  $1$ ). Угол наклона плоскости к горизонту  $\alpha$ , её высота  $H$ , коэффициент трения скольжения  $\mu$ .

На скользящее тело действуют сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила реакции опоры  $\vec{N}$  и сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ .

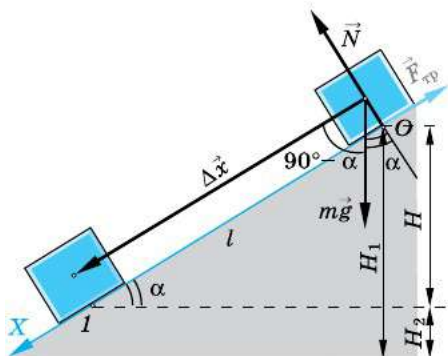
Работа силы реакции опоры, перпендикулярной перемещению  $\Delta x$ , равна нулю.

Сила трения, направленная противоположно перемещению, составляет с ним угол  $180^\circ$ , поэтому работа силы трения отрицательна:

$$A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \Delta x \cos 180^\circ = -F_{\text{тр}} \Delta x.$$

Так как  $F_{\text{тр}} = \mu N$ ,  $N = mg \cos \alpha$ ,  $\Delta x = l = \frac{H}{\sin \alpha}$ , то

$$A_{\text{тр}} = -\mu mg H \operatorname{ctg} \alpha.$$



## 77

Работа сил, действующих на тело, соскальзывающее с наклонной плоскости. Работа силы трения при соскальзывании тела отрицательна. Работа силы тяжести не зависит от угла наклона плоскости

Сила тяжести составляет с перемещением угол  $(90^\circ - \alpha)$ , поэтому её работа

$$A_g = mg l \cos(90^\circ - \alpha) = mg l \sin \alpha = mgH. \quad (61)$$

Из формулы (61) следует, что *работа силы тяжести зависит от высоты плоскости и не зависит от угла наклона плоскости* (рис. 78, а).

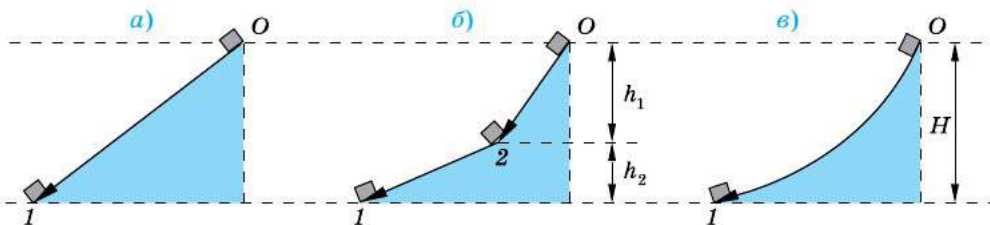
Полная работа силы тяжести при перемещении тела из точки  $O$  в точку  $1$  по двум прямолинейным участкам  $O-2$  и  $2-1$  (рис. 78, б) является суммой работ на каждом участке:

$$A_g = A_{O-2} + A_{2-1}.$$

Применяя формулу (61) для каждого участка и учитывая, что  $H = h_1 + h_2$ , получаем

$$A_g = mgh_1 + mgh_2 = mgH.$$

При движении тела по произвольной траектории (рис. 78, в) между точками  $O$  и  $1$  работа силы тяжести также равна  $mgH$ .



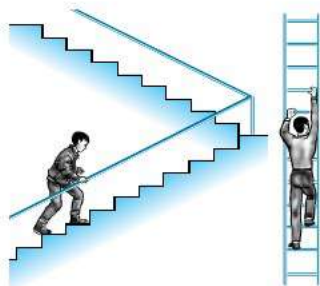
## 78

Работа силы тяжести не зависит от формы траектории при перемещении тела из точки  $O$  в точку  $1$

Тело массой  $m$  можно равномерно поднять на высоту  $H$ , совершив одну и ту же работу  $mgH$  двумя способами:

- приложив силу, равную  $mg$ , по вертикали;
- приложив меньшую силу, равную  $mg\sin\alpha$ , вдоль наклонной плоскости.

При этом меньшая сила должна действовать на большем перемещении  $\Delta x = H/\sin\alpha$ . Наклонная плоскость облегчает подъём тела на определённую высоту, хотя и увеличивает путь. Так, уменьшить усилия при подъёме позволяет применение наклонных лестниц (рис. 79).



### ▲ 79

*Снижение физических усилий при применении наклонных лестниц*

## В О П Р О С Ы

1. В чём заключается физический смысл работы?
2. Как можно найти работу графически?
3. При каких условиях работа силы положительна; отрицательна; равна нулю?
4. В каком случае штангист совершает большую работу: при подъёме штанги массой 100 кг на высоту 2 м или при подъёме штанги массой 120 кг на высоту 1,5 м?
5. Почему наклонные лестницы облегчают усилия при подъёме?

## З А Д А Ч И

1. Для разрезания сыра толщиной 15 см требуется усилие 40 Н. Какая при этом совершается работа?
2. Деревянный контейнер массой  $m = 200$  кг равномерно передвинули по деревянному полу на расстояние  $l = 5$  м. Найдите работу, совершённую при таком перемещении. Коэффициент трения скольжения  $\mu = 0,5$ .
3. Сердце взрослого человека за одно сокращение прогоняет около  $160$  см<sup>3</sup> крови. Оно сокращается примерно 70 раз в минуту, совершая работу 1 Дж за каждое сокращение. Какую работу совершает сердце за день?

## § 25. Мощность

**Средняя мощность.** Зачастую бывает важно знать, за какое время совершается работа. Скорость совершения работы характеризуют физической величиной, называемой *мощностью*. Подобно средней скорости в кинематике, в динамике вводят среднюю мощность.



**Средняя мощность** — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, за который она совершена:

$$P_{\text{ср}} = \frac{A}{t}. \quad (62)$$

Единица мощности — *ватт* (Вт):

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с.}$$

В качестве единицы мощности в 1789 г. *Джеймс Уатт* ввёл лошадиную силу (л. с.), иногда используемую даже в настоящее время. Л. с. — средняя работа за 1 с, которую могла совершить сильная ломовая лошадь, равномерно работающая целый день.

$$1 \text{ л. с.} = 736 \text{ Вт.}$$

**Мгновенная мощность.** Подобно мгновенной скорости в кинематике, в динамике используют понятие мгновенной мощности.

**Мгновенная мощность** — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого она совершена (при  $\Delta t \rightarrow 0$ ).

При перемещении  $\Delta \vec{x}$  проекция силы  $\vec{F}$  совершает работу  $A = F_x \Delta x$  (см. (58)).

Мгновенная мощность

$$P = \frac{F_x \Delta x}{\Delta t} = F_x \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Согласно равенству (4),

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_x,$$

где  $v_x$  — проекция мгновенной скорости на направление перемещения.

Окончательно получаем

$$P = F_x v_x. \quad (63)$$

*Мгновенная мощность силы, действующей на тело, равна произведению модуля скорости тела на проекцию силы на направление мгновенной скорости тела.*

Следовательно, чем больше скорость автомобиля, тем меньшая сила тяги (равная силе трения покоя колёс о землю) требуется для её поддержания (при постоянной мощности двигателя):

$$F_x = \frac{P}{v_x}.$$

Требуемая сила тяги обратно пропорциональна скорости автомобиля. С ростом скорости водитель может переходить на повышенные передачи. При этом колёса будут вращаться быстрее, но при меньшем усилии.

При заданной максимальной мощности автомобиль не может разогнаться выше некоторой предельной скорости

$$v_x = \frac{P}{F_x}.$$

Скрытые резервы мощности человеческого организма огромны. Человек в хорошем физическом состоянии может развивать мощность около 0,1 л. с., т. е. 75 Вт. В течение очень коротких интервалов времени человеческий организм способен развивать мгновенную мощность, в несколько раз превышающую это значение (до нескольких кВт).

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте определение средней мощности. В каких единицах измеряется мощность?
2. Чему равна мгновенная мощность?
3. К каким величинам относится мощность — скалярным или векторным?
4. Почему на высоких скоростях автомобилю требуется меньшая сила тяги для её поддержания?
5. На что расходуется мощность двигателей палубного истребителя, зависшего над авианосцем?

### З А Д А Ч И

1. Какой минимальной мощностью должен обладать двигатель подъёмника, чтобы поднять груз массой 100 кг на высоту 20 м за 9,8 с?
2. Вентиляторный ремень автомобиля, движущийся со скоростью 40 м/мин, натянут с силой 30 Н. Определите мощность, передаваемую ремнём.
3. Река Замбези в Центральной Африке приносит к водопаду Виктория ежеминутно 90 млн л воды (высота падения воды около 100 м). Найдите мощность водопада Виктория.

## § 26. Потенциальная энергия

**Потенциальная сила.** Выражение для работы силы тяжести при перемещении тела массой  $m$  с высоты  $H_1$  на высоту  $H_2$  (см. рис. 77) представим в виде

$$A_g = mg(H_1 - H_2) = mgH_1 - mgH_2. \quad (64)$$

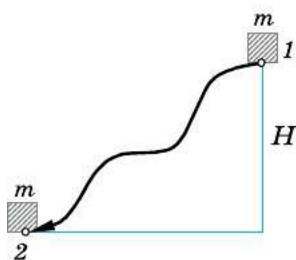
Из формулы (64) следует, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории. Сила тяжести является *потенциальной силой*.

**Потенциальная сила** — сила, работа которой при перемещении тела зависит только от его начального и конечного положений в пространстве.

Работа силы тяжести равна разности двух величин, называемых *потенциальной энергией* тела в начальном  $E_{p1} = mgH_1$  и конечном  $E_{p2} = mgH_2$  положениях:

$$A_g = E_{p1} - E_{p2}. \quad (65)$$

**Потенциальная энергия тела в данной точке** — скалярная физическая величина, равная работе, совершаемой потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в точку, принятую за нуль отсчёта потенциальной энергии.



Нуль отсчёта потенциальной энергии выбирается произвольно.

Единица потенциальной энергии — *джоуль* (Дж).

**Потенциальная энергия в гравитационном поле.** Работа силы тяжести определяется разностью начальной и конечной высот.

Вблизи поверхности Земли в качестве нуля отсчёта удобно выбирать (из начальной и конечной высот) потенциальную энергию на меньшей высоте. На рисунке 80  $E_{p1} = mgH$ ,  $E_{p2} = 0$ .

Работа силы тяжести при перемещении из точки 1 в точку 2 равна

$$A_g = mgH.$$

### ▲ 80

Выбор нуля отсчёта потенциальной энергии  $E_{p1} = mgH$ ,  $E_{p2} = 0$



Потенциальная энергия в этом случае характеризует энергию взаимодействия тела с Землёй.

Потенциальная энергия тела массой  $m$ , поднятого на высоту  $H$  над уровнем, принятым за нуль отсчёта,

$$E_p = m g H.$$

Сила тяжести, действующая на тело, находящееся на расстоянии  $r$  от центра Земли, определяется законом всемирного тяготения (36):

$$F_g = G \frac{m M_{\oplus}}{r^2}. \quad (66)$$

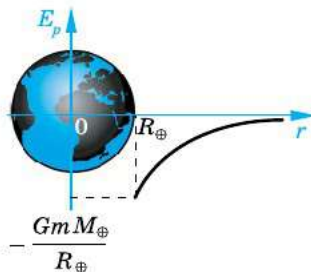
Точные расчёты показывают, что потенциальная энергия тела массой  $m$ , находящегося в поле тяжести Земли на расстоянии  $r$  от её центра, равна (рис. 81)

$$E_p(r) = -G \frac{m M_{\oplus}}{r}. \quad (67)$$

Формула справедлива для случая, когда тело находится над поверхностью Земли, т. е.  $r > R_{\oplus}$ . Для тела в недрах Земли формула будет иметь иной вид.

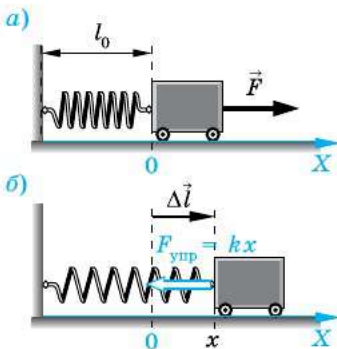
За нуль отсчёта потенциальной энергии принята бесконечно удалённая от центра Земли точка ( $r \rightarrow \infty$ ).

**Потенциальная энергия тела при упругом взаимодействии.** Рассчитаем работу силы упругости пружины. Предположим, что недеформированная пружина длиной  $l_0$  растягивается внешней силой  $F$  так, что координата её правого конца изменяется от 0 до  $x$  (рис. 82, а). При последующем освобождении под действием силы упругости  $F_{\text{упр}} = kx$  пружина сжимается (рис. 82, б). Работа этой силы при сжатии пружины до первоначального положения определяется (см. § 24) площадью под прямой  $F_{\text{упр}}(x)$  (рис. 83).



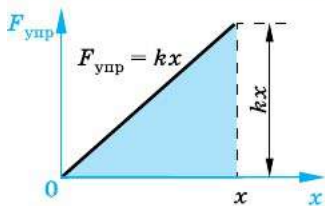
### ▲ 81

*Зависимость потенциальной энергии тела в поле тяжести Земли от расстояния между телом и центром Земли*



### ▲ 82

*Работа силы упругости при растяжении и сжатии пружины: а — нерастянутая пружина длиной  $l_0$ :  $F_{\text{упр}} = 0$ ; б — сжимающаяся пружина длиной  $l_0 + \Delta l$  ( $\Delta l = x$ ):  $F_{\text{упр}} = kx$*



## 83

Графическое  
определение работы  
силы упругости

Площадь треугольника с катетами длиной  $x$  и  $kx$  равна

$$A_{\text{упр}} = \frac{1}{2}(kx) \cdot x = \frac{kx^2}{2}.$$

Потенциальная энергия упругодеформированной пружины равна работе силы упругости при переходе пружины из деформированного состояния в недеформированное.

Выберем нуль отсчёта потенциальной энергии ( $E_p = 0$ ), соответствующий нерастянутой пружине ( $x = 0$ ), тогда *потенциальная энергия упругодеформированной пружины (или тела) равна*

$$E_p = \frac{kx^2}{2}, \quad (68)$$

где  $x$  — удлинение (или сжатие) пружины,  $k$  — жёсткость пружины.

**Принцип минимума потенциальной энергии.** Если потенциальная энергия тела в начальном положении больше его потенциальной энергии в конечном положении ( $E_{p0} > E_p$ ), то, согласно выражению (65), работа потенциальной силы положительна. Это означает, что угол между векторами силы и перемещения острый. Следовательно, сила имеет компоненту в направлении перемещения, т. е. направлена в сторону убывания потенциальной энергии.

Подобная закономерность имеет общий характер и справедлива не только для гравитационного, но и для любого фундаментального взаимодействия.

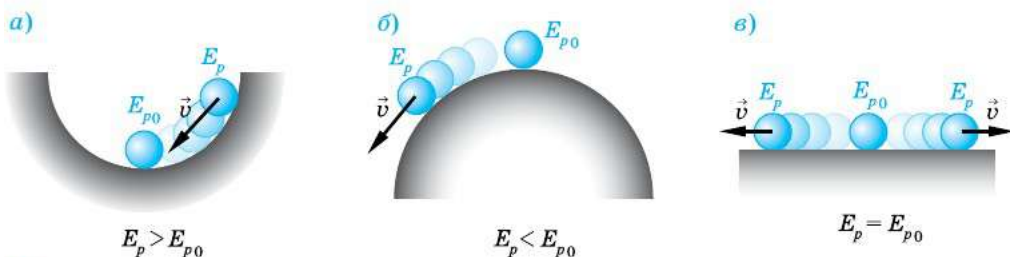
Состояние с меньшей потенциальной энергией является энергетически более выгодным.

### Принцип минимума потенциальной энергии

**Любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором её потенциальная энергия минимальна.**

На рисунке 84 показаны три возможных случая равновесия шара, находящегося на опоре.

**Устойчивое равновесие** — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, возвращается в первоначальное положение.



## ▲ 84

Равновесие шара на опоре:

- а — устойчивое;  
 б — неустойчивое;  
 в — безразличное

При отклонении шара из положения равновесия его потенциальная энергия возрастает (рис. 84, а). Сила тяжести возвращает его к положению равновесия, в котором его потенциальная энергия минимальна.

**Неустойчивое равновесие** — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, не возвращается в первоначальное положение (рис. 84, б).

**Безразличное равновесие** — равновесие, при котором соседние положения тела также являются равновесными (рис. 84, в).

Если толкнуть тело в любую сторону, то оно, согласно первому закону Ньютона, будет двигаться прямолинейно и равномерно, удаляясь от начального положения.

### В О П Р О С Ы

1. При каком условии сила является потенциальной?
2. Дайте определение потенциальной энергии.
3. Чему равна результирующая работа силы тяжести при подъёме с поверхности Земли тела массой  $m$  на высоту  $H$  и при последующем его опускании обратно на поверхность Земли?
4. В чём состоит принцип минимума потенциальной энергии? Почему потенциальная сила направлена в сторону убывания потенциальной энергии?
5. Приведите примеры устойчивого, неустойчивого, безразличного равновесия.

### З А Д А Ч И

1. Тело массой  $m = 1$  кг имеет потенциальную энергию  $E_p = 9,8$  Дж. На какую высоту над Землёй поднято тело, если нуль отсчёта потенциальной энергии находится на поверхности Земли?
2. Какую работу против силы тяжести совершает штангист, поднимая штангу массой 200 кг на высоту 2 м?



3. В цилиндрической бочке находится 200 л воды. Высота столба воды в бочке 1 м. Найдите изменение потенциальной энергии воды после её вытекания на поверхность Земли.

## § 27. Кинетическая энергия

**Теорема о кинетической энергии.** Выясним, какая физическая величина изменяется при совершении силой работы.

Рассмотрим для этого движение тела (материальной точки) массой  $m$ , скорость которого изменяется от  $\vec{v}_0$  до  $\vec{v}$  под действием всех приложенных к нему сил (рис. 85).

Работа равнодействующей постоянной силы  $\vec{F}$ , совпадающей по направлению с перемещением  $\Delta\vec{x}$ , равна

$$A = F \Delta x.$$

$$\text{Так как } F = ma, \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}, \text{ то } A = ma \frac{v^2 - v_0^2}{2a},$$

или

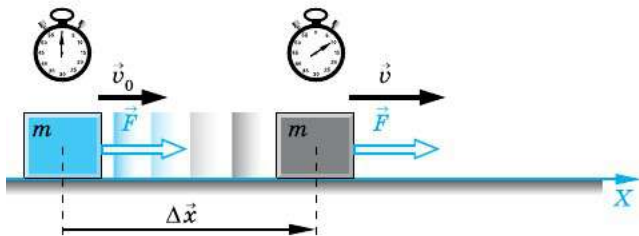
$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (69)$$

Левая часть формулы (работа) является *характеристикой перемещения тела (системы) в пространстве за счёт внешнего воздействия*.

Правая часть — изменение физической величины, которая характеризует энергию движения тела, или *кинетическую энергию* (энергия — от греч. *enérgeia* — действие; кинетическая — от греч. *kinetikos* — приводящий в движение).

**Кинетическая энергия тела — скалярная физическая величина, численно равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости:**

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (70)$$



### 85

*Изменение кинетической энергии в результате действия силы на конечном перемещении*

Кинетическая энергия, как и работа, измеряется в джоулях (Дж).

Формулу (69) называют *теоремой о кинетической энергии*, где

$\frac{mv_0^2}{2} = E_{k0}$  — кинетическая энергия тела в начальный момент времени.

### Теорема о кинетической энергии

**Изменение кинетической энергии тела равно работе всех сил, действующих на это тело:**

$$E_k - E_{k0} = A. \quad (71)$$

Теорема о кинетической энергии сводится к равенству

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = A, \quad (72)$$

если в начальный момент времени тело неподвижно ( $v_0 = 0$ ,  $E_{k0} = 0$ ).

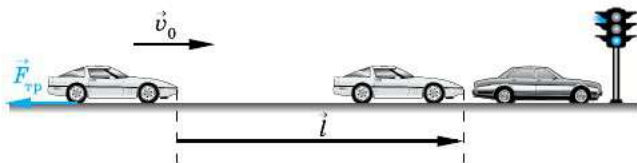
*Кинетическая энергия тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ , равна работе, которую совершает суммарная сила для сообщения покоящемуся телу этой скорости.*

**Тормозной путь автомобиля.** В случае торможения тела, обладающего начальной кинетической энергией  $E_{k0} = \frac{mv_0^2}{2}$ , вплоть до остановки ( $v = 0$ ,  $E_k = 0$ ), теорему о кинетической энергии следует представить в виде

$$A = -E_{k0} = -\frac{mv_0^2}{2}. \quad (73)$$

Найдём *тормозной путь* автомобиля — расстояние, проходимое им до полной остановки (рис. 86). В процессе торможения на автомобиль действуют сила тяжести, сила реакции опоры и сила трения. Сила тяжести и сила реакции опоры направлены перпендикулярно перемещению автомобиля, поэтому их работа равна нулю. Это означает, что суммарная работа всех сил равна работе силы трения скольжения. Учитывая, что эта сила направлена противоположно перемещению  $\vec{l}$  и что  $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg$ , находим

$$A = A_{\text{тр}} = -\mu mgl.$$



86

Определение тормозного пути автомобиля

Подставим выражение для  $A$  в формулу (73):

$$-\mu mgl = -\frac{mv_0^2}{2},$$

откуда

$$l = \frac{v_0^2}{2\mu g}.$$

Следовательно, тормозной путь не зависит от массы автомобиля.

Тормозной путь прямо пропорционален квадрату скорости и обратно пропорционален коэффициенту трения.

В таблице 11 указан тормозной путь автомобиля при нескольких значениях начальной скорости на сухом и мокром бетонном покрытии дороги.

**Таблица 11**

### Тормозной путь автомобиля на бетонном дорожном покрытии

Скорость, км/ч	Тормозной путь, м	
	Сухой бетон	Мокрый бетон
40	8	12,5
60	18	28
80	32	50
120	72	112,5

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте определение кинетической энергии тела. Какие единицы энергии вам известны?
2. Как связаны работа сил, действующих на тело, и его кинетическая энергия?
3. Может ли оставаться неизменной кинетическая энергия тела, если равнодействующая сил, приложенных к нему, отлична от нуля?
4. От каких физических величин зависит тормозной путь автомобиля?
5. В каком случае требуется большая энергия — при запуске спутника вдоль меридиана или вдоль экватора (в сторону вращения Земли)?

### З А Д А Ч И

1. Ракета, летящая со скоростью  $v$ , разгоняется до вдвое большей скорости. В результате сгорания топлива полная масса ракеты уменьшается вдвое по сравнению с массой до разгона. Как изменяется при этом кинетическая энергия ракеты?
2. Шар массой 1 кг, летящий со скоростью 4 м/с, при ударе сжимает пружину. Найдите максимальную энергию сжатия пружины.
3. Определите энергию метеорита массой 1 кг, движущегося со скоростью 60 км/с.



## § 28. Закон сохранения механической энергии

**Полная механическая энергия.** Для системы, в которой действуют потенциальные силы, удобно ввести понятие *полной механической энергии*.

**Полная механическая энергия системы — сумма её кинетической и потенциальной энергий:**

$$E = E_k + E_p.$$

Полная механическая энергия системы тел определяется положением тел и их скоростью.

Потенциальная энергия зависит от положения тел, т. е. от расстояния между ними, а кинетическая энергия определяется скоростью тел. Кинетическая энергия всегда положительна, а потенциальная энергия может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от выбора нуля отсчёта.

Выясним, как изменяется полная механическая энергия системы при взаимодействии и при каких условиях она сохраняется. Запишем теорему о кинетической энергии (71), представив работу сил, действующих на систему, в виде суммы работ потенциальных и непотенциальных сил:

$$E_k - E_{k0} = A_p + A_{np}. \quad (74)$$

Работа потенциальных сил равна разности потенциальной энергии системы в начальном  $E_{p0}$  и конечном  $E_p$  состояниях.

### *Закон изменения механической энергии*

**Изменение механической энергии системы равно работе всех непотенциальных сил:**

$$(E_k + E_p) - (E_{k0} + E_{p0}) = A_{np}, \quad (75)$$

где левая часть равенства — изменение полной механической энергии, правая — работа непотенциальных сил.

Механическую систему, в которой отсутствуют непотенциальные силы, называют *консервативной*.

**Консервативная система — механическая система, в которой действуют только потенциальные силы.**

В такой системе  $A_{np} = 0$ .

### Закон сохранения механической энергии

**В замкнутой консервативной системе полная механическая энергия сохраняется (не изменяется со временем):**

$$E_k + E_p = E_{k0} + E_{p0}. \quad (76)$$

*Закон сохранения механической энергии предполагает превращение кинетической энергии в потенциальную и наоборот в равных количествах. При этом полная механическая энергия остаётся неизменной.*

Целесообразность введения такой физической величины, как полная механическая энергия, подтверждается наличием для неё закона сохранения.

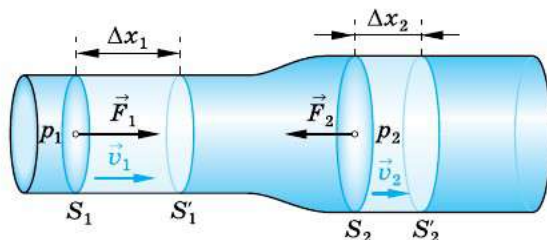
#### Таблица 12

#### Энергия физических объектов и явлений

Физический объект, явление	Энергия, Дж	Физический объект, явление	Энергия, Дж
Молекула воздуха при комнатной температуре	$10^{-21}$	Взрыв атомной бомбы	$10^{14}$
Электрон в атоме	$10^{-18}$	Ураган	$10^{15}$
Деление ядра урана	$10^{-11}$	Взрыв водородной бомбы мощностью 100 Мт	$10^{17}$
Протон в ускорителе, прыгающая блоха	$10^{-7}$	Землетрясение (8 баллов по шкале Рихтера)	$10^{18}$
Клавиша компьютера	$10^{-2}$	Извержение вулкана	$10^{19}$
Сердцебиение	0,5	Солнечное излучение, ежегодно попадающее на Землю	$10^{25}$
Яблоко, падающее с высоты 1 м	1	Вращение Земли вокруг оси	$10^{29}$
Горящая спичка	$10^3$	Движение Земли вокруг Солнца	$10^{33}$
Взрыв 1 кг тринитротолуола	$10^6$	Солнечное излучение за год	$10^{34}$
Сгорание 1 л бензина	$10^7$	Взрыв сверхновой звезды	$10^{44}$
Сгорание 1 м <sup>3</sup> дров	$10^9$	Излучение радиогалактики	$10^{55}$
Разряд молнии	$10^{10}$	Рождение Вселенной	$10^{68}$
Космическая ракета	$10^{11}$		

87

Связь между давлением и скоростью жидкости, протекающей по трубе



Закон сохранения механической энергии получен из законов Ньютона (справедливых для описания движения системы макрочастиц). Однако этот закон имеет более широкую область применимости, чем законы Ньютона. Полная механическая энергия сохраняется и для систем микрочастиц, для которых законы Ньютона неприменимы.

В таблице 12 приведена механическая энергия некоторых физических объектов и явлений.

**Закон сохранения энергии в динамике жидкости.** Найдём связь между давлением и скоростью жидкости, протекающей по трубе переменного сечения. Выделим объём жидкости, ограниченный сечениями  $S_1$  и  $S_2$  трубы, где скорость жидкости равна  $v_1$  и  $v_2$  соответственно (рис. 87). Через малый промежуток времени этот объём займёт положение между сечениями  $S'_1$  и  $S'_2$ . При этом его левая граница переместится на расстояние  $\Delta x_1$ , а правая — на  $\Delta x_2$ .

В сечении  $S_1$  давление жидкости равно  $p_1$ , и сила давления  $F_1 = p_1 S_1$  за рассматриваемое время совершает положительную работу  $A_1 = F_1 \Delta x_1 = p_1 S_1 \Delta x_1$ . В сечении  $S_2$  давление жидкости равно  $p_2$ , и сила давления  $F_2 = p_2 S_2$ , направленная противоположно перемещению, совершает отрицательную работу  $A_2 = -F_2 \Delta x_2 = -p_2 S_2 \Delta x_2$ . Полная работа внешних сил равна

$$A = A_1 + A_2 = p_1 S_1 \Delta x_1 - p_2 S_2 \Delta x_2.$$

Считая жидкость несжимаемой, обозначим  $\Delta V = S_1 \Delta x_1 = S_2 \Delta x_2$  и представим эту работу в виде  $A = (p_1 - p_2) \Delta V$ .

На основании закона изменения механической энергии (75), учитывая, что энергия жидкости между сечениями  $S'_1$  и  $S_2$  не изменяется, получим:

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \frac{\Delta m v_2^2}{2} - \frac{\Delta m v_1^2}{2},$$

где  $E_{k1}$  и  $E_{k2}$  — кинетические энергии выделенного объёма жидкости до и после перемещения,  $\Delta m$  — масса жидкости в объёме между сечениями  $S_1$  и  $S'_1$ .



Вводя плотность жидкости  $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ , можно записать

$$(p_1 - p_2) \Delta V = \frac{\rho \Delta V v_2^2}{2} - \frac{\rho \Delta V v_1^2}{2}.$$

Разделив обе части этого равенства на  $\Delta V$ , получим связь между давлением и скоростью жидкости:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (77)$$

### В О П Р О С Ы

1. Из чего складывается полная механическая энергия системы?
2. Сформулируйте закон изменения механической энергии.
3. Какая система тел называется консервативной?
4. Сформулируйте закон сохранения полной механической энергии.
5. При каких условиях полная механическая энергия системы сохраняется?

### З А Д А Ч И

1. Найдите максимальную высоту, которую поднимется камень, брошенный вертикально вверх со скоростью  $v_0 = 20$  м/с.
2. Пружинный пистолет выбрасывает резиновую пулю на высоту 18 м над поверхностью Земли. На какую максимальную высоту поднялась бы пуля, если бы выстрел был сделан с поверхности Марса?
3. Найдите скорость входа в воду прыгуна с пятиметрового трамплина, если начальная горизонтальная скорость отталкивания спортсмена  $v_0 = 5$  м/с.

## § 29. Абсолютно неупругое и абсолютно упругое столкновения

**Виды столкновений.** Под столкновением в физике понимают взаимодействие тел при их относительном перемещении. Удар — кратковременное взаимодействие. Для классификации результата этого взаимодействия вводят понятие абсолютно неупругого и абсолютно упругого ударов.

**Абсолютно неупругий удар — столкновение тел, в результате которого тела движутся как единое целое.**

Примерами абсолютно неупругого удара являются столкновения метеорита с Землёй, мухи с лобовым стеклом автомобиля, пули с песком, захват нейтрона ядром урана, присоединение электрона ионом и т. д.

**Абсолютно упругий удар** — столкновение, при котором деформация тел оказывается обратимой, т. е. исчезает после прекращения взаимодействия.

Например, футбольный мяч после удара о стенку восстанавливает шарообразную форму.

Абсолютно упруго сталкиваются многие элементарные частицы, бильярдные шары, теннисный мяч с ракеткой.

Абсолютно неупругий и абсолютно упругий удары являются физическими моделями для описания реальных столкновений (рис. 88).

**Абсолютно неупругий удар.** Рассмотрим в качестве примера абсолютно неупругого удара столкновение грузовика массой  $m_1$ , движущегося со скоростью  $v_0$ , с легковым автомобилем массой  $m_2$ , стоящим у светофора (рис. 89).

Найдём скорость грузовика и автомобиля в результате удара. Систему тел «грузовик — автомобиль» будем считать замкнутой. Запишем закон сохранения импульса для данной системы тел:

$$m_1 \vec{v}_0 = (m_1 + m_2) \vec{v},$$

где  $\vec{v}$  — их общая скорость после удара.

Тогда

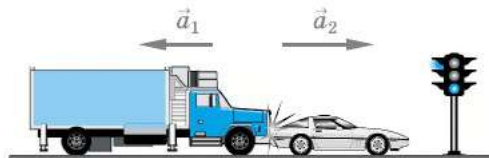
$$\vec{v} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{v}_0.$$

При абсолютно неупругом ударе кинетическая энергия системы не сохраняется. Часть кинетической энергии сталкивающихся тел идёт на их необратимую деформацию, изменяя внутреннюю энергию тел (переходя в тепло).



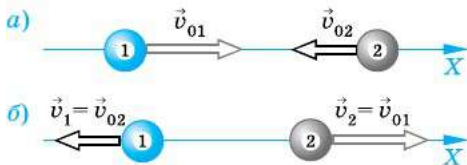
### ▲ 88

*Неупругий удар пули о яблоко: яблоко деформируется, пуля теряет часть энергии*



### ▲ 89

*Абсолютно неупругое столкновение грузовика с легковым автомобилем*



**Абсолютно упругий удар.** Рассмотрим столкновение двух бильярдных шаров, имеющих одинаковую массу  $m$  и движущихся навстречу друг другу со скоростями  $v_{01}$  и  $v_{02}$ , направленными вдоль линии, соединяющей центры шаров, — центральный удар (рис. 90). Найдём скорости  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  шаров после удара.

Закон сохранения импульса в проекции на ось  $X$  для замкнутой системы шаров имеет вид

$$mv_{01} - mv_{02} = mv_{1x} + mv_{2x}. \quad (78)$$

Уравнение (78) содержит два неизвестных:  $v_{1x}$  и  $v_{2x}$ . Для их однозначного определения требуется ещё одно уравнение — закон сохранения энергии:

$$\frac{mv_{01}^2}{2} + \frac{mv_{02}^2}{2} = \frac{mv_{1x}^2}{2} + \frac{mv_{2x}^2}{2}. \quad (79)$$

Сокращая обе части (78) на  $m$  и обе части (79) на  $m/2$  и перегруппируя слагаемые, получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} v_{01} - v_{1x} = v_{2x} + v_{02}, & (80) \\ v_{01}^2 - v_{1x}^2 = v_{2x}^2 - v_{02}^2. & (81) \end{cases}$$

Разделив почленно уравнение (81) системы на (80), приходим к системе, определяющей скорости шаров после удара:

$$\begin{cases} v_{01} - v_{1x} = v_{2x} + v_{02}, & (82) \\ v_{01} + v_{1x} = v_{2x} - v_{02}. & (83) \end{cases}$$

Вычитая из уравнения (83) системы (82), получаем

$$v_{1x} = -v_{02}.$$

Знак «минус» означает, что скорость первого шара после столкновения направлена противоположно оси  $X$ .

Сложение уравнений (82), (83) системы даёт

$$v_{2x} = v_{01}.$$

В результате центрального упругого столкновения одинаковые шары обмениваются проекциями скорости на линию, соединяющую их центры.



В О П Р О С Ы

1. Какой удар является абсолютно неупругим? Приведите примеры такого удара.
2. Какой удар считается абсолютно упругим? Приведите примеры такого удара.
3. Почему в результате абсолютно неупругого удара шаров их суммарная кинетическая энергия уменьшается?
4. Покоящийся шар приобретает скорость в результате центрального соударения с другим шаром. При каком ударе (упругом или неупругом) эта скорость больше? Подтвердите свои выводы математическими выкладками.
5. Почему в результате абсолютно упругого столкновения одинаковых шаров шар, движущийся с большей скоростью, замедляется, а шар, движущийся с меньшей скоростью, ускоряется?

З А Д А Ч И

1. Какой молоток (лёгкий или тяжёлый) при ковке теряет большую часть своей энергии? Почему?
2. Шар из пластилина массой 100 г, движущийся со скоростью 5 м/с, ударяет неподвижный шар из пластилина массой 150 г. Найдите скорость шаров после удара.
3. Теннисный мяч, летящий со скоростью  $v$ , отскакивает от теннисной ракетки, движущейся навстречу мячу со скоростью  $u$ . С какой скоростью отлетит мяч после упругого удара о ракетку?

Т В О Р Ч Е С К И Е    З А Д А Н И Я

1. Какие внутренние и внешние силы изменяют/сохраняют импульс человека?
2. Каким образом уменьшают отдачу при выстреле из оружия? Как это отражается на конструкции новых образцов оружия (проведите анализ)?
3. При каких условиях и в каких ситуациях человек становится реактивным?
4. Работа силы в физике может принимать отрицательные значения. Может ли работа человека быть отрицательной? Ответ аргументируйте.
5. Подготовьте доклад «Трасология: следы транспортных средств, следы человека, следы орудий и инструментов».
6. Оцените изменение вашей механической энергии в течение дня.

О С Н О В Н Ы Е    П О Л О Ж Е Н И Я

**Импульс тела** — векторная физическая величина, равная произведению массы тела и его скорости

и совпадающая по направлению со скоростью

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

Единица импульса тела — килограмм-метр в секунду ( $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$ ).

Изменение импульса тела  $\vec{p}$  определяется импульсом силы, действующей на него:

$$\vec{p} - \vec{p}_0 = \vec{F} \Delta t.$$

Импульс силы  $\vec{F} \Delta t$  — произведение силы и длительности её действия.

Единица импульса силы — ньютон-секунда ( $\text{Н} \cdot \text{с}$ ).

**Импульс системы тел** — векторная сумма импульсов тел, входящих в систему.

*Замкнутая система* — система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю.

**Закон сохранения импульса:** в инерциальной системе отсчёта суммарный импульс замкнутой системы тел остаётся постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой.

Закон сохранения импульса — теоретическая основа реактивного движения.

Пространственной характеристикой действия силы является **работа силы** — скалярная физическая величина, равная произведению проекции силы на ось  $X$  и перемещения тела вдоль этой оси:

$$A = (F \cos \alpha) \Delta x,$$

где  $F$  — модуль силы,  $\Delta x$  — модуль перемещения,  $\alpha$  — угол между векторами силы и перемещения.

Единица работы — джоуль (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2.$$

**Средняя мощность** — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, за который она совершена:

$$P_{\text{ср}} = \frac{A}{t}.$$

Единица мощности — ватт (Вт):

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж}/\text{с}.$$

**Мгновенная мощность** силы, действующей на тело, равна произведению модуля скорости тела на проекцию силы на направление мгновенной скорости тела:

$$P = F_x v_x.$$

В механике силы делят на две группы: потенциальные и непотенциальные.

**Потенциальная сила** — сила, работа которой при перемещении тела зависит только от его начального и конечного положений в пространстве.

Для непотенциальной силы работа зависит от траектории движения тела между его начальным и конечным положениями.

**Потенциальная энергия** тела в данной точке — скалярная физическая величина, равная работе, совершаемой потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в точку, принятую за нуль отсчёта потенциальной энергии.

Потенциальная энергия тела на высоте  $H$  над поверхностью Земли

$$E_p = mgH,$$

нуль отсчёта потенциальной энергии выбран на поверхности Земли.

- **Потенциальная энергия тела, находящегося в поле силы тяжести Земли** на расстоянии  $r$  от её центра,

$$E_p(r) = -G \frac{mM_{\oplus}}{r},$$

где  $M_{\oplus}$  — масса Земли. Нуль отсчёта потенциальной энергии — бесконечно удалённая точка.

- **Потенциальная энергия упруго-деформированной пружины** жёсткостью  $k$ , растянутой на величину  $x$ ,

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

нуль отсчёта потенциальной энергии — положение равновесия.

- **Принцип минимума потенциальной энергии:** любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором её потенциальная энергия минимальна.

- **Кинетическая энергия тела** — скалярная физическая величина, численно равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Соответственно

$$E_{k0} = \frac{mv_0^2}{2},$$

где  $v_0$  — скорость тела в начальный момент времени.

- **Теорема о кинетической энергии:** изменение кинетической энергии тела равно работе всех сил, действующих на это тело:

$$E_k - E_{k0} = A.$$

- **Полная механическая энергия системы** — сумма её кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_p.$$

- **Закон изменения механической энергии:** изменение механической энергии системы равно работе всех непотенциальных сил:

$$(E_k + E_p) - (E_{k0} + E_{p0}) = A_{np}.$$

*Консервативная система* — механическая система, в которой действуют только потенциальные силы.

- **Закон сохранения механической энергии:** в замкнутой консервативной системе полная механическая энергия сохраняется (не изменяется со временем):

$$E_k + E_p = E_{k0} + E_{p0}.$$

Кинетическая энергия может переходить в потенциальную и обратно в равных количествах.

- **Абсолютно неупругий удар** — столкновение тел, в результате которого тела движутся как единое целое.

При таком ударе кинетическая энергия системы не сохраняется.

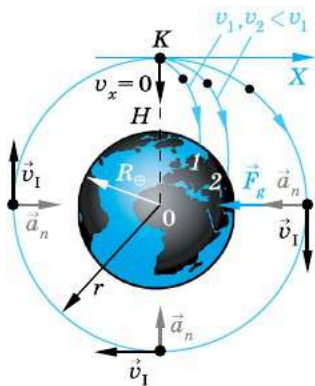
- **Абсолютно упругий удар** — столкновение, при котором деформация тел оказывается обратимой, т. е. исчезает после прекращения взаимодействия.

При абсолютно упругом ударе кинетическая энергия системы сохраняется.





## § 30. Законы механики и движение небесных тел



### ▲ 91

*Траектория движения тел, имеющих начальную скорость, не превышающую первую космическую скорость, в гравитационном поле Земли. Первая космическая скорость — минимальная скорость, необходимая для запуска искусственного спутника Земли ( $v_1 = 7,9$  км/с)*

Траектория тел, движущихся с малой скоростью. При рассмотрении кинематики периодического движения (см. § 12), такого как вращение Земли и других планет вокруг Солнца, движение спутников планет, мы предполагали, что их скорости вращения известны. Теперь нам предстоит рассчитать эти скорости, полагая, что единственной силой, удерживающей планеты вблизи Солнца, Солнце в Галактике, приводящей к образованию отдельных звёзд и звёздных скоплений, является сила гравитационного притяжения.

Казалось бы, под действием гравитационного притяжения все тела во Вселенной должны стянуться в одно плотное образование. Однако этого не происходит. Что же препятствует такому объединению тел?

Рассмотрим в качестве примера тело массой  $m$ , находящееся в начальный момент времени в точке  $K$  на высоте  $H$  над поверхностью Земли (рис. 91). На тело со стороны Земли действует сила тяжести  $m\vec{g}$ , направленная к центру Земли. Если начальная скорость тела равна нулю (либо направлена к центру Земли), то тело свободно падает на Землю по прямой, вдоль линии действия силы тяжести.

При наличии горизонтальной компоненты начальной скорости  $v_1$  в точке  $K$  тело движется практически по параболической траектории, падая на Землю в точке  $1$ . С увеличением начальной скорости по оси  $X$  ( $v_2 > v_1$ ) тело падает на Землю в точке  $2$ , находящейся на большем расстоянии от точки  $K$ , чем точка  $1$ .



**Первая космическая скорость.** Начиная с некоторой скорости  $v_I$ , названной *первой космической* (или *круговой*) *скоростью*, тело движется так быстро, что не падает на Землю. Становясь искусственным спутником Земли, тело движется вокруг неё по круговой орбите.

**Первая космическая (круговая) скорость — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите.**

При движении тела вокруг Земли по окружности радиусом  $R_{\oplus} + H$  на него действует гравитационная сила

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + H)^2},$$

сообщающая телу нормальное (центростремительное) ускорение

$$a_n = \frac{v^2}{R_{\oplus} + H}.$$

По второму закону Ньютона

$$m \frac{v^2}{R_{\oplus} + H} = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + H)^2}.$$

Сокращая обе части равенства на  $\frac{m}{R_{\oplus} + H}$ , получаем горизонтальную скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно двигалось по окружности вокруг Земли на высоте  $H$ :

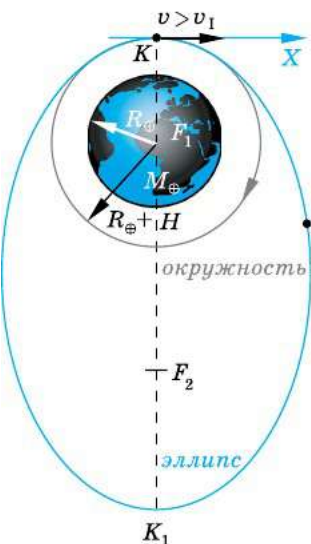
$$v = \sqrt{G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus} + H}}.$$

Если тело запускается на круговую орбиту с поверхности Земли на небольшую высоту  $H \ll R_{\oplus}$ , то

$$v_I = \sqrt{G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}}}.$$

Согласно формуле (39)  $G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = g$ , поэтому

$$v_I = \sqrt{gR_{\oplus}}. \quad (84)$$



Первая космическая скорость

$$v_1 = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} = 7,9 \text{ км/с.}$$

Если начальная скорость тела превысит круговую скорость, то оно удалится от Земли на большее расстояние, однако гравитационная сила удержит его вблизи Земли. При этом тело, оставаясь спутником Земли, движется по эллиптической орбите, вытянутой вдоль линии, перпендикулярной направлению начальной скорости (рис. 92).

Планеты и кометы Солнечной системы движутся по эллиптическим орбитам вокруг основного центра гравитационного притяжения — Солнца (рис. 93).

При дальнейшем увеличении скорости запуска тело всё дальше удаляется от Земли, при этом эллиптическая орбита существенно вытягивается.

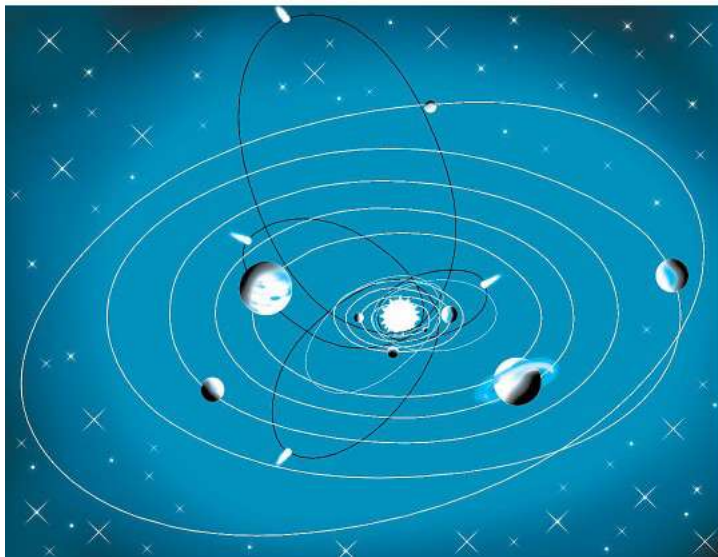
**Вторая космическая скорость.** Найдём скорость, начиная с которой тело способно вырваться в космическое пространство, преодолев притяжение Земли, т. е. удалиться от Земли на бесконечно большое расстояние.

## ▲ 92

Эллиптическая орбита спутника Земли ( $v > v_1$ )

## ◀ 93

Эллиптические орбиты планет и комет. Орбиты планет лежат примерно в одной плоскости. Движение комет происходит в различных плоскостях





**Вторая космическая скорость — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли для того, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Земли.**

Для вычисления второй космической скорости воспользуемся законом сохранения механической энергии (см. § 28). Кинетическая энергия ракеты массой  $m$  при запуске равна  $E_{k0} = \frac{mv_{\text{II}}^2}{2}$ , а её начальная потенциальная энергия

$$E_{p0} = -mgR_{\oplus}.$$

При удалении ракеты на бесконечно большое расстояние от Земли её потенциальная энергия  $E_p = 0$ . Скорость запуска будет минимальной, если в конечном состоянии скорость ракеты обратится в нуль. Следовательно,  $E_k = 0$ .

В рассматриваемом случае закон сохранения механической энергии имеет вид

$$0 = \frac{mv_{\text{II}}^2}{2} - mgR_{\oplus}.$$

Значит, *вторая космическая скорость*

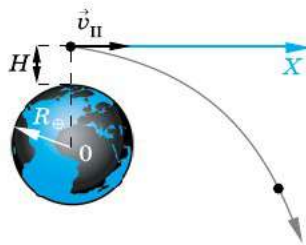
$$v_{\text{II}} = \sqrt{2gR_{\oplus}} = 11,2 \text{ км/с.}$$

*Вторая космическая скорость в  $\sqrt{2}$  раза больше первой космической.*

Если бы с поверхности Земли ракета стартовала со второй космической скоростью, она сгорела бы из-за нагревания в результате трения о воздух в плотных слоях атмосферы. Поэтому космическая ракета ускоряется постепенно, набирая вторую космическую скорость в сильно разреженных верхних слоях атмосферы.

Параболическая траектория ракеты, запущенной с поверхности Земли со второй космической скоростью, показана на рисунке 94.

При запуске ракеты с поверхности Земли со скоростью, большей второй космической ( $v > v_{\text{II}}$ ), ракета преодолевает гравитационное притяжение Земли, имея на бесконечно боль-



#### ▲ 94

*Параболическая траектория ракеты, удаляющейся от Земли со второй космической скоростью*



- По какой траектории движется тело, имеющее скорость: 1)  $v < v_I$ ; 2)  $v = v_I$ ; 3)  $v_I < v < v_{II}$ ; 4)  $v = v_{II}$ ; 5)  $v > v_{II}$ ?
- Какой фактор способствует стягиванию всех тел во Вселенной в одно сплошное образование и что препятствует этому объединению?
- Какую скорость называют третьей космической?

## § 31. Динамика свободных колебаний

**Свободные колебания пружинного маятника.** При рассмотрении кинематики периодических движений мы отмечали, что при колебательных процессах состояния системы точно повторяются через определённые промежутки времени. Теперь нам предстоит выяснить причины возникновения и существования колебательного движения.

Принципиально возможны два варианта колебаний в системе: под действием внешних и внутренних сил.

**Вынужденные колебания — колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.**

Примером вынужденных колебаний является раскачивание боксёрской груши при периодических ударах в неё. К вынужденным колебаниям относится движение иглы швейной машины, поршней в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания.

**Свободные (собственные) колебания — колебания, происходящие под действием внутренних сил в системе, выведенной из положения равновесия и предоставленной самой себе.**

Таковыми колебаниями являются, например, колебания маятника часов, груза, подвешенного на пружине, шарика на нити.

*Главной особенностью систем, в которых происходят свободные колебания, является то, что они имеют положение устойчивого равновесия.*

Необходимые условия для возникновения свободных колебаний:

- наличие энергии, избыточной по сравнению с энергией системы в положении устойчивого равновесия (для возвращения к положению равновесия);
- наличие инертности (для прохождения положения равновесия по инерции);



- работа силы трения в системе должна быть значительно меньше избыточной энергии (для уменьшения затухания).

В отсутствие этих условий колебания быстро затухают или не возникают вообще.

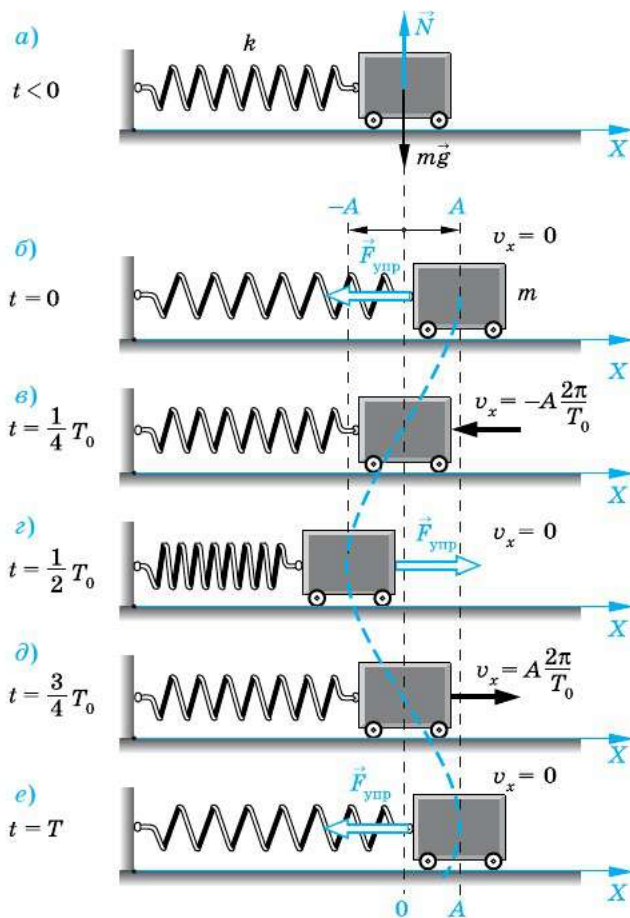
Свободные колебания удобно изучать на модели горизонтального пружинного маятника (рис. 96). Он состоит из тележки массой  $m$ , прикреплённой к вертикальной стенке пружиной жёсткостью  $k$ . Тележка может практически без трения перемещаться по горизонтальной поверхности. При любом положении тележки сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила реакции опоры  $\vec{N}$  уравнивают друг друга.

При растяжении пружины на величину  $x_0 = A$  на тело действует возмущающая сила упругости, направленная к положению равновесия.

## 96

Свободные (собственные) колебания пружинного маятника:

- а — груз в положении равновесия (нерастянутая пружина);  
 б — начальное отклонение груза (максимальное растяжение);  
 в — возвращение груза в положение равновесия (максимальная скорость);  
 г — остановка груза (максимальное сжатие пружины);  
 д — прохождение грузом положения равновесия (максимальная скорость);  
 е — возвращение груза в начальное положение (максимальное растяжение)



Если отпустить тело в момент времени  $t = 0$ , то оно начинает двигаться влево. Пройдя по инерции положение равновесия, в котором сила упругости становится равной нулю, тело начинает сжимать пружину. При сжатии пружины появляется возрастающая сила упругости, направленная вправо. Именно она останавливает тело в *точке поворота* на расстоянии  $A$  слева от положения равновесия (координата тела по оси  $X$  в этот момент времени  $t = T_0/2$  равна  $-A$ ).

Под действием силы упругости тело начинает двигаться вправо к положению равновесия. Пройдя его по инерции, тело, растягивая пружину, через промежуток времени  $T_0$ , равный периоду колебаний, попадает в первоначальное положение. Затем процесс колебаний пружинного маятника повторяется.

**Период колебаний** — интервал времени, в течение которого происходит одно полное колебание.

*Чем больше масса груза, тем медленнее раскачивается маятник, тем больше его период колебаний.*

*Чем больше жёсткость пружины, тем сильнее воздействие на пружинный маятник, тем быстрее он раскачивается и тем меньше его период колебания.*

Период свободных колебаний пружинного маятника равен

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (85)$$

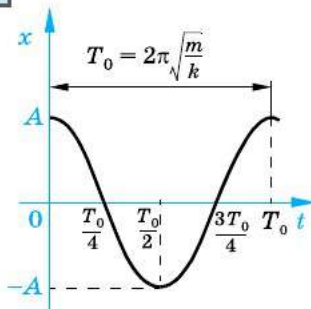
Напомним, что период связан с частотой колебаний  $\nu$  формулой

$$\nu = \frac{1}{T_0}.$$

Свободные колебания пружинного маятника являются гармоническими, т. е. отклонение маятника от положения равновесия изменяется со временем косинусоидально:

$$x = A \cos \frac{2\pi}{T_0} t = A \cos 2\pi \nu t, \quad (86)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний (рис. 97).



### ▲ 97

График свободных гармонических колебаний пружинного маятника

Аргумент косинуса (или синуса) при гармонических колебаниях характеризует фазу колебаний

$$\alpha = \frac{2\pi}{T_0} t = 2\pi\nu t.$$

Так как косинус изменяется в пределах от  $(-1)$  до  $(+1)$ , то координата тела лежит в промежутке  $-A \leq x \leq A$ . Напомним, что

**амплитуда колебаний — максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия.**

Такой величиной может быть не обязательно координата, как в рассматриваемом случае, но и давление, сила тока, сопротивление и т. д.

**Энергия свободных колебаний.** В отсутствие сил трения для колебательной системы выполняется закон сохранения полной механической энергии  $E$ :

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = E_{к0} + E_{p0}.$$

В начальный момент времени кинетическая энергия маятника, отклонённого на расстояние  $x_0 = A$  и отпущенного со скоростью  $v_0 = 0$  (см. рис. 95), равна нулю. Согласно выражению (68)

$$E_{p0} = \frac{kA^2}{2}.$$

Следовательно,  $E = E_{p0}$ .

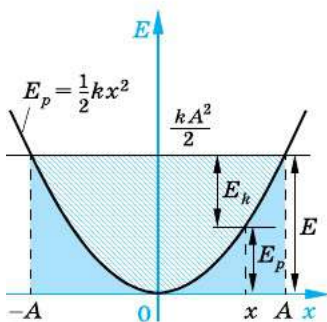
В произвольный момент времени энергия системы равна:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2}.$$

Хотя полная механическая энергия гармонических колебаний пружинного маятника сохраняется, его кинетическая и потенциальная энергия непрерывно изменяются (рис. 98).

*Полная механическая энергия гармонических колебаний пропорциональна квадрату их амплитуды:*

$$E = \frac{kA^2}{2}. \quad (87)$$



## ▲ 98

*Кинетическая, потенциальная и полная механическая энергия при свободных гармонических колебаниях*



*Потенциальная энергия максимальна в точках поворота и минимальна в положении равновесия. Кинетическая энергия, наоборот, минимальна в точках поворота и максимальна в положении равновесия.*

### В О П Р О С Ы

1. При каком условии колебания будут вынужденными? Приведите примеры.
2. Какие колебания называют свободными? Приведите примеры.
3. Дайте определения основных характеристик колебаний.
4. Как период колебаний пружинного маятника зависит от его массы и жёсткости пружины?
5. Как полная механическая энергия гармонических колебаний зависит от их амплитуды?

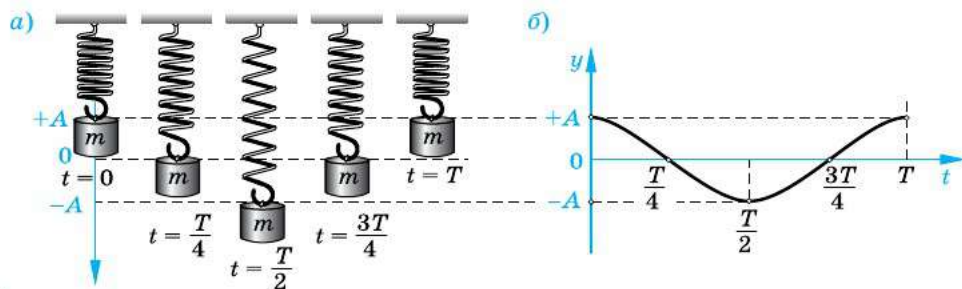
### З А Д А Ч И

1. Во сколько раз отличается период колебаний пружинных маятников в невесомости? Массы маятников равны  $m$  и  $2m$ . Жёсткости пружин маятников одинаковы.
2. Смещение горизонтального пружинного маятника от положения равновесия изменяется по закону  $x = 0,4 \sin \left( \frac{\pi}{4} t \right)$  (м). Найдите частоту колебаний маятника.
3. Горизонтальному пружинному маятнику сообщается начальная скорость  $v_0$ , направленная от положения равновесия. Найдите максимальное отклонение маятника от положения равновесия, если известна частота собственных колебаний маятника  $\nu_0$ .

## § 32. Колебательная система под действием внешних сил. Резонанс

**Затухающие колебания.** В качестве физической модели колебательной системы будем использовать вертикальный пружинный маятник. В реальной системе механическое движение всегда сопровождается трением. При колебаниях в воздухе, когда силой сопротивления воздуха можно пренебречь, колебания маятника являются практически гармоническими (рис. 99). Колебательное движение маятника в более плотной среде, например в воде, сопровождается трением (рис. 100). Силы трения, направленные противоположно перемещению маятника, совершают отрицательную работу, уменьшая его механическую энергию. Постоянное уменьшение энергии приводит к непрерывному уменьшению амплитуды колебаний. Колебания маятника в воде становятся затухающими.

**Затухающие колебания** — колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.



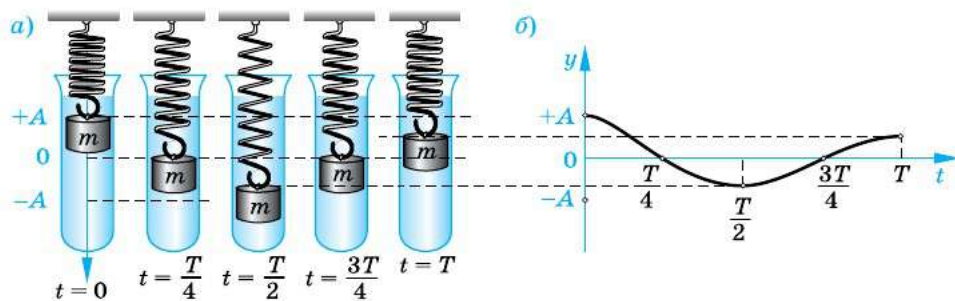
### ▲ 99

Гармонические колебания: а — пружинный маятник в воздухе; б — график гармонических колебаний

Примером таких колебаний являются колебания маятника незаведённых механических часов. Энергия сжатой пружины не может компенсировать потери энергии на трение в опоре и о воздух.

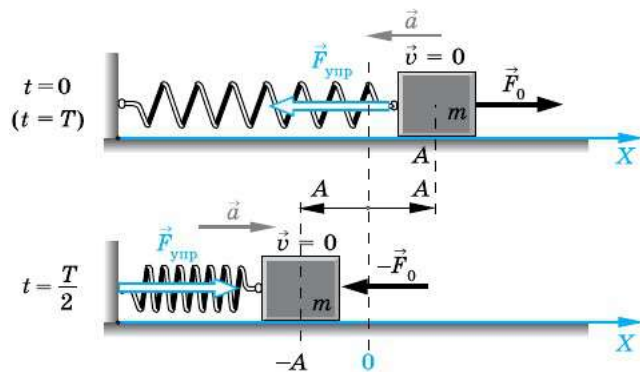
Когда трение увеличивается, например при движении маятника в масле, сопротивление движению оказывается столь значительным, что выведенный из положения равновесия маятник, теряя энергию, не проходит через положение равновесия. Подобное неповторяющееся движение называют *апериодическим*, т. е. не имеющим периода. Специальным устройством для гашения колебаний кузова автомобиля на неровной дороге, переводящим колебания в апериодический режим, является амортизатор, в котором вязкое трение поршня в масле возрастает с увеличением скорости.

**Вынужденные колебания. Резонанс.** Вынужденные колебания возникают под действием внешней периодической силы. Рассмотрим вы-



### ▲ 100

Затухающие колебания: а — пружинный маятник в воде; б — график затухающих колебаний



### 101

Вынужденные колебания пружинного маятника под действием внешней периодической силы

$$F_x = F_0 \cos 2\pi vt$$

нужденные колебания горизонтального пружинного маятника массой  $m$  (жёсткость пружины  $k$ ) (рис. 101), на который действует по оси  $X$  периодическая внешняя сила  $F_x = F_0 \cos 2\pi vt$ .

Для определённости будем считать, что в начальный момент времени пружина максимально растянута ( $x_0 = A$ ) и неподвижна ( $v_0 = 0$ ). В этот момент сила упругости пружины  $F_{\text{упр}} = F_x = F_0$ . Если маятник отпустить, то он начнёт ускоренно двигаться влево. После остановки под действием силы упругости сжатой пружины он возвратится в первоначальное положение. Затем процесс повторится. В системе возникнут вынужденные гармонические колебания с периодом вынуждающей силы  $T$  и с амплитудой  $A$ :

$$x = A \cos 2\pi vt. \quad (88)$$

Скорость маятника достигает максимального значения, когда он проходит положение равновесия.

Ускорение маятника максимально по модулю в точках поворота, в которых скорость маятника равна нулю ( $x = \pm A$ ).

Если частота вынуждающей силы приближается к частоте собственных колебаний ( $\nu \rightarrow \nu_0$ ), амплитуда колебаний резко возрастает.

**Резонанс** — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с частотой собственных колебаний системы.

Резонанс — от *лат.* *resono* — «откликаюсь».

При свободных колебаниях система получает избыточную энергию однократно — при её выведении из положения равновесия.



В случае вынужденных колебаний источник внешнего периодического воздействия непрерывно сообщает системе дополнительную энергию.

При резонансе внешняя сила действует *синхронно* со свободными колебаниями системы. На протяжении всего периода свободных колебаний направление внешней силы  $\vec{F}$  совпадает с направлением скорости колеблющегося тела. Поэтому *работа, совершаемая внешней силой, при резонансе положительна*, и полная механическая энергия системы возрастает.

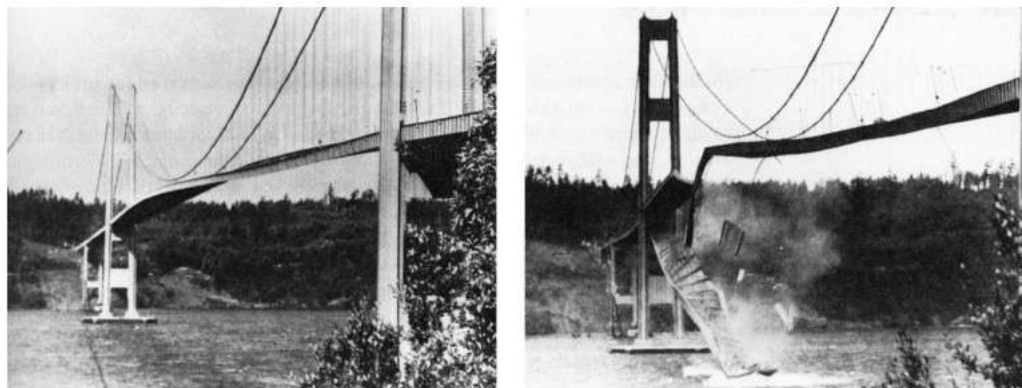
*Быстрое увеличение энергии колеблющегося тела ведёт к резкому возрастанию амплитуды вынужденных колебаний.*

*Потери энергии на трение приводят к уменьшению полной механической энергии колебаний и, следовательно, ограничивают их амплитуду.*

Изучение явления резонанса позволяет, с одной стороны, избежать отрицательных последствий этих воздействий, а с другой — использовать энергетические ресурсы резонансных процессов.

Избежать нежелательного резонанса можно, изменяя частоту внешней силы. С другой стороны, можно изменить частоту собственных колебаний системы. Пластинин, прикреплённый в центре оконного стекла, предотвращает его дребезжание, возникающее, когда мимо окон проезжают автомашины, так как эффективное увеличение массы стекла изменяет частоту его собственных колебаний.

На рисунке 102 показано разрушение моста, произошедшее в результате совпадения собственной частоты его колебаний с частотой турбулентных воздушных вихрей. Мосты в Анжере в 1750 г. и в Петербурге



## ▲ 102

*Резонансное разрушение моста Такома Нэроуз в 1940 г.*

в 1906 г. были разрушены в результате резонанса частоты строевого шага марширующих военных с частотой собственных колебаний моста.

В 2004 г. подо Ржевом произошло разрушение насыпи железнодорожного полотна вследствие резонанса: частота ударов колёсных пар совпала с частотой колебаний рельсового полотна.

Совпадение частоты сейсмических волн с частотой собственных колебаний зданий приводит к их разрушению при землетрясении. При этом разрушаются здания одинаковой высоты, так как их собственная частота колебаний определяется высотой и совпадает с частотой колебаний почвы.

Известно, что для прекращения расплёскивания воды в ведре необходимо изменить темп ходьбы.

*Явление резонанса позволяет с помощью сравнительно малой силы получить значительное увеличение амплитуды колебаний и поэтому используется в вибромашинах в горнодобывающей промышленности, а также при разработке мёрзлого грунта.*

### В О П Р О С Ы

1. При каком условии колебания будут затухающими? Приведите примеры.
2. Почему в механических часах используется заводная пружина?
3. Какое движение называют апериодическим? Приведите примеры.
4. В чём проявляется резонанс?
5. Как можно избежать нежелательного резонанса?

### З А Д А Ч И

1. Чему равно растяжение вертикальной пружины, жёсткость которой  $k = 245$  Н/м, под действием подвешенного груза массой  $m = 0,5$  кг?
2. Два килограмма картофеля вызывают растяжение пружинных весов на 2 см. Определите жёсткость пружины. Чему равен возможный период собственных колебаний картофеля этой массы при незначительной встряске весов?
3. Груз, подвешенный к пружине динамометра, совершает по вертикали гармонические колебания, период которых  $T = 0,4$  с. Найдите растяжение пружины под действием этого груза в отсутствие колебаний.

### Т В О Р Ч Е С К И Е З А Д А Н И Я

1. Поясните смысл фразы «апогей развития событий». Почему в обыденной жизни используются физические понятия? Аргументируйте на примере понятия «апогей».
2. Подготовьте доклад «Резонанс: физика, общество, литература».

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

■ Движение тел по замкнутым орбитам в гравитационном поле Земли является **периодическим**.

■ **Первая космическая (круговая) скорость** — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите:

$$v_I = 7,9 \text{ км/с.}$$

■ **Вторая космическая скорость** — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли для того, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Земли:

$$v_{II} = 11,2 \text{ км/с.}$$

Форма траектории тела в зависимости от начальной скорости запуска с поверхности Земли:

Начальная скорость $v$	Траектория
$v < v_I$	Часть эллипса
$v = v_I$	Окружность
$v_I < v < v_{II}$	Эллипс
$v = v_{II}$	Парабола
$v > v_{II}$	Гипербола

■ Колебательное движение в системе может происходить под действием внутренних сил и под действием внешних сил.

■ **Свободные (собственные) колебания** — колебания, происходящие под действием внутренних сил в системе, выведенной из положения равновесия и предоставленной самой себе.

■ **Период свободных колебаний** пружинного маятника

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

■ **Амплитуда колебаний** — максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия.

■ **Полная механическая энергия** гармонических колебаний пропорциональна квадрату их амплитуды

$$E = \frac{kA^2}{2}.$$

■ **Затухающие колебания** — колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

■ **Апериодическое движение** в колебательной системе — неповторяющееся (не имеющее периода) движение, возникающее из-за значительных сил трения, противодействующих движению.

■ **Вынужденные колебания** — колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

■ **Резонанс** — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с частотой собственных колебаний системы.





### § 33. Условие равновесия для поступательного движения

**Возможные типы движения твёрдого тела.** До сих пор мы рассматривали движение материальной точки — тела, обладающего массой, размерами которого в данных условиях можно пренебречь. Малость размеров тела предполагает, что все части тела двигаются одинаково, с одной и той же скоростью.

*Поступательное движение — движение, при котором все точки тела движутся по одинаковым траекториям.*

Примерами поступательного движения может служить прямолинейное движение реактивного истребителя, поезда на магнитной подушке, подводной лодки, поршня в цилиндре, птицы, парящей в небе, и т. д. (рис. 103).

В ряде ситуаций реальное тело нельзя рассматривать как материальную точку, например, из-за того, что его движение не является поступательным. Так, баскетбольный мяч, летящий в кольцо, зачастую ещё и вращается. Вокруг своей оси вращается и Земля при обращении вокруг Солнца. Поэтому возникает необходимость использовать другую модель — *абсолютно твёрдое тело*.

**Абсолютно твёрдое тело — тело, для которого расстояние между любыми точками можно считать неизменным.**

а)



б)



◀ 103

*Поступательное движение:*

*а — реактивного истребителя;*

*б — поезда на магнитной подушке*

а)



б)



## ▲ 104

*Вращательное движение:*

*а — винта вертолѐта;  
б — пропеллера  
вентилятора*

Подобная модель является хорошим приближением, если деформации тела малы по сравнению с его размерами.

В общем случае движение твёрдого тела конечных размеров является результатом сложения двух движений — *поступательного* и *вращательного*.

*Вращательное движение абсолютно твёрдого тела — движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения.*

Вращательное движение встречается тоже достаточно часто: винты вертолѐта, вентилятор (рис. 104), CD-ROM в компьютере, карусель и т. д.

Результатом сложения поступательного и вращательного движения является движение велосипедного и автомобильного колеса, прыгуна в воду, акробата.

**Условия равновесия для поступательного движения.** Ранее мы обсуждали различные типы равновесия (§ 29). Теперь обсудим условия, при которых возможно равновесие тел.

**Статика — раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел.**

поступательного движения.

Выделим две произвольные точки  $A$  и  $B$  в теле массой  $m$ , движущемся поступательно по горизонтальной поверхности (рис. 105). При таком движении перемещения точек  $A$  и  $B$  одинаковы:  $\vec{AA}' = \vec{BB}'$ . Соответственно для абсолютно твёрдого тела  $\vec{AB} = \vec{A'B'}$ , т. е. *при поступательном движении вектор, соединяющий две произвольные точки тела, перемещается параллельно самому себе, не изменяясь по длине.*

Равенство перемещений точек  $A$  и  $B$  за произвольный промежуток времени означает равенство их скоростей  $\vec{v}_A = \vec{v}_B$  и ускорений  $\vec{a}_A = \vec{a}_B = \vec{a}$ .

Условием отсутствия поступательного движения, или условием статического равновесия для поступательного движения, является равенство нулю начальной скорости и ускорения тела:

$$\vec{v}_0 = 0; \vec{a} = 0. \quad (89)$$

В инерциальной системе отсчёта справедлив второй закон Ньютона  $m\vec{a} = \Sigma\vec{F}$ . Следовательно, условие (89) можно сформулировать следующим образом.

### Условие статического равновесия для поступательного движения

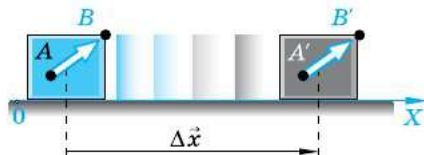
**Поступательное движение тела в инерциальной системе отсчёта не возникает, если векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю:**

$$\Sigma\vec{F} = 0. \quad (90)$$

Например, чемодан, стоящий в лифте, поднимающемся с постоянной скоростью, покоится вследствие равенства по модулю и противоположной направленности действующих на него силы тяжести и силы реакции опоры (рис. 106).

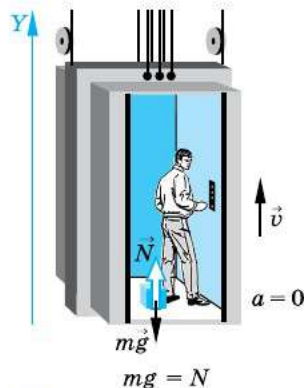
Условие (90) необходимо учитывать при проектировании элементов строительных конструкций. Отметим, что методика расчётов базируется на стандартном подходе к решению задач динамики, рассмотренном в § 21. Единственным отличием, существенно упрощающим расчёты в статике, является использование условия (90) вместо второго закона Ньютона.

**Статическое равновесие в жидкости.** Сначала рассмотрим условие равновесия жидкости плотностью  $\rho$ , заполняющей цилиндрический сосуд высотой  $h$  и площадью поперечного сечения  $S$ . На жидкость в сосуде действуют три силы (рис. 107, а): вниз — сила тяжести жидкости  $mg = \rho Vg$  и сила давления атмосферы  $F_a$  и вверх — сила нормальной реакции  $F_h$ . Из условия равновесия для поступательного движения (90) следует, что  $F_h = F_a + mg$ , или что выталкивающая сила, действующая на жидкость,  $F_b = F_h - F_a = mg$  направлена вверх и равна по модулю силе тяжести. Разделив последнее равенство на  $S$ , можно найти гидро-



### ▲ 105

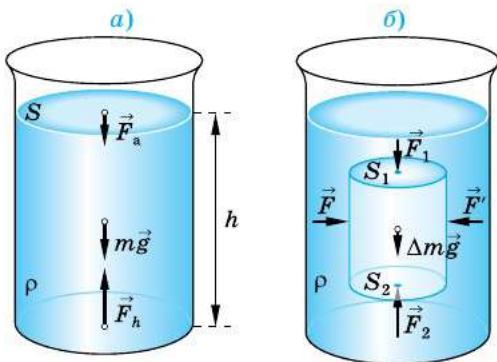
Поступательное движение  
 $\vec{AB} = \vec{A'B'}$



### ▲ 106

Равновесие чемодана в равномерно поднимающемся лифте





### ▲ 107

*Выталкивающая сила  
в жидкости*

выталкиваться вверх из более плотной, чем он, жидкости. Если же  $\rho_1 > \rho$ , то  $m_1g > F_B$  — поплавок будет тонуть, если плотность его материала превышает плотность жидкости. Согласно **закону Архимеда**,

статическое давление жидкости на глубине:  $p_h = p_a + \rho gh$ , где  $p_a$  — атмосферное давление,  $\rho gh$  — давление столба жидкости высотой  $h$ .

Выделим внутри жидкости объём цилиндрической формы. В состоянии равновесия на выделенный объём действует выталкивающая сила  $F_B = F_2 - F_1 = \Delta mg$  (рис. 107, б). Если заменить выделенный объём поплавком плотностью  $\rho_1$ , силы гидростатического давления  $F_1$  и  $F_2$  не изменятся, и на поплавок будет действовать выталкивающая сила  $F_B = \Delta mg$ . Если  $\rho > \rho_1$ , то  $F_B > m_1g$  — поплавок будет

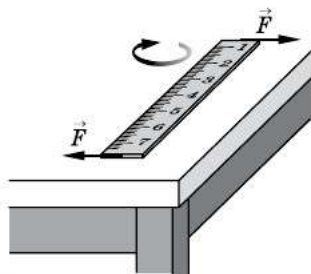
**на тело, погружённое в жидкость (газ), действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной телом.**

### ВОПРОСЫ

1. Почему возникает необходимость введения модели абсолютно твёрдого тела?
2. Какое тело называют абсолютно твёрдым?
3. Какие два вида движения полностью определяют произвольное движение абсолютно твёрдого тела?
4. Дайте определение поступательного и вращательного движения абсолютно твёрдого тела. Приведите примеры поступательного, вращательного и произвольного движения тела.
5. Сформулируйте условие статического равновесия тела для поступательного движения. Приведите примеры, когда тело или конструкция находится в состоянии статического равновесия.

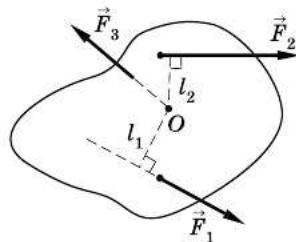
## § 34. Условие равновесия для вращательного движения

**Момент силы.** Выполнение условия равновесия для поступательного движения (90) не означает отсутствия вращательного движения. Линейка вращается на поверхности стола (рис. 108) под действием пары сил, равных по модулю и противоположно направленных.



## ▲ 108

Возникновение вращательного движения при выполнении условия равновесия для поступательного движения ( $\Sigma \vec{F}_1 = 0$ )



## ▲ 109

Моменты сил:

$$M_1 = F_1 l_1;$$

$$M_2 = -F_2 l_2;$$

$$M_3 = 0 \quad (l_3 = 0)$$

**Момент силы** — физическая величина, равная произведению модуля силы и её плеча:

$$M = Fl.$$

**Плечо силы** — длина перпендикуляра, опущенного от оси вращения на линию действия силы.

Знак момента силы зависит от направления вращения тела. Момент считают положительным, если сила вращает тело относительно выбранной оси против хода часовой стрелки, и отрицательным, если по ходу часовой стрелки.

Единица момента — *ньютон-метр* (Н · м).

На рисунке 109 показаны силы  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_3$ , действующие на тело произвольной формы, а также их плечи относительно точки  $O$ .

Сформулируем *условие статического равновесия тела для вращательного движения*.

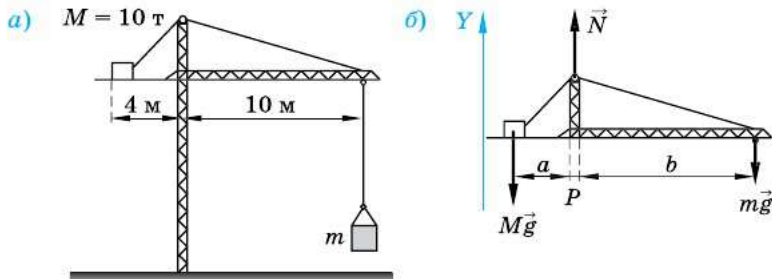
**Условие статического равновесия  
для вращательного движения**

Вращательное движение твёрдого тела в инерциальной системе отсчёта не возникает, если алгебраическая сумма моментов (относительно произвольной оси  $O$ ) всех сил, действующих на тело, равна нулю

$$\Sigma M_O = 0. \quad (91)$$

110 ▶

Нагрузка на  
подъёмный кран



Тело покоится в инерциальной системе отсчёта, если отсутствует как его поступательное, так и вращательное движение, т. е. одновременно выполняются условия (90) и (91).

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определим, груз какой максимальной массы может переносить подъёмный кран (рис. 110, *a*) и силу давления его на землю. Противовес массой  $M = 10$  т находится на стреле крана на расстоянии  $a = 4$  м от вертикальной стойки. Груз подвешен на расстоянии  $l = 10$  м от стойки. Массой крана пренебречь.

#### Решение

Изобразим все силы, действующие на кран (рис. 110, *b*). В равновесии, при отсутствии вращательного движения, алгебраическая сумма моментов сил относительно точки  $P$  равна нулю:

$$Mga - mgb = 0. \quad (92)$$

Тогда 
$$m = M \frac{a}{b} = 4 \text{ т.}$$

Одновременно должно выполняться условие статического равновесия для поступательного движения

$$M\vec{g} + \vec{N} + m\vec{g} = 0.$$

В проекциях на ось  $Y$  получаем

$$-Mg + N - mg = 0.$$

Тогда 
$$N = (M + m)g = 137,2 \text{ кН.}$$

**Ответ:**  $m = 4$  т,  $N = 137,2$  кН.

### ВОПРОСЫ

1. Как должна быть направлена сила, чтобы тело начало вращаться относительно фиксированной оси? При каком направлении силы такое вращение не возникает?
2. Дайте определения момента силы. Как определяется знак момента силы?
3. Дайте определение плеча силы.



4. Сформулируйте условие статического равновесия для вращательного движения.
5. При каких условиях тело находится в равновесии в инерциальной системе отсчёта?

## О С Н О В Н Ы Е П О Л О Ж Е Н И Я

■ **Статика** — раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел.

■ Произвольное движение твёрдого тела конечных размеров является результатом сложения двух движений — поступательного и вращательного.

■ **Поступательное движение** абсолютно твёрдого тела — движение, при котором все точки тела движутся по одинаковым траекториям.

■ **Вращательное движение** абсолютно твёрдого тела — движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения.

■ **Условие статического равновесия для поступательного движения:** поступательное движение тела в инерциальной системе отсчёта не возникает, если векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\vec{\Sigma F} = 0.$$

■ **Момент силы** — физическая величина, равная произведению модуля силы и её плеча:

$$M = Fl.$$

Единица момента силы — *ньютон-метр* (Н·м).

■ **Плечо силы** — длина перпендикуляра, опущенного от оси вращения на линию действия силы.

■ Момент силы считают положительным, если сила вращает тело относительно выбранной оси против часовой стрелки, и отрицательным, если по часовой стрелке.

■ **Условие статического равновесия тела для вращательного движения:** вращательное движение твёрдого тела в инерциальной системе отсчёта не возникает, если алгебраическая сумма моментов (относительно произвольной оси  $O$ ) всех сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\Sigma M_O = 0.$$

■ **Центр тяжести тела** — точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на частицы тела при любом его положении в пространстве.

■ **Закон Архимеда:** на тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной телом.

## § 35. Постулаты специальной теории относительности

**Опыт Майкельсона—Морли.** В классической механике к концу XIX в. были сформулированы основные представления о пространстве, времени и движении, объяснены важнейшие физические явления. Однако временное совпадение теории с экспериментом не означает её абсолютную правильность. Наиболее существенное расхождение классической теории с корректно поставленным физическим экспериментом было впервые зафиксировано в 1881 г. в опыте *Альберта Майкельсона* и в 1887 г. подтверждено на усовершенствованной установке в совместно проведённом с *Эдуардом Морли* эксперименте.

В этом эксперименте оценивалось влияние скорости движения Земли вокруг Солнца на скорость распространения света от источника, находящегося на Земле. Как показал опыт Майкельсона—Морли, *движение Земли вокруг Солнца не влияет на скорость распространения света от источника.*

Факт независимости скорости света от движения источника света или приёмника оказался в противоречии с классическим законом сложения скоростей, согласно которому скорость света, распространяющегося вдоль направления движения Земли вокруг Солнца, для неподвижного наблюдателя на Земле равна

$$v_1 = c + v, \quad (93)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света, излучаемого источником,  $v = 2,96 \cdot 10^4$  м/с — скорость движения Земли вокруг Солнца.

Соответственно скорость света, распространяющегося в противоположном направлении, определяется также законом сложения скоростей:

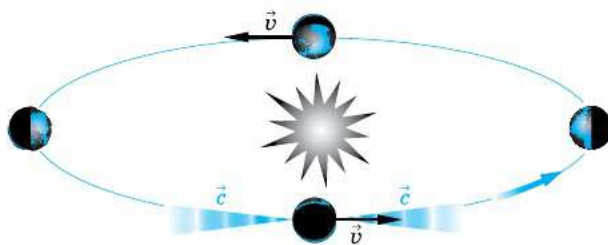
$$v_2 = c - v, \quad (94)$$

т. е.  $v_1 \neq v_2$ , а это противоречит результатам опыта Майкельсона—Морли (рис. 111).

## 111 ►

*Независимость скорости света от выбора системы отсчёта.*

*Скорость распространения света в направлении движения Земли вокруг Солнца и в противоположном направлении одинакова и равна скорости света в вакууме*



**Теория относительности.** Расхождение теории с корректно поставленным экспериментом приводит либо к совершенствованию существующей теории, либо к созданию принципиально новой теории, дающей новые законы и более глубокое понимание физической реальности. Альберт Эйнштейн создал *специальную теорию относительности*, или *релятивистскую теорию* (от англ. relativity — относительность).

*Специальная теория относительности (СТО) рассматривает пространственно-временные закономерности, справедливые для любых процессов.*

Главный вклад Эйнштейна в познание законов природы состоял даже не в открытии новых законов, а в радикальном изменении основополагающих фундаментальных представлений о пространстве, времени, веществе и движении.

Специальная теория относительности базируется на двух постулатах.

Первый постулат является обобщением классического принципа относительности Галилея на любые законы природы, а не только механики.

### *Первый постулат теории относительности*

**Все законы природы имеют одинаковый вид в инерциальных системах отсчёта.**

Например, запись второго закона Ньютона в различных инерциальных системах отсчёта (ИСО) будет одинакова.

Это означает, что все инерциальные системы отсчёта эквивалентны (равноправны). *Бессмысленно выяснять, какая из двух инерциальных систем отсчёта движется, а какая покоится.*

Никакие опыты в принципе не позволяют выделить предпочтительную абсолютную инерциальную систему отсчёта.



Второй постулат специальной теории относительности согласуется с результатами опыта Майкельсона—Морли.

### Второй постулат теории относительности

**Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта.**

*Скорость света — максимально возможная скорость распространения любого взаимодействия.*

Физические объекты не могут иметь скорость большую, чем скорость света.

Наличие верхнего предела скорости объясняет существование одного из самых необычных астрономических объектов — *чёрной дыры*.

Чёрная дыра образуется при гравитационном сжатии (коллапсе) массивной звезды. Если масса звезды более чем в 3 раза превосходит массу Солнца, ядро этой звезды, сжимаясь, достигает такой плотности, что даже свет не может преодолеть силы его тяготения.

Для оценки радиуса чёрной дыры воспользуемся выражением для второй космической скорости (минимальной скорости, необходимой для преодоления гравитационного поля звезды массой  $M$  и радиусом  $R$ ):

$$v_{II} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2 \frac{GM}{R}}.$$

Соответственно можно выразить радиус через вторую космическую скорость:

$$R = \frac{2GM}{v_{II}^2}. \quad (95)$$

Согласно второму постулату СТО максимальное значение второй космической скорости  $v_{II \max} = c$ .

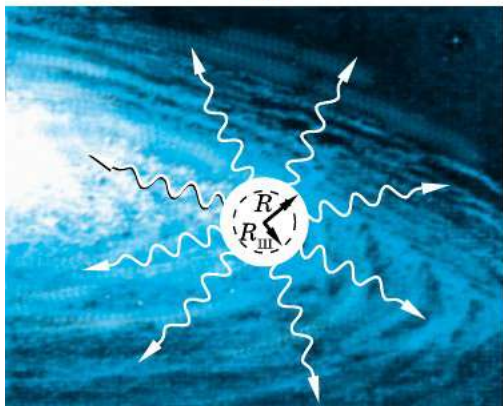
Исходя из этого, можно определить *критический радиус*.

**Радиус Шварцшильда — критический радиус чёрной дыры, соответствующий скорости света:**

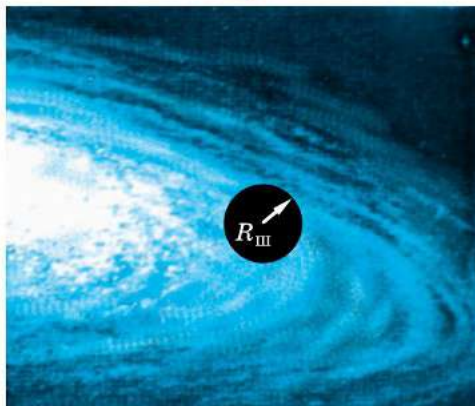
$$R_{III} = \frac{2GM}{c^2}. \quad (96)$$

Если частица находится от центра чёрной дыры на расстоянии  $R < R_{III}$ , то, как видно из сравнения формул (95) и (96), для преодоления гравита-

а)



б)



## ▲ 112

Условия образования чёрной дыры:

а — излучение выходит с поверхности звезды радиусом, превосходящим радиус Шварцшильда ( $R > R_{III}$ );

б — отсутствие излучения из чёрной дыры радиусом  $R < R_{III}$  затрудняет получение информации о её внутренней структуре

ционного притяжения она должна обладать скоростью, большей скорости света:

$$v_{II} > c.$$

Противоречие этого неравенства постулатам СТО означает, что, находясь внутри сферы радиусом  $R_{III}$ , никакая частица не может покинуть чёрную дыру. Именно поэтому не наблюдается излучение, выходящее из чёрной дыры (рис. 112).

Мы не можем наблюдать события, происходящие внутри сферы, ограничивающей чёрную дыру, так как свет не может выйти из неё наружу. Поэтому поверхность чёрной дыры радиусом  $R_{III}$  называют *горизонтом событий*.

### В О П Р О С Ы

1. Что показал эксперимент Майкельсона—Морли?
2. Почему результаты эксперимента Майкельсона—Морли противоречили классическому закону сложения скоростей?
3. Поясните смысл первого постулата теории относительности.
4. Сформулируйте второй постулат теории относительности и объясните его смысл.
5. Почему существование чёрных дыр объясняется наличием верхнего предела скорости распространения любого взаимодействия?

## § 36. Относительность времени

**Время в разных системах отсчёта.** Последовательное рассмотрение следствий из постулатов СТО неизбежно приводит к анализу наиболее фундаментальных понятий физики: пространства и времени. Согласно классической механике время, сопутствующее определённому событию, едино во всех системах отсчёта. В классической механике достаточно одних часов, так как течение времени одинаково для всех наблюдателей во всех инерциальных системах отсчёта. Такие понятия, как «теперь», «ранее», «позднее», «одновременно», имеют абсолютное значение, независимое от выбора системы отсчёта.

Событие — физическое явление, происходящее в некоторой пространственной точке в определённый момент времени. Событие характеризуется физическим содержанием, местом и временем.

Повседневный опыт даёт основания для установления единого и абсолютного хронологического порядка, одинакового для всего окружающего мира. Единое прошлое, настоящее и будущее существует согласно классической механике для всех возможных событий, где бы они ни происходили и каким бы образом ни наблюдались.

Житейское понятие времени не ложно, иначе оно было бы быстро отвергнуто. Реально классическое понятие времени справедливо лишь в ограниченных рамках повседневного опыта и становится неприменимым при их нарушении.

«Теперь» — момент времени, когда мы получаем всю совокупность чувственных восприятий. Однако *сосуществование событий в нашем чувственном восприятии не означает одновременности этих событий.*

Когда мы смотрим телевизионную передачу, то понимаем, что события на экране телевизора происходят не в момент их наблюдения (даже при прямой трансляции). Электромагнитное излучение распространяется со скоростью света. Это означает, что излучение, исходящее от телебашни, находящейся на расстоянии  $l_1 = 30$  км от дома, доходит до приёмной антенны за время

$$t_1 = \frac{l_1}{c} = \frac{3 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^8} = 10^{-4} \text{ с.}$$

Следовательно, мы наблюдаем на экране событие из прошлого (хотя и очень близкого).

«Прошлое» — множество событий, которые могли оказывать влияние на события в настоящем.



Глядя в окно на звёздное небо, мы как бы зондируем прошлое разной давности. Свет от Луны доходит до Земли за 1,3 с, от Марса — за 5 мин, от Солнца — за 8 мин. Поэтому такими, как мы их видим «теперь», Луна, Марс и Солнце были соответственно 1,3 с, 5 мин и 8 мин тому назад. Одни звёзды так, как «теперь», выглядели несколько лет назад, другие — миллионы лет назад, третьи — сейчас существуют, но мы их не видим: свет от них к нам ещё не успел дойти.

Наблюдая изображение часов на экране телевизора, необходимо внести поправки, соответствующие расстоянию от часов. Вместо одних часов можно применять много синхронизированных часов. События будут одновременными, если синхронизированные часы показывают одинаковое время в момент, когда происходят события. Тогда утверждение, что одно отдалённое событие происходит раньше другого, имеет смысл. Его можно проверить с помощью синхронизированных часов, покоящихся в выбранной системе отсчёта.

В этом смысле «будущее» — множество событий, на которые могут оказать влияние события в настоящем.

**Порядок следования событий.** Покажем, что порядок следования событий, воспринимаемый наблюдателем, зависит от пространственного положения наблюдателя. Предположим, что в точках  $A$  и  $B$ , находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга (рис. 113), последовательно через промежуток времени  $\Delta t$  вспыхивают две звезды (сначала в точке  $A$ , а затем в точке  $B$ ). Приёмник излучения находится в точке  $I$  на расстоянии  $L$  от звезды  $B$  (рис. 113,  $a$ ).

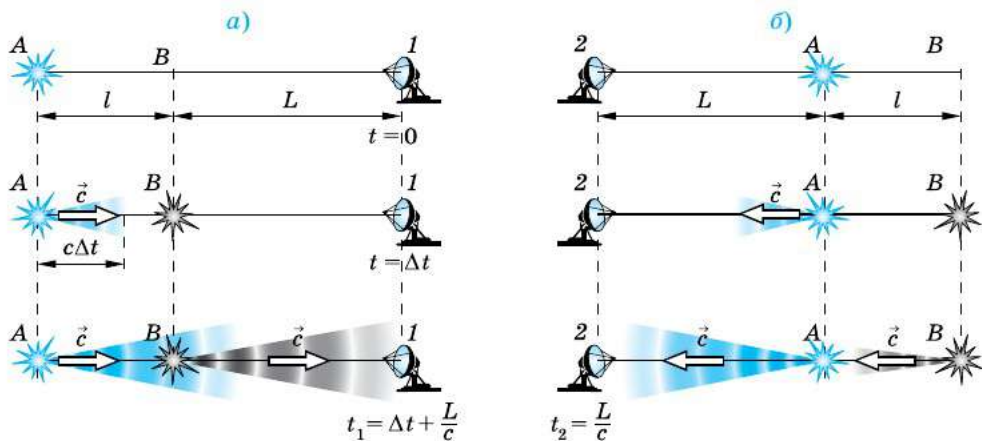
В момент вспышки звезды  $B$  излучение от звезды  $A$  распространяется на расстояние  $c\Delta t$ .

Если это расстояние меньше расстояния между звёздами, то интервал времени между вспышками меньше времени, необходимого для распространения света между ними:

$$\Delta t < \frac{l}{c}.$$

В этом случае излучение от звезды  $B$  достигнет приёмника раньше, чем от звезды  $A$ . Поэтому наблюдатель  $I$  полагает, что последовательность событий была обратной: звезда  $B$  зажглась раньше, чем звезда  $A$ . Когда приёмник излучения находится в точке  $2$  (рис. 113,  $b$ ), излучение от звезды  $A$  при тех же условиях достигнет приёмника раньше, чем от звезды  $B$ . Наблюдатель  $2$  считает поэтому, что звезда  $A$  зажглась раньше, чем звезда  $B$ .

Если промежуток времени между событиями (вспышками звёзд) меньше времени, необходимого для распространения света между ними, то



### 113

*Зависимость порядка следования событий от положения наблюдателя:*

*а — наблюдатель 1: раньше зажглась звезда В;*

*б — наблюдатель 2: раньше зажглась звезда А*

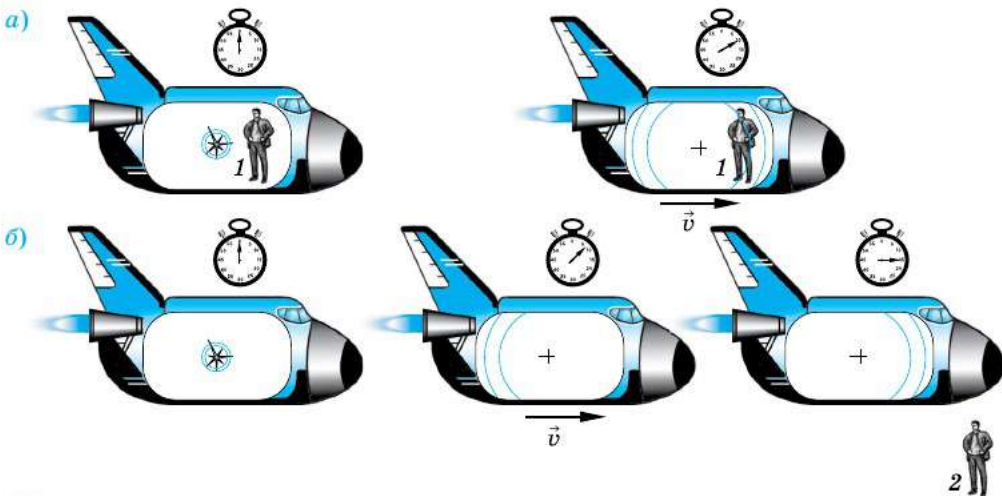
порядок следования событий остаётся неопределённым, зависящим от положения наблюдателя.

**Одновременность событий.** Рассмотрим восприятие одного и того же события наблюдателями, находящимися в разных инерциальных системах отсчёта. Одновременность — не абсолютная характеристика явлений. Разные наблюдатели могут иметь различные представления об одновременности событий.

Пусть световой сигнал излучается в центре ракеты, движущейся со скоростью  $v$  (рис. 114).

Наблюдатель 1 внутри ракеты считает, что свет достигает противоположных стен одновременно, так как стены находятся на одинаковом расстоянии от источника, а скорость света одинакова во всех направлениях. Внешний наблюдатель 2 знает, что скорость света постоянна и не зависит от направления движения. С его точки зрения, левая стена приближается к источнику со скоростью  $v$ , а правая удаляется от него с такой же скоростью. Поэтому световой сигнал достигает левой стены раньше, чем правой. Хотя разность времени прибытия светового сигнала будет очень незначительной (если скорость ракеты мала по сравнению со скоростью света), принципиально важно, что сигнал не достигнет обеих стен одновременно.

Таким образом, два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчёта, не являются одновременными в другой инерциальной системе отсчёта.



### ▲ 114

*Относительность одновременности событий:*

*а — наблюдатель 1: свет достигает противоположных стен одновременно;*

*б — наблюдатель 2: свет достигает левой стены раньше, чем правой*

### В О П Р О С Ы

1. Приведите примеры событий, которые воспринимаются как одновременные, но реально таковыми не являются.
2. Почему, глядя на звёздное небо, мы как бы зондируем прошлое?
3. Будет ли определённым порядок следования событий, если разделяющий их временной промежуток больше времени, необходимого для распространения света между ними?
4. При каком условии порядок следования событий не определён и зависит от положения наблюдателя?
5. Приведите пример того, что одновременность — не абсолютная характеристика явлений, а относительная, зависящая от положения наблюдателя в пространстве.

## § 37. Релятивистский закон сложения скоростей

**Релятивистский закон сложения скоростей.** Опыт Майкельсона—Морли показал, что скорость света в вакууме постоянна и не зависит от скорости движения источника или приёмника света. Этот результат означает, что



преобразования Галилея и закон сложения скоростей неверны при скорости движения, соизмеримой со скоростью света, так как, согласно второму постулату теории относительности, физический объект не может двигаться со скоростью больше скорости света.

Одним из важнейших результатов релятивистской механики является новый закон сложения скоростей.

*Релятивистский закон сложения скоростей* имеет вид

$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + v_{x'}v/c^2}, \quad (97)$$

где  $v_x$  — скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта  $X$  и  $v_{x'}$  относительно системы отсчёта  $X'$ , движущейся со скоростью  $v$ .

*Релятивистский закон сложения скоростей справедлив при любой скорости движущихся тел.*

Теория относительности определяет границы применения классической механики. Классический закон сложения скоростей  $v_x = v_{x'} + v$  справедлив лишь в предельном случае: для скорости движения, значительно меньшей, чем скорость света. При  $v_{x'} \ll c$  и  $v \ll c$  дробь  $\frac{v_{x'}v}{c^2} \ll 1$ , поэтому релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический закон.

Именно с такими скоростями мы имеем дело в повседневной жизни.

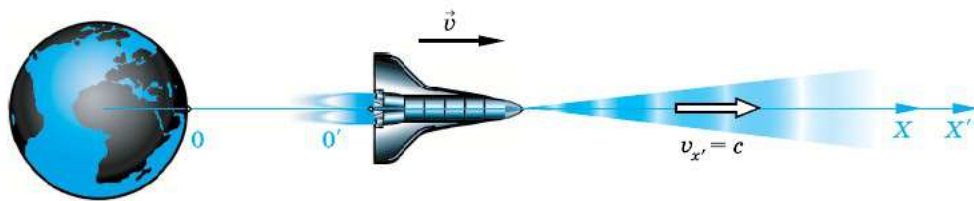
**Скорость распространения светового сигнала.** Воспользуемся релятивистским законом сложения скоростей для оценки скорости  $v_x$  (относительно неподвижной системы отсчёта  $X$ , связанной с Землёй) светового сигнала, излучаемого с космического корабля, удаляющегося от Земли со скоростью  $v$  (рис. 115).

Скорость светового сигнала, излучаемого источником, покоящимся относительно корабля,  $v_{x'} = c$ .

Из выражения (97) следует, что скорость светового сигнала относительно Земли

$$v_x = \frac{c + v}{1 + cv/c^2} = \frac{c(1 + v/c)}{1 + v/c} = c.$$

Это равенство подтверждает правильность выбора релятивистского закона сложения скоростей в виде (97). Стало быть, скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта. Это означает, что релятивистский закон сложения скоростей согласуется со вторым постулатом теории относительности. Кроме того, скорость света не зависит от



### ▲ 115

*Скорость распространения светового сигнала, излучаемого космическим кораблём. Скорость света относительно Земли (неподвижная система отсчёта) равна скорости света в вакууме*

скорости движения источника, подтверждая тем самым результат опыта Майкельсона—Морли.

## В О П Р О С Ы

1. Почему преобразования Галилея и классический закон сложения скоростей не верны при скорости движения, соизмеримой со скоростью света?
2. Сформулируйте релятивистский закон сложения скоростей.
3. Укажите границы применимости классического закона сложения скоростей.
4. Докажите, что релятивистский закон сложения скоростей согласуется со вторым постулатом теории относительности.
5. Как релятивистский закон сложения скоростей согласуется с результатами эксперимента Майкельсона—Морли?

## § 38. Взаимосвязь энергии и массы

**Энергия покоя.** Классическая механика различает два вида материи: *вещество* и *поле*. Необходимой характеристикой вещества является масса, а поля — энергия. Соответственно существуют законы сохранения: *закон сохранения массы* и *закон сохранения энергии*.

Согласно теории относительности существует взаимосвязь между массой и энергией.

Вещество имеет массу и поэтому уже обладает энергией; поле имеет энергию и, следовательно, обладает массой.

Покоящееся тело имеет определённую энергию  $E_0$ , называемую *энергией покоя*.

**Энергия покоя тела — энергия тела в системе отсчёта, относительно которой оно покоится.**

В 1905 г. Альберт Эйнштейн показал, что энергия покоя тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2. \quad (98)$$

Вывод Эйнштейна блестяще подтвердился при открытии в 1933 г. французским физиком **Фредериком Жолио-Кюри** явления **аннигиляции**. Суть этого явления состоит в том, что при взаимодействии покоящихся отрицательно заряженного электрона  $e^-$  и его античастицы — позитрона  $e^+$ , имеющих равную  $m_e$  массу и равный, но противоположный по знаку заряд, обе частицы исчезают. В результате аннигиляции возникает электромагнитное излучение (рис. 116, а). Энергия  $E_{\text{и}}$  возникшего излучения равняется сумме энергий покоя электрона и позитрона:

$$E_{\text{и}} = 2m_e c^2 = 2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

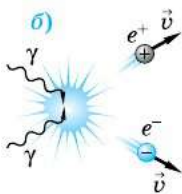
Уравнение реакции аннигиляции может быть записано следующим образом:



где  $\gamma$  — фотон, частица, переносчик электромагнитного взаимодействия и излучения.

Электрон-позитронная аннигиляция используется в медицинской диагностике (компьютерная томография). Пациенту вводится раствор глюкозы, содержащий радиоактивные изотопы, испускающие позитроны в процессе распада. Вместе с кровью раствор поступает в различные органы. Позитрон аннигилирует с электроном клетки, давая два фотона, вылетающих в противоположных направлениях. Детекторы квантов, окружающие пациента, фиксируют с помощью компьютера источники фотонов и соответственно места, где глюкоза усваивается (аккумулируется). Глюкоза быстро поглощается в раковых опухолях, в них возникает особенно сильный сигнал, фиксируемый детектором.

Многочисленные эксперименты показали, что частицы могут как исчезать, так и рождаться. Рождение пары — процесс, обратный аннигиляции (рис. 116, б).



## ▲ 116

**Взаимодействие электрона и позитрона:**

*а — аннигиляция электрон-позитронной пары;*  
*б — рождение электрон-позитронной пары*



Французские физики Фредерик Жолио-Кюри и *Ирен Жолио-Кюри* наблюдали в 1933 г. рождение электрон-позитронных пар гамма-квантами.

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+. \quad (100)$$

Для рождения пары электромагнитное поле должно обладать достаточной минимальной энергией, равной сумме энергий покоя частиц:

$$E_{\min} = 2E_0 = 2m_e c^2. \quad (101)$$

При наличии такой энергии возможно рождение электрона и позитрона в состоянии покоя.

**Взаимосвязь массы и энергии.** Теоретические расчёты показывают, что при произвольных  $v/c$  ( $v$  — скорость частицы) полную энергию частицы можно представить в виде  $E = m_r c^2$ , где  $m_r = m / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  называют *релятивистской массой*, а  $p = m_r v$  — *релятивистским импульсом*. Как мы уже отмечали, в классической физике выполняются *закон сохранения массы* и *закон сохранения энергии*. Согласно теории относительности существует *закон сохранения массы-энергии*.

Причины такого расхождения связаны с тем, что в классической физике энергии, с которой мы имеем дело в реальной жизни, соответствует очень малая масса. Согласно равенству (98)

$$m = \frac{E_0}{c^2}. \quad (102)$$

Характерному диапазону энергии (1—1000) Дж, с которым мы имеем дело в повседневной жизни, как видно из последнего соотношения, соответствует очень малая масса: от  $10^{-17}$  до  $10^{-14}$  кг. Естественно, что в классической физике масса, соответствующая этому диапазону энергий, окazyвалась незамеченной. По этой причине классическая физика не зафиксировала взаимосвязь между веществом и полем (между массой и энергией).

С другой стороны, макроскопическая масса является очень крупной энергетической характеристикой. Массе в 1 г согласно равенству (98) соответствует энергия покоя  $9 \cdot 10^{13}$  Дж.

Такая энергия выделяется при взрыве атомной бомбы (см. табл. 12). Её хватило бы для превращения 30 000 т воды в пар.

Процесс излучения света является процессом превращения внутренней энергии излучающей системы в энергию излучения  $E_{\text{изл}}$ . При этом

одновременно уменьшается и масса излучающего тела на величину эквивалентной массы  $E_{\text{изл}}/c^2$ .

Излучение Солнца и звёзд несёт энергию и, значит, массу. Излучая энергию, Солнце и звёзды теряют массу.

Согласно формуле (102) изменение массы пропорционально изменению энергии:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (103)$$

Если в результате взаимодействия частиц выделяется энергия, то  $\Delta E < 0$ . Это означает, что масса системы уменьшается  $\Delta m < 0$ . Подобное уменьшение массы системы происходит, например, при образовании атома водорода из протона и электрона. Фотон электромагнитного излучения, образующийся при реакции, уносит энергию и массу соответственно.

Мощность излучения Солнца составляет  $3,8 \cdot 10^{26}$  Вт. Из-за излучения масса Солнца уменьшается примерно на 4 млн т в секунду.

При получении системой энергии извне  $\Delta E > 0$ . Это означает, что  $\Delta m > 0$ . Масса системы увеличивается, как, например, при рождении электрон-позитронной пары.

### В О П Р О С Ы

1. Что такое энергия покоя тела?
2. Какие эксперименты подтверждают наличие энергии покоя?
3. Почему единый закон сохранения массы-энергии представляется в классической механике в виде двух законов сохранения — массы и энергии?
4. Приведите примеры взаимодействий частиц с уменьшением и увеличением массы системы.
5. Кратко сформулируйте основные результаты, полученные специальной теорией относительности.

### З А Д А Ч И

1. Чему равна энергия покоя электрона? Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.
2. Энергию покоя частиц и соответственно их массу часто измеряют в электрон-вольтах:  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. Выразите массу электрона и протона в электрон-вольтах.
3. Масса дейтрона, образующегося при соединении протона и нейтрона, меньше их суммарной массы на  $3,965 \cdot 10^{-30}$  кг. Какая энергия выделяется при образовании дейтрона?

## ТВОРЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Почему физика как экспериментальная наука опирается на различные постулаты? Аргументируйте на примере постулатов специальной теории относительности.
2. Как рождаются физические теории? Покажите на примере специальной теории относительности. Выявите общее и различное в закономерностях возникновения теорий в физике, биологии, химии, географии, истории, литературе. Результат представьте в виде таблицы/схемы.
3. Различаются ли массы движущегося и покоящегося человека?

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

■ **Специальная теория относительности (СТО)** рассматривает пространственно-временные закономерности, справедливые для любых процессов.

■ **Первый постулат СТО:** *все законы природы имеют одинаковый вид в ИСО.*

■ **Второй постулат СТО:** *скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО.*

■ **Скорость света** — максимально возможная скорость распространения любого взаимодействия. Физические объекты не могут иметь скорость большую, чем скорость света.

■ **Чёрная дыра** — астрономический объект, гравитационное поле которого удерживает излучение и вещество в пределах радиуса Шварцшильда:

$$R_{\text{Ш}} = \frac{2GM}{c^2},$$

где  $M$  — масса чёрной дыры.

■ **Релятивистский закон сложения скоростей** справедлив при любой скорости движущихся тел:

$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + v_{x'}v/c^2},$$

где  $v_x$  — скорость тела в неподвижной ИСО,  $v_{x'}$  — скорость тела в ИСО, движущейся относительно неподвижной со скоростью  $v$ .

■ **Фотон** (частица, переносчик электромагнитного взаимодействия и излучения) — безмассовая частица. Её масса покоя равна нулю.

■ **Энергия покоя тела** — энергия тела в системе отсчёта, относительно которой оно покоится. Энергия покоя тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2.$$

■ Масса системы уменьшается при выделении энергии и увеличивается при получении энергии системой.





## 8

## Молекулярная структура вещества

### § 39. Масса атомов. Молярная масса

**Строение атома.** Все тела состоят из атомов или молекул. Атомы недоступны наблюдению невооружённым глазом и неразличимы с помощью оптического микроскопа. Однако их изображение можно получить с помощью ионного микроскопа.

*Молекула* — система, состоящая из связанных друг с другом атомов.

Число атомов в молекуле мало по сравнению с полным числом атомов, составляющих макроскопическое тело.

Все вещества по составу можно разделить на два класса: *простые* и *сложные*.

Простые вещества состоят из атомов одного и того же химического элемента, сложные — из атомов различных элементов.

**Атом — наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств.**

В рамках планетарной модели (см. § 3) структура атома подобна Солнечной системе. Вокруг ядра, находящегося в центре атома, движутся электроны. В отличие от планет, притягивающихся к Солнцу гравитационными силами, отрицательно заряженные электроны удерживаются вблизи положительно заряженного ядра силами электромагнитного взаимодействия.

Ядро атома любого химического элемента состоит из двух видов элементарных частиц: положительно заряженных *протонов* и электронейтральных *нейтронов*.

Заряд протона положителен и равен по модулю заряду электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Зарядовое число равно числу протонов в ядре и обозначается  $Z$ .



Заряд ядра атома  $+Ze$  — главная характеристика химического элемента.

*Зарядовое число ядра совпадает с порядковым номером химического элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.*

Протоны и нейтроны, входящие в состав ядра, получили общее название *нуклоны* (от лат. nucleus — ядро).

*В целом атом электронейтрален*: положительный заряд его ядра компенсируется отрицательным зарядом электронов, число которых равно числу протонов в ядре.

*Суммарный заряд электронов в атоме равен  $-Ze$ .*

Другой основной характеристикой атома является его *масса*, складывающаяся из массы ядра и суммарной массы электронов.

Масса нейтрона близка к массе протона и почти в 2000 раз превосходит массу электрона, поэтому почти вся масса атома сосредоточена в ядре.

*Массовое число  $A$  равно числу нуклонов в ядре атома* (суммарное число протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ ):

$$A = Z + N.$$

Зарядовое число  $Z$  и массовое число  $A$  входят в условное обозначение любого химического элемента. Слева от символа химического элемента  $X$  указываются массовое число  $A$  (сверху) и зарядовое число  $Z$  (снизу):

$${}^A_Z X.$$

Например, водород (рис. 117, а), ядром которого является протон, обозначается символом  ${}^1_1\text{H}$ .

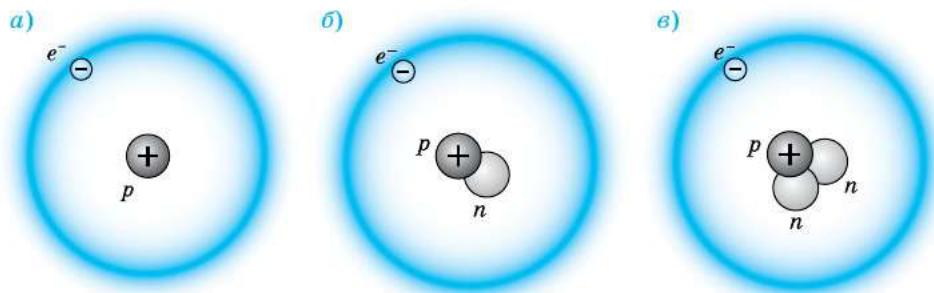
**Изотопы.** Число нейтронов

$$N = A - Z$$

в ядре одного и того же элемента может быть различным.

**Изотопы — разновидности одного и того же химического элемента, различающиеся массой ядер. Ядра изотопов содержат одинаковое число протонов и разное число нейтронов.**

Многие химические элементы имеют изотопы. Так, водород имеет три изотопа: протий  ${}^1_1\text{H}$ ; более тяжёлые изотопы дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  и тритий  ${}^3_1\text{H}$ , ядра которых содержат 1 и 2 нейтрона соответственно (см. рис. 117).



### ▲ 117

Изотопы водорода:

а — протий  ${}^1_1\text{H}$ ; б — дейтерий  ${}^2_1\text{H}$ ; в — тритий  ${}^3_1\text{H}$

Условное обозначение химического элемента позволяет легко определять состав ядра и число электронов в атоме. У изотопа  ${}^6_3\text{Li}$  (рис. 118) в ядре находится 3 протона и 3 нейтрона:

$$Z = 3;$$

$$N = A - Z = 6 - 3 = 3.$$

Вокруг ядра движутся 3 электрона.

Наиболее вероятно электроны в атоме движутся вокруг ядра на определённых расстояниях от него, образуя как бы электронные оболочки — внутренние (вблизи ядра) и внешнюю. *Валентные электроны*, движущиеся во внешней оболочке, слабее связаны с ядром. Они могут покидать атом, например, при столкновении его с другим атомом.

### ▲ 118

Изотоп лития  ${}^6_3\text{Li}$



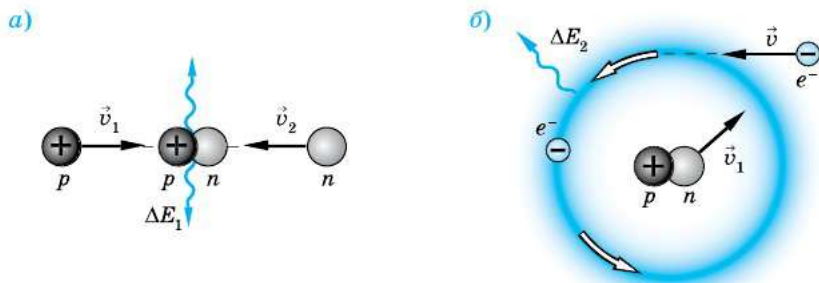
**Дефект массы.** При объединении нуклонов в ядро масса ядра  $m_{\text{я}}$  меньше суммарной массы  $m_{\Sigma}$  нуклонов, объединённых в ядро.

Разность  $\Delta m$  этих масс определяет *дефект массы*.

**Дефект массы** — разность суммарной массы отдельных частиц, входящих в состав ядра (атома), и полной массы ядра (атома):

$$\Delta m = m_{\Sigma} - m_{\text{я}}. \quad (104)$$





### ▲ 119

Дефект массы как результат излучения энергии при образовании атома из отдельных частиц:

а — при образовании ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  выделяется энергия  $\Delta E_1$ ;

б — при образовании атома дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  свободный электрон захватывается ядром, излучается энергия ( $\Delta E_2 \ll \Delta E_1$ )

Дефект массы объясняется тем, что при объединении частиц в ядро (атом) выделяется энергия  $\Delta E$ . Соответственно на величину  $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$  уменьшается масса ядра (атома) по сравнению с суммарной массой частиц до их объединения (рис. 119).

**Атомная единица массы.** Массу атомов, молекул, их ядер неудобно измерять в таких крупных единицах, как килограмм. Практически вся масса атома сосредоточена в ядре, так как масса электронов мала по сравнению с массой протона и нейтрона. Из-за примерного равенства масс протона и нейтрона в качестве единицы массы удобно использовать среднюю массу нуклона в атоме определённого химического элемента.

**Атомная единица массы (а. е. м.)** — средняя масса нуклона в атоме углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ .

В ядре атома углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  содержится 12 нуклонов, поэтому

$$m_{{}^{12}_6\text{C}} = 12 \text{ а. е. м.}$$

Атомная единица массы равна  $1/12$  массы атома углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ :

$$1 \text{ а. е. м.} = 1/12 m_{{}^{12}_6\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса произвольного атома может быть выражена в атомных единицах массы или в килограммах:

$$m_a = M_r \text{ а. е. м.} = M_r \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг,} \quad (105)$$

где  $M_r$  — относительная атомная масса.

**Относительная атомная масса  $M_r$  — число атомных единиц массы, содержащихся в массе атома.**

Относительная атомная масса почти совпадает с числом нуклонов в его ядре:

$$M_r \approx A.$$

Для углекислого газа ( $\text{CO}_2$ )  $M_r = 12 + 16 \cdot 2 = 44$ .

Незначительное отличие  $M_r$  от  $A$  объясняется различием средней массы нуклонов в ядрах разных атомов (табл. 14).

*Таблица 14*

**Относительная атомная масса некоторых элементов<sup>1</sup>**

Элемент	Водород	Гелий	Литий	Углерод	Азот	Кислород	Уран
Изотоп	${}^1_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^6_3\text{Li}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{14}_7\text{N}$	${}^{16}_8\text{O}$	${}^{235}_{92}\text{C}$
Относительная атомная масса, а. е. м.	1,0078	4,0026	6,0151	12,0000	14,0031	15,9949	235,0439

**Постоянная Авогадро.** *Количество вещества характеризуется числом молекул этого вещества.*

Макроскопические тела состоят из огромного числа атомов или молекул, поэтому количество вещества удобно измерять в крупных единицах, соответствующих большому числу частиц.

Единица количества вещества — *моль*.

**Моль — количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна относительной атомной массе.**

Массу одного моля называют *молярной массой* и обозначают  $M$ :

$$M = M_r \cdot 1 \text{ г/моль.}$$

Единица молярной массы — *килограмм на моль* (кг/моль).

<sup>1</sup> Значение  $A$  обведено кружком для удобства сравнения  $A$  и  $M_r$ .

Из определения моля следует, что в нижней графе таблицы 14 приведена одновременно относительная атомная масса и молярная масса изотопов, выраженная в граммах на моль (г/моль).

Молярная масса может быть выражена через число атомов (или молекул) в моле вещества  $N_A$  и массу отдельного атома (или молекулы)  $m_a$ :

$$M = N_A m_a. \quad (106)$$

Используя определение молярной массы  $M = (M_r \cdot 10^{-3})$  кг/моль и выражение (105), преобразуем равенство (106) к виду

$$(M_r \cdot 10^{-3}) \text{ кг/моль} = N_A \cdot M_r \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

После сокращений из этого выражения можно получить число атомов (или молекул) в одном моле вещества, или *постоянную Авогадро*.

**Постоянная Авогадро — число атомов (или молекул), содержащихся в 1 моль вещества:**

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

Постоянная Авогадро одинакова для всех веществ, т. е. *моль любого вещества содержит одинаковое число атомов (или молекул)*.

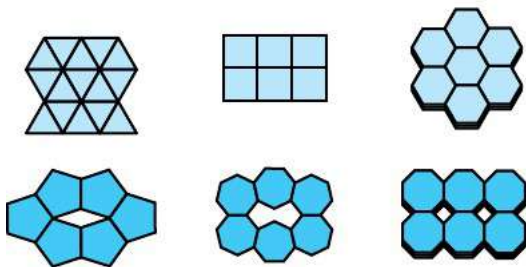
### В О П Р О С Ы

1. Какая физическая величина является главной характеристикой химического элемента?
2. Что такое массовое число?
3. Дайте определение изотопа.
4. Чем объясняется дефект массы?
5. Сравните число атомов в 1 моль кислорода и азота.

## § 40. Агрегатные состояния вещества

**Виды агрегатных состояний.** Объяснение свойств вещества, исходя из представлений о его молекулярном строении, составляет предмет *молекулярно-кинетической теории* вещества. Основной физической моделью этой теории является совокупность движущихся и взаимодействующих между собой молекул вещества. Взаимное расположение, характер движения и взаимодействие молекул одного и того же вещества, существенно зависящие от внешних условий (температура, давление), характери-





## 120

Заполнение плоскости правильными многоугольниками.

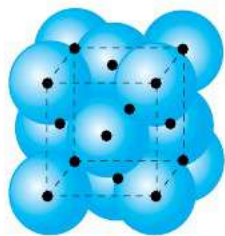
Правильные пяти-, семи- и восьмиугольники не могут заполнить плоскость без пропусков

зуют его *агрегатное состояние*. Различают четыре агрегатных состояния (или фазы) вещества: *твёрдое, жидкое, газообразное, плазменное*.

То, в каком агрегатном состоянии находится вещество, зависит от соотношения кинетической и потенциальной энергии молекул, входящих в его состав. Потенциальная энергия молекулы характеризует её энергию связи с другими молекулами. Между любыми двумя молекулами вещества на расстоянии, большем диаметра молекул, действуют силы притяжения электромагнитного происхождения. Эти силы стремятся связать молекулы в единое целое. Кинетическая энергия молекул препятствует этой тенденции сцепления их между собой.

**Твёрдое тело.** В климатических условиях, подобных земным, большинство тел находится в твёрдом состоянии.

**Вещество находится в твёрдом состоянии, если средняя энергия связи молекул значительно больше их средней кинетической энергии.**



Каждая молекула занимает определённый объём в пространстве, притягивая соседние молекулы и одновременно отталкивая их, не давая занять то место, где она сама расположена.

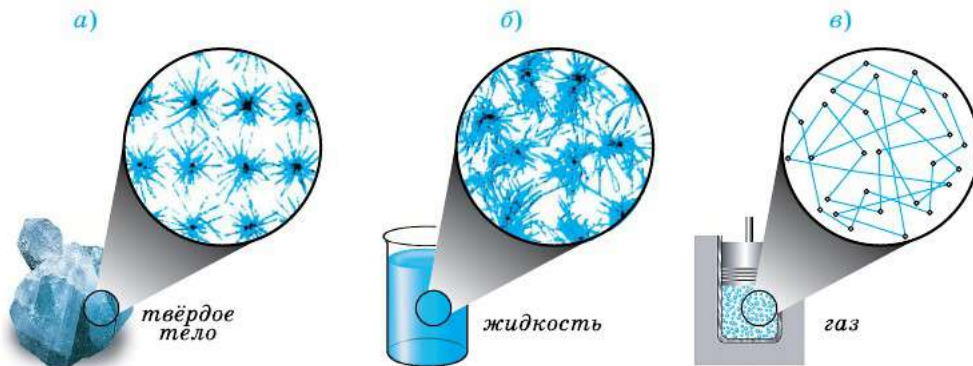
Благодаря такому взаимодействию молекулы плотно заполняют пространство.

Молекулы в кристаллическом теле располагаются упорядоченно. «Упаковка» молекул в пространстве аналогична заполнению плоскости правильными многоугольниками (рис. 120).

Наиболее плотной «упаковкой» атомов является гранецентрированная, при которой атомы располагаются в вершинах куба и в центре его граней (рис. 121).

## 121

Гранецентрированная кристаллическая решётка алюминия



## ▲ 122

*Модель теплового движения частиц в различных агрегатных состояниях вещества:*

*а — твёрдое тело (частицы колеблются около положений равновесия, взаимодействия с ближайшими соседями);*

*б — жидкость (частицы колеблются в большей области, положения равновесия подвижны);*

*в — газ (атомы (молекулы) движутся по прямолинейным траекториям; столкновения изменяют направление движения)*

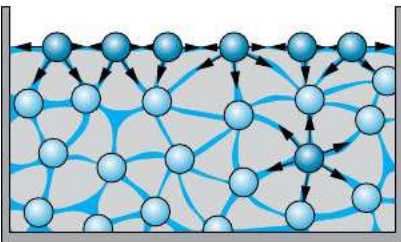
Частицы твёрдого тела, образуя кристаллическую решётку, колеблются около некоторых средних положений равновесия, называемых *узлами кристаллической решётки* (рис. 122, а).

Значительная сила взаимодействия молекул препятствует изменению среднего расстояния между ними. Следствием этого является *сохранение* твёрдыми телами *формы и объёма*.

При деформации (изменение формы или объёма) в твёрдом теле возникают силы, стремящиеся восстановить его форму и объём.

**Жидкость.** При нагревании твёрдого тела средняя кинетическая энергия молекул, колеблющихся около положений равновесия, возрастает. Рост кинетической энергии молекулы приводит к увеличению амплитуды её колебаний, а как следствие — к уменьшению модуля потенциальной энергии взаимодействия молекул — средней энергии связи. Уменьшение средней энергии связи при нагревании позволяет молекулам перескакивать из одного положения равновесия в другое. В результате нарушается правильное расположение частиц (дальний порядок), характерное для кристаллической решётки твёрдого тела. Происходит переход вещества из твёрдого состояния в жидкое (рис. 122, б).





Вещество находится в жидком состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул примерно равна их средней энергии связи.

Упорядоченное расположение частиц в жидкости (*ближний порядок*) наблюдается лишь в пределах двух-трёх слоёв. Относительные положения молекул в жидкости не фиксированы. Молекулы сравнительно медленно изменяют положение друг относительно друга. Под действием внешней силы (например, силы тяжести) жидкость *течёт*, сохраняя свой объём, и *принимает форму сосуда*. Текучесть жидкости объясняется тем, что перескоки молекул из одного положения равновесия в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы.

## ▲ 123

### Молекулярный механизм поверхностного натяжения

*Сжимаемость* жидкости *невелика* и мало отличается от сжимаемости кристаллических твёрдых тел из-за примерно одинаковой плотности «упаковки» частиц вещества в этих агрегатных состояниях.

Тем не менее в отсутствие сжатия воды уровень Мирового океана поднялся бы на 35 м и огромные территории материков были бы затоплены.

Жидкости испаряются при любой температуре.

Молекулы на поверхности жидкости находятся в особых условиях по сравнению с молекулами её внутренних слоёв. Внутри жидкости результирующая сила притяжения, действующая на молекулу со стороны соседних молекул, равна нулю (рис. 123).

Молекулы поверхностного слоя жидкости притягиваются только молекулами внутренних слоёв этой жидкости. Молекулы, находящиеся на поверхности, под действием результирующей силы притяжения втягиваются внутрь жидкости. На поверхности остаётся такое число молекул, при котором площадь поверхности жидкости оказывается минимальной при данном её объёме.

Поэтому жидкость (в отсутствие силы тяжести или в случае, когда сила тяжести уравновешена силой Архимеда) из всех возможных принимает сферическую форму, имеющую минимальную площадь поверхности при том же объёме (рис. 124).

При свободном падении, в состоянии невесомости капли дождя практически имеют форму шара. В космическом корабле шарообразную форму принимает и достаточно большая масса жидкости.





## ▲ 124

*Капля масла в водном растворе спирта*



## 125 ▲

*Действие сил поверхностного натяжения:  
а — скрепки на поверхности жидкости;  
б — водомерка на поверхности воды*



Молекулы поверхностного слоя оказывают молекулярное давление на жидкость, стягивая её поверхность к минимуму. Этот эффект называют *поверхностным натяжением*.

**Поверхностное натяжение** — явление молекулярного давления на жидкость, вызванное притяжением молекул поверхностного слоя к молекулам внутри жидкости.

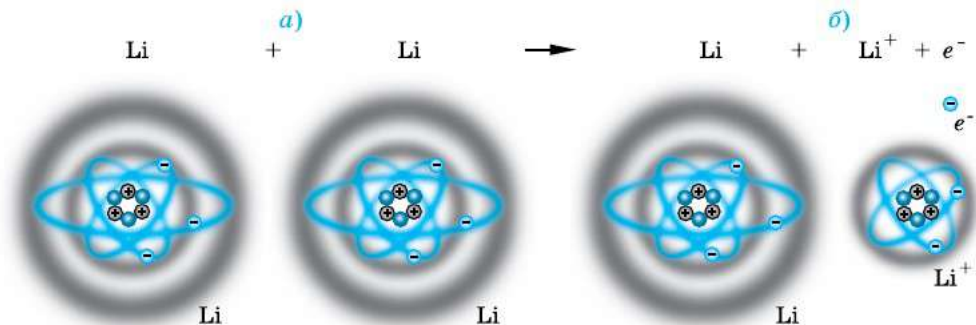
Благодаря поверхностному натяжению воды на её поверхности могут плавать лёгкие предметы и удерживаться водомерки (рис. 125).

**Газ.** При нагревании жидкости средняя скорость молекул может возрасти настолько, что становится достаточной для преодоления значительным числом молекул сил притяжения.

**Вещество находится в газообразном состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул превышает их среднюю энергию связи.**

Газы могут неограниченно расширяться в пространстве, так как силы притяжения между молекулами незначительны. *Большая сжимаемость* газов по сравнению со сжимаемостью жидкостей и твёрдых тел объясняется наличием большего межмолекулярного пространства (рис. 122, в). При сжатии газа уменьшается среднее расстояние между его молекулами. Однако силы взаимного отталкивания молекул на этом расстоянии невелики и практически не препятствуют сжатию.

**Плазма.** Нагревание газа приводит к увеличению скорости движения молекул, а следовательно, к возрастанию их средней кинетической энергии.



## ▲ 126

*Реакция ионизации при столкновении атомов Li:*

*a — до столкновения; б — после столкновения*

Большая кинетическая энергия атомов (молекул) в нагретом газе оказывается достаточной не только для деформации их электронных оболочек при столкновении, но и для выбивания из атома валентного электрона. При столкновении двух атомов X один из них может потерять электрон, превращаясь при этом в положительный ион  $X^+$  (рис. 126):



**Ионизация — процесс образования ионов из атомов.**

Полный электрический заряд газа в результате реакции ионизации не изменяется, так как суммарный заряд положительных ионов равен по модулю суммарному заряду отрицательно заряженных электронов. Изменение качественного состава газа приводит к образованию нового агрегатного состояния — *плазмы*.

**Плазма — электронейтральная совокупность нейтральных и заряженных частиц.**

*Плазму, состоящую из нейтральных атомов, ионов и электронов, называют трёхкомпонентной.*

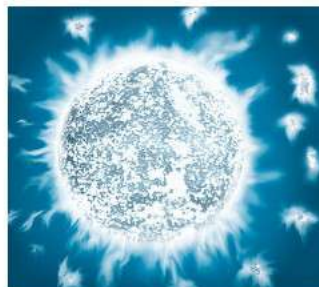
99,9% видимого вещества во Вселенной находится в плазменном состоянии. Гигантскими скоплениями плазмы являются туманности, звёзды, в том числе и Солнце.

*Солнечный ветер — это поток плазмы, испускаемый Солнцем (рис. 127). Он оказывает существенное влияние на магнитное поле Земли.*

Заряженные частицы солнечного ветра останавливаются магнитным полем Земли, начиная циркулировать вокруг неё. Эта циркуляция вызывает свечение атмосферы — полярное сияние.

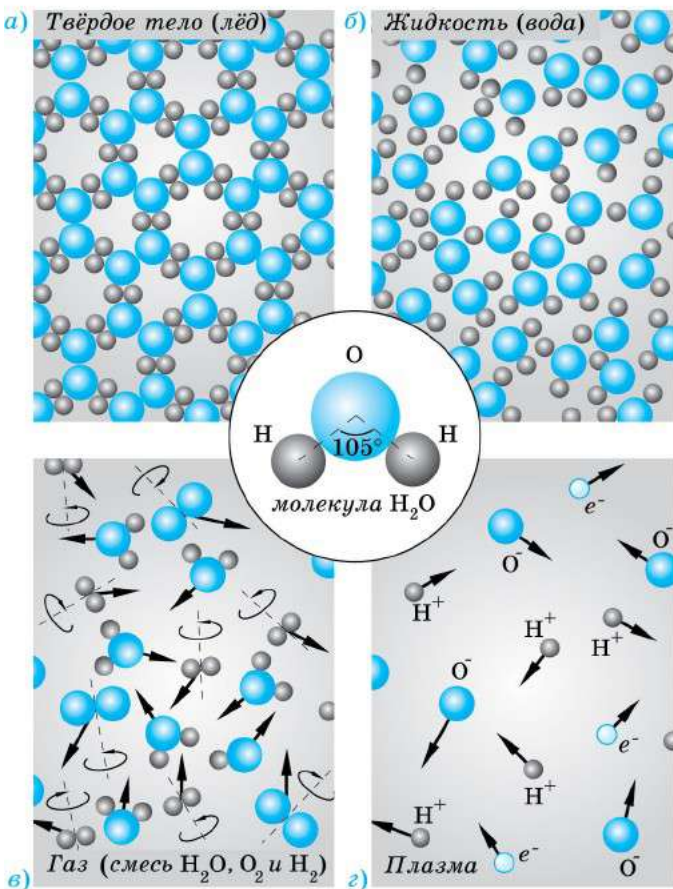
Интенсивное излучение плазменного столба возникает при таком электрическом разряде в атмосфере Земли, как молния. Излучение плазмы используется при создании искусственных источников света: люминесцентные, ртутные, натриевые лампы.

Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое сопровождается изменением его молекулярной структуры (рис. 128).



## ▲ 127

Солнечный ветер



## ◀ 128

Молекулярная структура агрегатных состояний воды:

а — твёрдое тело (лёд); расположение молекул  $\text{H}_2\text{O}$  в кристаллической решётке льда упорядоченно;

б — жидкость (вода); расположение молекул  $\text{H}_2\text{O}$  частично разупорядоченно;

в — газ (смесь  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$ ); молекулы газа движутся поступательно и вращаются;

г — плазма; атомы  $\text{O}$ ,  $\text{H}$ , ионы  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^-$ ,  $\text{H}^+$ , электроны взаимодействуют друг с другом на значительном расстоянии



## В О П Р О С Ы

1. Назовите агрегатные состояния вещества.
2. При каком условии вещество находится в твёрдом состоянии? Как движутся молекулы в твёрдом теле?
3. При каком условии образуется жидкое состояние вещества? В чём особенности движения молекул в жидкости?
4. При каком условии вещество находится в газообразном состоянии? Как движутся молекулы газа?
5. Приведите примеры вещества, находящегося в плазменном состоянии.

## Т В О Р Ч Е С К И Е    З А Д А Н И Я

1. Подготовьте доклад «Малые и большие массы».
2. Как взвесить молекулу?
3. Почему при исследовании молекулярной структуры вещества потребовалось введение относительной атомной массы, молярной массы?
4. Напишите эссе «Масса человека: инертная и гравитационная».
5. Сделайте презентацию «Кристаллография в изобразительном искусстве».

## О С Н О В Н Ы Е    П О Л О Ж Е Н И Я

■ Все вещества состоят из движущихся и взаимодействующих между собой атомов или молекул.

Простые вещества состоят из атомов одного и того же химического элемента, сложные — из атомов различных химических элементов.

■ **Атом** — наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого движутся отрицательно заряженные электроны, притягивающиеся к ядру силами электромагнитного взаимодействия.

Главной характеристикой химического элемента является заряд ядра атома.

$Z$  — зарядовое число ядра, равное числу протонов в ядре, совпадает с порядковым номером химического элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.

Атом электронейтрален: положительный заряд ядра ( $+Ze$ ) компенсируется отрицательным зарядом электронов ( $-Ze$ ).

Кроме протонов, в ядре атомов содержатся нейтроны, связанные с протонами сильным взаимодействием. Общее название протонов и нейтронов, входящих в состав ядра, — **нуклоны**.

Массовое число  $A$  равно числу нуклонов в ядре атома (суммарное число протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ ):

$$A = Z + N.$$

**Изотопы** — разновидности одного и того же химического элемента, различающиеся массой ядер. Ядра изотопов содержат одинаковое число протонов и разное число нейтронов.

В условном обозначении изотопа химического элемента указываются массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$ :



Масса атома меньше суммарной массы частиц, входящих в его состав.

**Дефект массы** — разность суммарной массы отдельных частиц, входящих в состав ядра (атома), и полной массы ядра (атома):

$$\Delta m = m_{\Sigma} - m_{\text{я}}.$$

Дефект массы объясняется тем, что выделяется энергия  $\Delta E$  при объединении частиц в ядро (атом):

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

**Атомная единица массы** (а. е. м.) — средняя масса нуклона в атоме углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Атомная единица массы равна  $1/12$  массы атома углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ .

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

**Относительная атомная масса**  $M_r$  — число атомных единиц массы, содержащихся в массе атома:

$$m_{\text{a}} = M_r \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

**Моль** — количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна относительной атомной массе.

Молярная масса — масса одного моля.

Единица молярной массы — килограмм на моль (кг/моль).

**Постоянная Авогадро** — число атомов (или молекул), содержащихся в 1 моль любого вещества:

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

Молярная масса вещества

$$M = N_A m_{\text{a}}.$$

Существует четыре агрегатных состояния (или фазы) вещества: твёрдое, жидкое, газообразное, плазменное.

Вещество находится в **твёрдом состоянии**, если средняя энергия связи молекул значительно больше их средней кинетической энергии.

Молекулы в твёрдом теле располагаются упорядоченно.

**Жидкое состояние** возникает, если средняя кинетическая энергия молекул примерно равна их средней энергии связи. Упорядоченное расположение молекул наблюдается в жидкости лишь в пределах нескольких соседних молекулярных слоёв.

Вещество находится в **газообразном состоянии**, если средняя кинетическая энергия молекул превышает их среднюю энергию связи. Молекулы газа движутся хаотически.

**Плазма** — электронейтральная совокупность нейтральных и заряженных частиц.

**Ионизация** — процесс образования ионов из атомов.

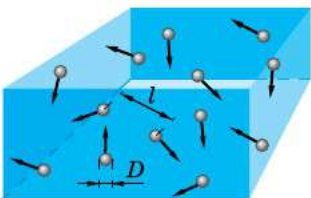


## § 41. Статистическое описание идеального газа

**Идеальный газ.** Любое вещество в земных условиях состоит из огромного числа молекул (мы отмечали, что 1 моль вещества содержит  $6,022 \cdot 10^{23}$  частиц). Математическое описание такой системы возможно лишь при рациональном выборе её физической модели. Наиболее простой моделью является *идеальный газ*, состоящий из атомов (молекул), которые сталкиваются со стенками сосуда и между собой упруго, но не взаимодействуют между столкновениями.

Достаточно точно эту модель представляют примерно сто шариков для настольного тенниса, хаотически движущихся и сталкивающихся со стенками, полом и потолком комнаты и гораздо реже друг с другом (рис. 129).

Реальный газ можно рассматривать как идеальный при выполнении трёх условий, называемых *условиями идеальности газа*.



1. Диаметр молекул много меньше среднего расстояния между ними:

$$D \ll l.$$

Это условие можно сформулировать иначе. Возведём в куб это неравенство и умножим его на полное число молекул  $N$ :

$$ND^3 \ll Nl^3,$$

где  $ND^3$  — объём всех молекул,  $Nl^3$  — объём газа.

Следовательно, *собственный объём молекул пренебрежимо мал по сравнению с объёмом газа*.

### ▲ 129

Модель идеального газа. Условия идеальности газа:

- 1)  $D \ll l$ ;
- 2)  $\bar{E}_k \gg \bar{E}_{св}$ ;
- 3)  $\bar{E}_k < I^*$



**2. Средняя кинетическая энергия молекул значительно превышает их среднюю энергию связи на расстоянии, большем диаметра молекул:**

$$\bar{E}_k \gg \bar{E}_{св}.$$

Это означает, что между столкновениями молекулы движутся практически по прямолинейным траекториям (см. рис. 122, в).

**3. Столкновения молекул газа со стенками сосуда и между собой абсолютно упругие.**

Следовательно, структура электронных оболочек молекул не нарушается в результате столкновений.

Обозначим через  $I^*$  энергию, необходимую для перевода (возбуждения) валентного электрона (определяющего валентность атома) на ближайшую орбиту (рис. 130).

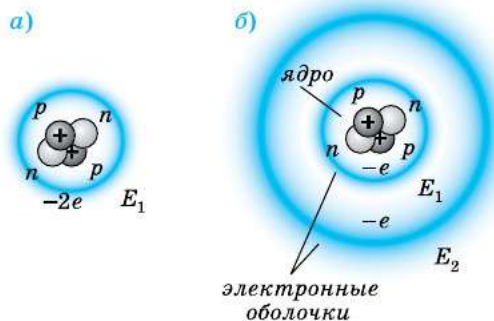
Взаимодействие молекул можно считать упругим, если средняя кинетическая энергия молекулы недостаточна для возбуждения электрона:

$$\bar{E}_k < I^*. \quad (108)$$

Условия идеальности обычно выполняются для разреженных газов. Примером идеального газа является атмосферный воздух.

За одни сутки молекулы воздуха ударяют каждого из нас примерно  $10^{32}$  раз. Их средняя скорость в 1,5 раза превышает скорость звука.

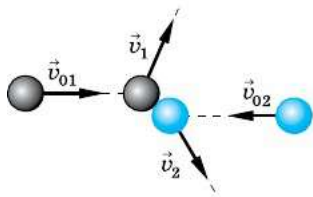
**Статистический метод.** При столкновении друг с другом молекулы изменяют направление своего движения.



### 130

Атом гелия:

*a* — в основном состоянии;  
*б* — в возбуждённом состоянии  $I^* = E_2 - E_1$



### ▲ 131

*Изменение направления движения молекул в результате упругого столкновения:*

$\vec{v}_{01}, \vec{v}_{02}$  — начальная

скорость молекул;

$\vec{v}_1, \vec{v}_2$  — скорость

молекул после столкновения

Если предположить, что сначала все молекулы двигались горизонтально, то уже после первого столкновения часть молекул изменит направление движения (рис. 131).

С каждым последующим столкновением возрастает хаотичность движения молекул. В результате частых столкновений любая молекула может двигаться в произвольно выбранном направлении с такой же вероятностью, как и в любом другом.

Но получение информации об отдельной частице не представляет практического интереса для описания поведения газа как целого. Информация о системе с большим числом частиц (идеальный газ) должна содержать сведения не об отдельной частице, а обо всей совокупности частиц в целом. Подобный *статистический*, обобщённый подход характерен, например, для военных историографов, которых главным образом интересует изменение дислокаций армий и фронтов в целом, а не участие в бою отдельного солдата.

историографов, которых главным образом интересует изменение дислокаций армий и фронтов в целом, а не участие в бою отдельного солдата.

*Статистическая закономерность в теории идеального газа — закон поведения совокупности большого числа частиц.* Система, состоящая из большого числа частиц, характеризуется *микроскопическими* и *макроскопическими параметрами*.

**Микроскопические параметры** — параметры, характеризующие движение отдельной молекулы (масса молекулы, её скорость, импульс, кинетическая энергия).

**Макроскопические параметры** — параметры, характеризующие свойства газа как целого (масса газа, давление, объём, температура).

Молекулярно-кинетическая теория объясняет макроскопические свойства вещества, исходя из характерных особенностей его молекулярной структуры.

**Статистический интервал.** В результате столкновений друг с другом молекулы идеального газа изменяют не только направление своего движения, но и скорость. Если предположить, что сначала все молекулы идеального газа, двигаясь хаотически, имели одну и ту же по модулю скорость, то уже после первого столкновения часть молекул изменит свою скорость (рис. 132).

В результате последующих столкновений устанавливается статистическое равновесие, при котором распределение молекул по скоростям не зависит от времени.

Ответить на вопрос, сколько частиц обладает определённой скоростью, невозможно. Точно так же нельзя сказать, сколько человек в классе имеет возраст 15 лет 8 месяцев 4 дня 11 секунд и 5 наносекунд. Таких людей может и не быть. Учитывая, что возраст (как и скорость) изменяется непрерывно, статистический опрос пришлось бы проводить бесконечно долго. Поэтому для определения статистического распределения школьников класса по возрасту выбирается определённый возрастной (статистический) интервал. Например, спрашивают: сколько в десятом классе школьников, возраст которых 15, 16 или 17 лет? Это означает, что при такой классификации школьников следует распределять по трём возрастным группам. Возраст школьников в I группе изменяется в пределах  $15 < W_1 < 16$ . Средний возраст в этой группе  $\bar{W}_1 = 15,5$  лет, возрастной интервал  $\Delta W = 0,5$  года. Тогда

$$15,5 - 0,5 < W_1 < 15,5 + 0,5,$$

или

$$\bar{W}_1 - \Delta W < W_1 < \bar{W}_1 + \Delta W.$$

Возраст школьников во II и III группах изменяется в пределах

$$\bar{W}_2 - \Delta W < W_2 < \bar{W}_2 + \Delta W,$$

$$\bar{W}_3 - \Delta W < W_3 < \bar{W}_3 + \Delta W,$$

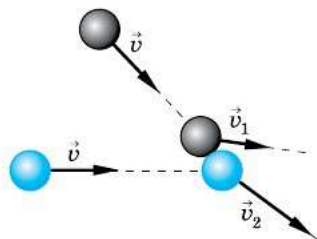
где  $\bar{W}_2 = 16,5$  лет,  $\bar{W}_3 = 17,5$  лет — средний возраст школьников во II и III группах.

**Среднее значение физической величины.** Предположим, что  $\Delta N_1$  — количество учащихся, составляющих I возрастную группу, которым исполнилось 15 лет,  $\Delta N_2$  — количество школьников 16 лет, а  $\Delta N_3$  — количество школьников 17 лет. Средний возраст класса можно найти, сложив возраст всех школьников и разделив его на число учащихся в классе:

$$\bar{W} = \frac{W_1 \Delta N_1 + W_2 \Delta N_2 + W_3 \Delta N_3}{N}. \quad (109)$$

По аналогичным формулам рассчитывается среднее значение любой физической величины. В случае, если  $\Delta N_1 = 4$ ,  $\Delta N_2 = 20$ ,  $\Delta N_3 = 2$ , средний возраст класса

$$\bar{W} = 16,4 \text{ года.}$$



### ▲ 132

*Изменение скорости молекул идеального газа в результате упругого столкновения, имевших до столкновения одинаковый модуль скорости*



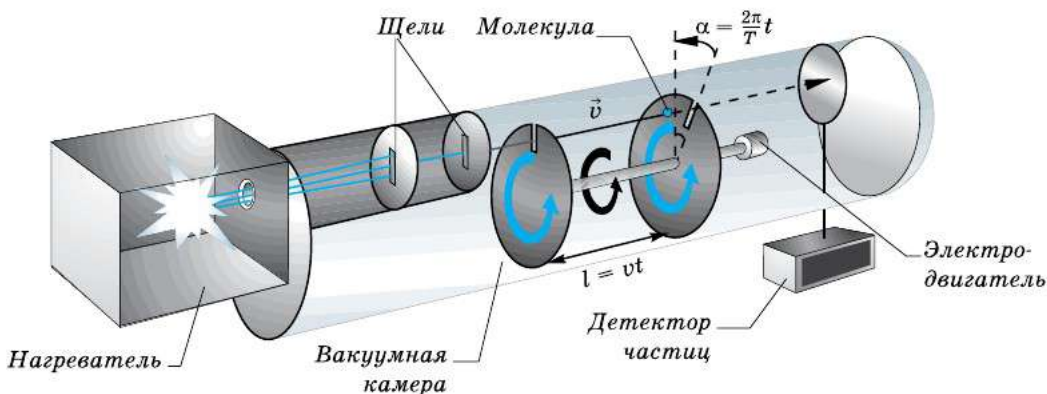
## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте условия, при которых газ можно считать идеальным.
2. Почему некоторые свойства разреженных газов не зависят от их химического состава?
3. Почему газ неограниченно расширяется, занимая весь предоставленный ему объём?
4. Запишите закон сохранения импульса и закон сохранения энергии для упругого столкновения молекул, изображённого на рисунке 132.
5. Как определить среднее значение физической величины из эксперимента?

## § 42. Распределение молекул газа по скоростям

**Распределение частиц по скоростям.** Впервые распределение молекул газа по скоростям было измерено О. Штерном в 1920 г. На рисунке 133 приведена принципиальная схема одного из вариантов опытов по измерению скорости молекул газа или пара.

В нагревателе с поверхности проволоки, раскалённой электрическим током, испаряются атомы вещества. Попадая из нагревателя через отверстие в вакуумную камеру, молекулы пара с помощью системы щелей формируются в узкий пучок, направленный в сторону двух дисков, вращающихся с периодом  $T$ . Диски используются для сортировки молекул по скоростям. Угол между прорезами в дисках  $\alpha$ . Расстояние  $l$  между дисками в процессе эксперимента не изменяется. Для того чтобы молекула



### ▲ 133

Принципиальная схема опыта для определения скорости молекул газа или пара

пара (газа) попала на приёмник детектора частиц, она должна пройти через прорезы в дисках. Значит, время  $t = \frac{l}{v}$  прохождения молекулы, движущейся со скоростью  $v$  между дисками, должно быть равно времени поворота прорезы второго диска на угол  $\alpha$ :

$$t = T \cdot \frac{\alpha}{2\pi}.$$

Из равенства этих интервалов времени следует, что скорость молекул

$$v = \frac{2\pi}{\alpha} \cdot \frac{l}{T}.$$

Угол прорезей  $\Delta\alpha$  в дисках конечен, поэтому через них будут попадать на детектор молекулы, скорость которых лежит в интервале от  $v$  до  $v + \Delta v$ , где  $\Delta v = v \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ .

**Распределение молекул по скоростям.** Пусть детектор фиксирует  $\Delta N = 600$  молекул, скорость которых находится в пределах от 500 до 512 м/с ( $v = 500$  м/с;  $\Delta v = 12$  м/с). Тогда число молекул, приходящихся на единичный интервал скоростей (например, молекул, имеющих скорость от 506 до 507 м/с или от 510 до 511 м/с), можно найти следующим образом:

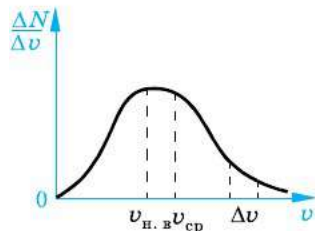
$$\frac{\Delta N}{\Delta v} = \frac{600}{12 \text{ м/с}} \frac{1}{\text{м/с}} = 50 \frac{1}{\text{м/с}}.$$

Для скоростей, лежащих в других пределах, число частиц, приходящихся на единичный интервал скоростей, будет иным.

Анализ экспериментальных данных, полученных в опыте (см. рис. 133), позволяет найти распределение молекул по скоростям при определённой температуре (рис. 134).

Зависимость числа молекул, приходящихся на единичный интервал скоростей, от скорости, которой они обладают, имеет максимум. Это означает, что наибольшее число молекул, приходящееся на единичный интервал скоростей, обладает такой (*наиболее вероятной*  $v_{н.в}$ ) скоростью.

Полученное распределение справедливо для описания многих систем, состоящих из большого числа частиц, характеризующихся внутренней хаотичностью.



### 134

Распределение молекул по модулю скорости при определённой температуре:

$\Delta N$  — число молекул со скоростью в интервале от  $v$  до  $v + \Delta v$ ;

$v_{\text{сп}}$  — средний модуль скорости движения молекул

При анализе любой статистической закономерности одной из важнейших характеристик является среднее значение величины (например, средняя продолжительность жизни). Выбирая определённый интервал скоростей  $\Delta v$ , можно найти средний модуль скорости молекул:

$$\bar{v} = \frac{v_1 \Delta N_1 + v_2 \Delta N_2 + \dots + v_k \Delta N_k}{N} = \frac{\left( v_1 \frac{\Delta N_1}{\Delta v} + v_2 \frac{\Delta N_2}{\Delta v} + \dots + v_k \frac{\Delta N_k}{\Delta v} \right) \Delta v}{N}.$$

Вычисления показывают, что средняя скорость молекул превышает наиболее вероятную. С увеличением температуры средняя и наиболее вероятная скорости молекул возрастают.

### В О П Р О С Ы

1. Для чего в опыте (см. рис. 133) используются вращающиеся диски?
2. Как в опыте (см. рис. 133) измеряются скорости движения молекул?
3. Что определяется углом между прорезями в дисках в опыте (см. рис. 133)?
4. Как рассчитывается число молекул, приходящихся на единственный интервал скоростей?
5. Как находится средний модуль скорости молекул?

## § 43. Температура

**Температура идеального газа.** В результате большого числа столкновений между молекулами устанавливается *стационарное равновесное состояние газа* — состояние, при котором число молекул в заданном интервале скоростей остаётся постоянным.

Важнейшим макроскопическим параметром, характеризующим стационарное равновесное состояние идеального газа, является его *температура*.

**Температура идеального газа** — физическая величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию хаотического поступательного движения его молекул.

Температура — статистическая величина, характеризующая достаточно большую совокупность частиц.

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекул идеального газа пропорциональна *термодинамической* (или абсолютной) температуре  $T$ :

$$\frac{m_a v^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \tag{110}$$



где  $m_a$  — масса атома (молекулы),  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Единица термодинамической температуры — *кельвин* (К):  $1 \text{ К} = 1 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Постоянная Больцмана является коэффициентом, переводящим температуру из градусной меры (К) в энергетическую (Дж) и обратно.

Кинетическая энергия не может быть отрицательной. Следовательно, не может быть отрицательной и термодинамическая температура. При *абсолютном нуле температуры* средняя кинетическая энергия молекул становится равной нулю — движение молекул прекращается.

**Шкалы температур.** Наряду с термодинамической температурной шкалой на практике используются и другие шкалы температур (рис. 135). Наиболее распространённой является шкала Цельсия.

В шкале Цельсия температура таяния льда принята за  $0 \text{ }^\circ\text{С}$ , а температура кипения воды равна  $100 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Абсолютный нуль термодинамической температуры по шкале Кельвина соответствует  $-273,15 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Связь между температурными шкалами Цельсия и Кельвина определяется соотношениями:

$$t \text{ }^\circ\text{С} = T - 273, \quad T = t \text{ }^\circ\text{С} + 273.$$

На рисунке 135 показаны эти шкалы температур и соотношения для перевода температуры из одной шкалы в другую.

Для шкалы Фаренгейта в качестве нуля выбрана наименьшая температура, которую Фаренгейт смог получить с помощью смеси воды, льда



## ▲ 135

### Шкалы температур

и морской соли. В качестве верхней опорной точки Фаренгейт использовал температуру кипения воды  $212^\circ\text{F}$ .

Явление расширения веществ при увеличении температуры используется в газовых и жидкостных термометрах.

В температурных индикаторах для измерения температуры тела цвет жидких кристаллов оказывается различным при разной температуре.

Измерение высоких температур проводится оптическими методами.

Существуют природные термометры — цветы. Крокусы раскрываются при повышении температуры и закрываются, когда она понижается. Они реагируют на изменение температуры на  $0,5^\circ\text{C}$ .

**Скорость теплового движения молекул.** Как следует из формулы (110), холодный газ отличается от нагретого энергией хаотического движения молекул, поэтому хаотическое движение молекул называется *тепловым*.

Для оценки скорости движения молекул в газе выделим сначала средний квадрат скорости из (110):

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

Умножим числитель и знаменатель правой части этого равенства на постоянную Авогадро  $N_A$ . Тогда

$$\overline{v^2} = \frac{3kN_A T}{m_a N_A}.$$

Произведение

$$kN_A = 1,38 \cdot 10^{23} \text{ Дж/К} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

называют *универсальной газовой постоянной* и обозначают  $R$ :

$$R = kN_A = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \quad (111)$$

С учётом равенств (111) и (106) выражение для среднего квадрата скорости молекул принимает вид

$$\overline{v^2} = \frac{3RT}{M}.$$

Извлекая корень квадратный из обеих частей этого равенства, получаем величину, имеющую размерность скорости и называемую *средней квадратичной скоростью молекул*:

$$v_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (112)$$

Средняя квадратичная скорость, близкая по значению к средней и наиболее вероятной скоростям, даёт правильное представление о значе-

нии скорости теплового движения (или тепловой скорости) молекул в идеальном газе. Вычислим тепловую скорость молекул азота ( $M = 2,8 \cdot 10^{-2}$  кг/моль) при температуре  $20^\circ\text{C}$  ( $293\text{ K}$ ):

$$v_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 293}{2,8 \cdot 10^{-2}}} \text{ м/с} \approx 511 \text{ м/с.}$$

Скорость звука при той же температуре равна  $347$  м/с. Таким образом, тепловая скорость молекул азота, близкая к скорости пули, превышает скорость звука в  $1,46$  раза.

У лёгких газов, как видно из формулы (112), средняя квадратичная скорость ещё больше, так как обратно пропорциональна  $\sqrt{M}$ . При той же температуре тепловая скорость молекул водорода примерно  $2$  км/с.

Отсутствие у Луны атмосферы можно объяснить тем, что тепловая скорость молекул газов существенно превышает вторую космическую скорость для Луны. Поэтому молекулы газа отрывались от Луны и уносились в космическое пространство.

### В О П Р О С Ы

1. Какое состояние газа является стационарным равновесным?
2. Сформулируйте определение температуры тела. Какая единица температуры используется в СИ?
3. Применимо ли понятие температуры к одной молекуле?
4. Почему термодинамическая температура не может быть отрицательной?
5. Атмосферный воздух состоит из азота, кислорода, аргона и других газов. Одинакова ли тепловая скорость молекул этих газов?

### З А Д А Ч И

1. Термодинамическая температура газа изменяется с  $312$  до  $437$  К. Найдите изменение его температуры по шкале Цельсия.
2. Найдите среднюю квадратичную скорость атомов гелия при температуре  $20^\circ\text{C}$ .
3. При какой термодинамической температуре средняя квадратичная скорость молекул водорода равна  $1224$  км/ч?

## § 44. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

**Давление газа.** Молекулы газа, движущиеся со сверхзвуковой скоростью при обычной температуре, сталкиваясь с любыми препятствиями на своём пути (стенки сосуда, люди, животные, машины, вода, скалы),





### ▲ 136

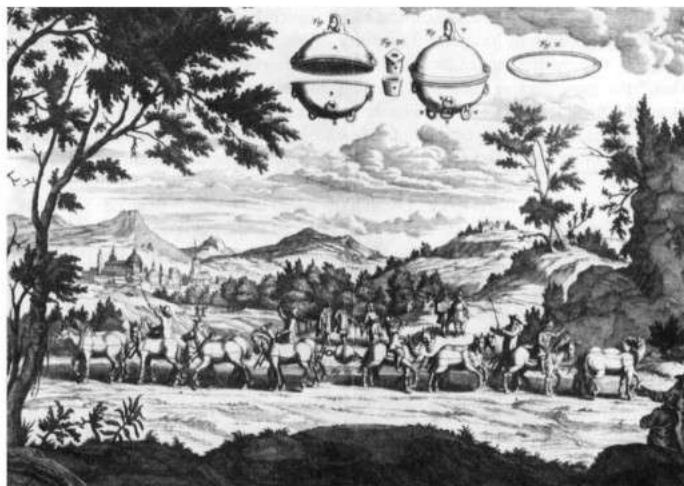
*Деформация тонкой металлической канистры под действием атмосферного давления после откачки из неё воздуха*

воздействуют на них, оказывают давление. В процессе эволюции природа позаботилась о том, чтобы барабанные перепонки уха человека не были слишком чувствительны. Иначе в результате постоянной бомбардировки ушей молекулами воздуха в них стоял бы гул, напоминающий шум от стартующего самолёта или ракеты и мешающий воспринимать все остальные звуки. Барабанная перепонка не продавливается внутрь бомбардирующими её молекулами только потому, что такая же бомбардировка происходит и с внутренней стороны уха. При нарушении баланса давления воздуха на перепонку изнутри и снаружи может возникать боль в ушах. Например, насморк у пассажира самолёта может быть причиной болевых ощущений. При взлёте самолёта наружное давление падает, а распухшая слизистая оболочка затрудняет доступ воздуха из внешнего пространства во внутреннюю полость уха. Это приводит к тому, что давление на перепонку снаружи и изнутри не может быстро уравняться.

Давление атмосферного воздуха заметно не проявляется из-за точного баланса внешнего и внутреннего давления. Нарушение этого баланса наглядно показывает, как велико атмосферное давление.

### 137 ▲

*Эксперимент с «магдебургскими полушариями» 18 мая 1654 г. (О. фон Герике. «Experimenta Nova»)*



Если из канистры, сделанной из тонкого металла, откачать воздух, то она мгновенно деформируется под давлением атмосферного воздуха в результате её бомбардировки молекулами воздуха (рис. 136).

В 1654 г. немецкий изобретатель Отто фон Герике организовал в Магдебурге в присутствии императора Фердинанда III научное театрализованное представление (рис. 137).

Две восьмёрки лошадей тщетно пытались разорвать в разные стороны две бронзовые полушеры, из пространства между которыми предварительно был откачан воздух. Секрет эксперимента с «магдебургскими полушариями» объясняется огромными, некомпенсируемыми изнутри силами, сдавливающими полушария в результате их бомбардировки снаружи молекулами воздуха (рис. 138).

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.** Давление газа является результатом ударов молекул. Модель идеального газа позволяет выразить давление газа (макроскопический параметр) через микроскопические параметры — массу  $m_a$  и скорость  $v$  молекул, их концентрацию  $n$ . **Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа** имеет вид

$$p = \frac{1}{3} n m_a \overline{v^2}, \quad (113)$$

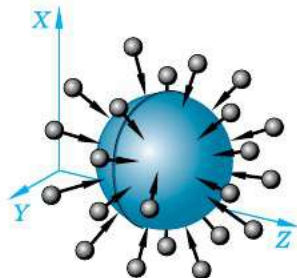
где  $\overline{v^2}$  — средний квадрат скорости хаотического движения молекул.

Умножив и разделив правую часть равенства на 2, можно получить ещё одну форму записи основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}, \quad (114)$$

где  $\overline{E_k} = \frac{m_a \overline{v^2}}{2}$  — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

В данной формуле концентрация частиц характеризует число ударов молекул о поверхность, а средняя кинетическая энергия молекул — интенсивность одного удара.



### ▲ 138

*Сжатие «магдебургских полушарий» — результат их бомбардировки снаружи частицами воздуха*

**Давление идеального газа равно двум третям суммарной кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объёма.**

Если газ представляет собой смесь идеальных газов, молекулы каждого газа ударяют поршень независимо друг от друга. В соответствии с принципом суперпозиции сил давления газов, составляющих смесь (*парциальные давления*), суммируются.

### Закон Дальтона

**Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в неё газов.**

Так, атмосферное давление складывается из парциальных давлений азота, кислорода и других газов.

### В О П Р О С Ы

1. Почему барабанная перепонка уха не продавливается бомбардирующими её молекулами воздуха?
2. Что доказал эксперимент О. фон Герике?
3. Какие параметры связывает основное уравнение молекулярно-кинетической теории?
4. На высоте нескольких сотен километров над Землёй молекулы воздуха имеют кинетическую энергию, которой соответствует температура порядка тысяч градусов Цельсия. Почему на такой высоте не плавают искусственные спутники Земли?
5. Сформулируйте закон Дальтона.

### З А Д А Ч И

1. «Магдебургские полушария» с каждой стороны растягивали 8 лошадей. Как изменится сила тяги, если одно полушарие прикрепить к стене, а другое будут тянуть 16 лошадей?
2. Идеальный газ оказывает на стенки сосуда давление  $1,01 \cdot 10^5$  Па. Тепловая скорость молекул 500 м/с. Найдите плотность газа.
3. Под каким давлением находится кислород, если тепловая скорость его молекул 550 м/с, а их концентрация  $10^{25} \text{ м}^{-3}$ ?

## § 45. Уравнение Клапейрона—Менделеева

**Постоянная Лошмидта.** Исключим последовательно из основного уравнения молекулярно-кинетической теории (114) микроскопические параметры, заменяя их на макроскопические. Подставляя выражение для средней кинетической энергии молекулы (110) в формулу (114), получаем

$$p = nkT. \tag{115}$$



метров  $(p, V)$ ,  $(p, T)$  или  $(V, T)$ . Третий параметр  $T$ ,  $V$  или  $p$  соответственно определяется из уравнения Клапейрона—Менделеева.

С помощью уравнения состояния можно описывать равновесное состояние идеального газа.

### В О П Р О С Ы

1. Каковы нормальные условия для идеального газа?
2. Какова концентрация молекул идеального газа при нормальных условиях?
3. В чём физический смысл постоянной Лошмидта?
4. Какие макроскопические параметры связывает уравнение Клапейрона—Менделеева?
5. Какие макроскопические параметры следует задать для однозначного определения состояния идеального газа?

### З А Д А Ч И

1. Как изменится давление газа при уменьшении в 4 раза его объёма и увеличении в 1,5 раза температуры?
2. Давление газа в люминесцентной лампе  $10^3$  Па, а его температура  $42^\circ\text{C}$ . Определите концентрацию атомов в лампе.
3. Оцените число молекул воздуха, находящихся в классе при атмосферном давлении и температуре  $20^\circ\text{C}$ .

## § 46. Изопроцессы

**Изотермический процесс. Закон Бойля—Мариотта.** Многие процессы изменения состояния газов в природе и в тепловых машинах происходят так, что один из трёх макроскопических параметров (объём, давление или температура) остаётся (или специально поддерживается) постоянным. Два других параметра при этом изменяются.

**Изопроцесс — процесс, при котором один из макроскопических параметров состояния газа данной массы остаётся постоянным.**

Рассмотрим последовательно возможные изопроцессы.

*Изотермический процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянной температуре.*

При изотермическом процессе  $T = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ . Это значит, что

$$\frac{m}{M}RT = \text{const}.$$

При этих условиях из уравнения Клапейрона—Менделеева следует закон Бойля—Мариотта:

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

Это означает, что произведение начального давления газа  $p_1$  на его первоначальный объём  $V_1$  равно произведению этих параметров  $p_2, V_2$  в произвольный момент времени.

### Закон Бойля—Мариотта

Для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объём постоянно:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

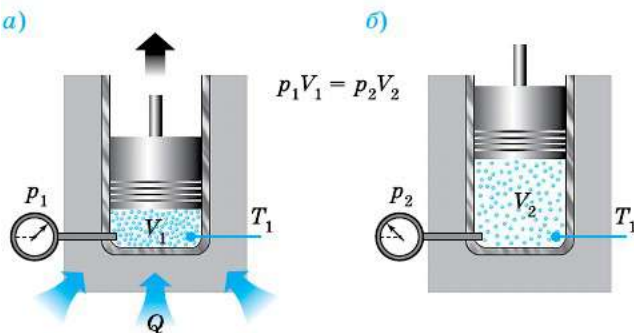
Закон Бойля—Мариотта объясняет, почему пузырьки воздуха, поднимаясь в воде, увеличиваются в объёме: на глубине давление жидкости больше, чем у поверхности воды.

На рисунке 139 представлены начальное и конечное состояния газа при его изотермическом расширении при температуре  $T_1$ , когда к газу подводится количество теплоты  $Q$ .

В начале процесса объём газа  $V_1$ , давление  $p_1$ , в конечном состоянии —  $V_2$  и  $p_2$  соответственно.

Давление газа при изотермическом процессе, как следует из закона Бойля—Мариотта, обратно пропорционально его объёму:

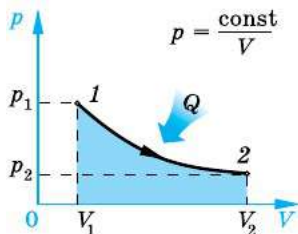
$$p = \frac{\text{const}}{V}.$$



### 139

Изотермическое расширение газа:

а — начальное состояние;  
б — конечное состояние



### ▲ 140

График изотермического расширения:  
изотерма 1—2

Графиком такой обратно пропорциональной зависимости является гипербола (сравните с  $y = \frac{c}{x}$ ), называемая для данного процесса *изотермой* (рис. 140).

*Изотерма* — график изменения макроскопических параметров газа при изотермическом процессе.

Предположим, что при изотермическом расширении газа поршень движется вверх со скоростью  $v$  (рис. 141).

Скорость молекулы, догоняющей поршень, при отражении уменьшается вследствие уменьшения проекции скорости молекулы на ось  $Y$ . В этом случае  $v_{2y} = v_{1y} - 2v$ , а  $v_{2x} = v_{1x}$ . Это приводит к уменьшению средней кинетической энергии молекул газа, т. е. к его охлаждению. Поэтому для поддержания постоянной температуры к газу подводится количество теплоты  $Q$  (см. рис. 139, 140).

**Изобарный процесс. Закон Гей-Люссака.**  
*Изобарный процесс* — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном давлении.

При изобарном процессе  $p = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ .

При этих условиях из уравнения Клапейрона—Менделеева следует *закон Гей-Люссака*:

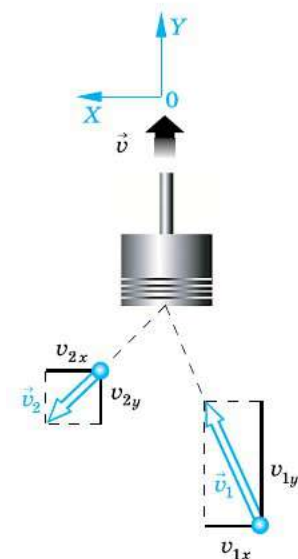
$$\frac{V}{T} = \frac{mR}{Mp}, \quad \frac{mR}{Mp} = \text{const} \Rightarrow \frac{V}{T} = \text{const},$$

откуда

$$V = \text{const} \cdot T. \quad (117)$$

*Объём газа данной массы при постоянном давлении пропорционален термодинамической температуре.*

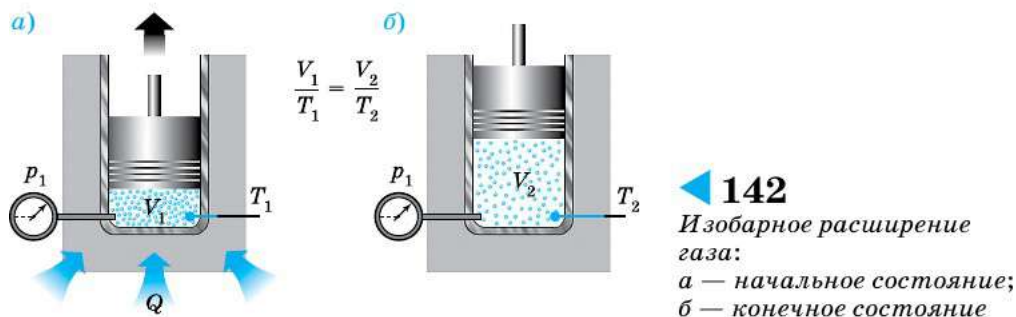
Согласно закону Гей-Люссака отношение первоначального объёма  $V_1$  газа к его температуре  $T_1$  равно отношению этих параметров  $V_2$ ,  $T_2$  в произвольный момент времени.



### ▲ 141

Охлаждение газа при его расширении:  
скорость молекул после их отражения от поршня и их средняя кинетическая энергия уменьшаются





## 142

*Изобарное расширение газа:*

*а — начальное состояние;  
б — конечное состояние*

### Закон Гей-Люссака

Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объёма газа к его термодинамической температуре постоянно:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

На рисунке 142 представлены начальное и конечное состояния газа при его изобарном расширении при давлении  $p_1$ , когда к газу подводится количество теплоты  $Q$ . В начале процесса объём газа  $V_1$ , температура  $T_1$ , в конечном состоянии —  $V_2$  и  $T_2$  соответственно.

Линейная зависимость объёма газа от температуры при изобарном процессе определяется формулой (117). Графиком такой линейной зависимости является прямая (сравните с  $y = kx$ ), называемая для данного процесса *изобарой* (рис. 143, а).

*Изобара — график изменения макроскопических параметров газа при изобарном процессе.* На  $p$ — $V$ -диаграмме графиком изобары является прямая, параллельная оси  $V$  (рис. 143, б).

При изобарном расширении температура газа и соответственно средняя квадратичная скорость молекул возрастают за счёт количества теплоты  $Q$ , подводимого к газу.

Воздушный шарик, помещённый на сухой лёд, сжимается. Давление внутри шарика уменьшается, так как уменьшается скорость молекул и сила их удара о стенки шарика. В то же время наружное давление атмосферного воздуха остаётся постоянным. Результирующее давление сжимает шарик.

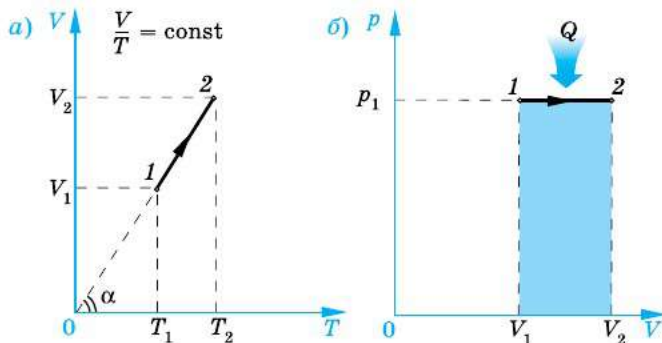
**Изохорный процесс. Закон Шарля.** *Изохорный процесс — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном объёме.*

При изохорном процессе  $V = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ .



## 143

Изобарный процесс расширения:  
 а — на  $V-T$ -диаграмме;  
 б — на  $p-V$ -диаграмме



При этих условиях из уравнения Клапейрона—Менделеева следует закон Шарля:

$$\frac{p}{T} = \frac{m}{M} \frac{R}{V}, \quad \frac{m}{M} \frac{R}{V} = \text{const} \Rightarrow \frac{p}{T} = \text{const},$$

откуда

$$p = \text{const} \cdot T. \quad (118)$$

Давление газа данной массы при постоянном объёме пропорционально термодинамической температуре.

Изменение давления газа в любом замкнутом сосуде (например, его увеличение в электрической лампочке при нагревании и уменьшение при выключении лампочки) является изохорным процессом.

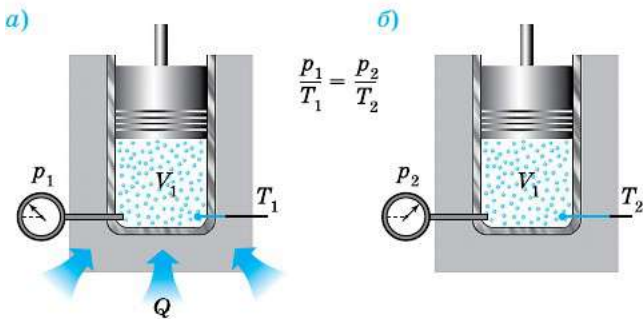
Согласно закону Шарля отношение первоначального давления газа  $p_1$  к его температуре  $T_1$  равно отношению этих параметров  $p_2$ ,  $T_2$  в произвольный момент времени.

### Закон Шарля

Для газа данной массы при постоянном объёме отношение давления газа к его термодинамической температуре постоянно:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

На рисунке 144 представлены начальное и конечное состояния газа объёмом  $V_1$  при изохорном нагревании, когда к газу подводится количество теплоты  $Q$ . В начале процесса давление газа  $p_1$ , температура  $T_1$ , в конечном состоянии —  $p_2$  и  $T_2$  соответственно.



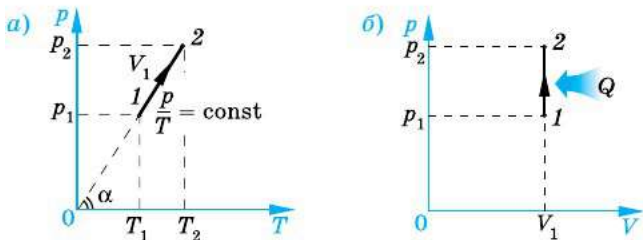
◀ 144

Изохорное нагревание газа:  
а — начальное состояние;  
б — конечное состояние

Линейная зависимость давления газа от температуры при изохорном процессе определяется формулой (118). Графиком такой зависимости в координатных осях  $p, T$  является прямая, называемая для данного процесса *изохорой* (рис. 145, а).

*Изохора* — график изменения макроскопических параметров газа при изохорном процессе.

В координатных осях  $p, V$  изохора является прямой, параллельной оси давления (рис. 145, б).



◀ 145

Изохорное нагревание:  
а — на  $p-T$ -диаграмме;  
б — на  $p-V$ -диаграмме

При изохорном нагревании газа за счёт подводимого к нему количества теплоты средняя квадратичная скорость молекул и соответственно температура и давление газа возрастают.

### В О П Р О С Ы

1. Какие процессы изменения состояния идеального газа называют изопроцессами?
2. Какой процесс называют изотермическим? Сформулируйте закон Бойля—Мариотта.
3. Почему при изотермическом расширении к газу необходимо подводить количество теплоты?
4. Какой процесс называют изобарным? Сформулируйте закон Гей-Люссака.
5. Какой процесс называют изохорным? Сформулируйте закон Шарля.



### З А Д А Ч И

1. Определите глубину озера, если объём воздушного пузырька удваивается при подъёме со дна на поверхность. Температура пузырька не успевает измениться при подъёме.
2. Некоторая масса газа нагревается изобарно на  $\Delta T = 300$  К. При этом объём газа увеличивается в 2 раза. Найдите начальную температуру газа.
3. Газ нагрели изохорно на  $60^\circ\text{C}$ . При этом давление газа возросло на 20%. Найдите начальную температуру газа.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Закрытый горизонтальный цилиндр разделён лёгкой подвижной непроницаемой перегородкой, закреплённой на расстояниях  $L_1 = 0,2$  м и  $L_2 = 0,4$  м от торцов цилиндра (рис. 146). Давление воздуха в левой и правой частях сосуда равно соответственно  $p_1 = 1,6 \cdot 10^5$  Па и  $p_2 = 1,2 \cdot 10^5$  Па. На какое расстояние  $l$  и в какую сторону сдвинется перегородка, если её освободить?

#### Решение.

Так как давление  $p_1 > p_2$ , перегородка сдвинется вправо, в сторону меньшего давления. Она остановится, когда давление  $p$  в обеих частях сосуда станет одинаковым. Полагая, что при сдвиге перегородки температура воздуха в сосуде не изменяется, запишем закон Бойля—Мариотта для левой и правой частей сосуда в отдельности. (Масса воздуха в каждой из этих частей не изменяется при этом сдвиге.)

Для левой части

$$p_1 V_1 = p(V_1 + \Delta V),$$

для правой части

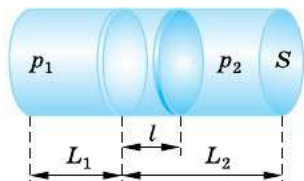
$$p_2 V_2 = p(V_2 - \Delta V).$$

Учитывая, что  $V_1 = L_1 S$ ,  $V_2 = L_2 S$ ,  $\Delta V = lS$  ( $S$  — поперечное сечение цилиндра), получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными  $l$  и  $p$ :

$$\begin{cases} p_1 L_1 = p(L_1 + l), \\ p_2 L_2 = p(L_2 - l). \end{cases}$$

Разделив почленно левые и правые части уравнений системы, получим уравнение для  $l$ :

$$\frac{p_1 L_1}{p_2 L_2} = \frac{L_1 + l}{L_2 - l}.$$



### ▲ 146

Сдвиг перегородки

Тогда  $p_1 L_1 (L_2 - l) = p_2 L_2 (L_1 + l)$ . Раскрывая скобки, имеем

$$p_1 L_1 L_2 - p_1 L_1 l = p_2 L_2 L_1 + p_2 L_2 l.$$

Окончательно получаем

$$l = \frac{(p_1 - p_2) L_1 L_2}{p_1 L_1 + p_2 L_2} = 0,04 \text{ м.}$$

**Ответ:** вправо на 0,04 м.

### Т В О Р Ч Е С К И Е   З А Д А Н И Я

1. В каких областях научного знания используют статистический метод исследования? Ответ представьте в виде схемы.
2. Подготовьте доклад «Методы измерения больших температур».
3. Выявите общее и различное в следующих словосочетаниях: «атмосферное давление», «давление газа», «артериальное давление человека». Ответ представьте в виде таблицы.
4. В уравнении Клапейрона—Менделеева единственной величиной, определяющей специфику газа, является молярная масса. Масса человека определяет его специфику (индивидуальность)? Ответ аргументируйте.
5. В молекулярно-кинетической теории графически изображают равновесные процессы. А какие процессы изображают графически в других науках? Приведите примеры из истории, географии, химии и биологии.

### О С Н О В Н Ы Е   П О Л О Ж Е Н И Я

#### ■ Условия идеальности газа:

- 1) диаметр молекул много меньше среднего расстояния между ними;
- 2) средняя кинетическая энергия молекул значительно превышает их среднюю энергию связи на расстоянии, большем диаметра молекул;
- 3) столкновения молекул газа со стенками сосуда и между собой абсолютно упругие.

■ Молекулы в идеальном газе движутся хаотически. Движение одной молекулы характеризуют микроскопические параметры (масса молекулы, её скорость, импульс, кинетическая энергия). Свойства газа как целого описываются с по-

мощью макроскопических параметров (масса газа, давление, объём, температура).

Молекулярно-кинетическая теория устанавливает взаимосвязь между микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Число молекул в идеальном газе столь велико, что закономерности их поведения можно выявить только с помощью статистического метода.

- Распределение молекул идеального газа по скоростям при определённой температуре является статистической закономерностью.

**Стационарное равновесное состояние газа** — состояние, при котором число молекул в заданном интервале скоростей остаётся постоянным.

**Температура идеального газа** — физическая величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию хаотического поступательного движения его молекул:

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

где черта сверху — знак усреднения,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Единица термодинамической температуры — *кельвин* (К).

При абсолютном нуле температуры средняя кинетическая энергия молекул равна нулю.

**Средняя квадратичная (тепловая) скорость** молекул газа

$$v_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

где  $M$  — молярная масса,  $R = 8,31$  Дж/(К·моль) — универсальная газовая постоянная.

**Давление газа** — следствие ударов движущихся молекул:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k,$$

где  $n$  — концентрация молекул (число молекул в единице объёма),  $\bar{E}_k$  — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Давление газа пропорционально его температуре:

$$p = nkT.$$

**Уравнение Клапейрона—Менделеева** — уравнение состояния идеального газа, связывающее три макроскопических параметра (давление, объём и температуру) газа данной массы:

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

**Изопроцесс** — процесс, при котором один из макроскопических параметров состояния газа данной массы остаётся постоянным.

**Изотермический процесс** — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянной температуре.

**Закон Бойля—Мариотта:** для газа данной массы при постоянной температуре

$$p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

где  $p_1, p_2, V_1, V_2$  — давление и объём газа в начальном и конечном состояниях.

*Изотерма* — график изменения макроскопических параметров газа при изотермическом процессе.

**Изобарный процесс** — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном давлении.

**Закон Гей-Люссака:** для газа данной массы при постоянном давлении

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2},$$

где  $V_1, V_2, T_1, T_2$  — объём и температура газа в начальном и конечном состояниях.

*Изобара* — график изменения макроскопических параметров газа при изобарном процессе.



■ **Изохорный процесс** — процесс изменения состояния газа определённой массы при постоянном объёме.

**Закон Шарля:** для газа данной массы при постоянном объёме

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2},$$

где  $p_1, p_2, T_1, T_2$  — давление и температура газа в начальном и конечном состояниях.

*Изохора* — график изменения макроскопических параметров газа при изохорном процессе.



## § 47. Внутренняя энергия

**Предмет изучения термодинамики.** Работа машин и механизмов, используемых человечеством в повседневном опыте на протяжении тысячелетий, осуществлялась главным образом за счёт мускульных усилий людей и животных. Применение наклонной плоскости, рычагов, колёс и блоков существенно облегчило физические нагрузки. Использование энергии ветра и падающей воды позволило совершать значительно большую механическую работу, чем прежде.

Однако огромный запас энергии, находящейся внутри тел, практически до XVIII в. не был востребован цивилизацией. Исключение составляла лишь энергия огня, которая использовалась для обогрева, приготовления пищи, выплавки и обработки металлов.

Одним из достижений научно-технической революции стала возможность использовать внутреннюю энергию, за счёт которой может совершаться большая работа.

**Термодинамика** изучает тепловые свойства тел, возможности использования внутренней энергии тел для совершения механической работы.

**Внутренняя энергия идеального газа.** Одной из основных величин, используемых в термодинамике, является *внутренняя энергия тела*.

**Внутренняя энергия тела** — сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов или молекул) тела и потенциальной энергии их взаимодействия.

Для идеального газа потенциальная энергия взаимодействия частиц пренебрежимо мала по сравнению с кинетической энергией их теплового

движения. Поэтому внутренняя энергия идеального газа определяется кинетической энергией теплового движения частиц:

$$U = N\bar{E}_k, \text{ где } \bar{E}_k = \frac{3}{2} kT, N \text{ — число частиц.}$$

Разделив и умножив это выражение на молярную массу  $M = m_a N_A$ , получаем

$$U = \frac{3}{2} \frac{N(m_a N_A)kT}{M} = \frac{3}{2} \frac{(Nm_a)(N_A k)T}{M}.$$

Учитывая, что масса газа  $m = Nm_a$ , а универсальная газовая постоянная  $R = N_A k$ , получаем выражение для внутренней энергии одноатомного идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (119)$$

*Внутренняя энергия идеального газа данной массы зависит лишь от одного макроскопического параметра — термодинамической температуры.*

**Изменение внутренней энергии.** Известно, что изменение температуры тела приводит к изменению его внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  равно разности её конечного  $U_2$  и начального  $U_1$  значений:

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Существует два способа изменения внутренней энергии системы: *теплообмен и совершение работы.*

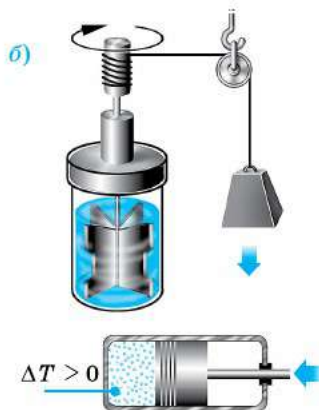
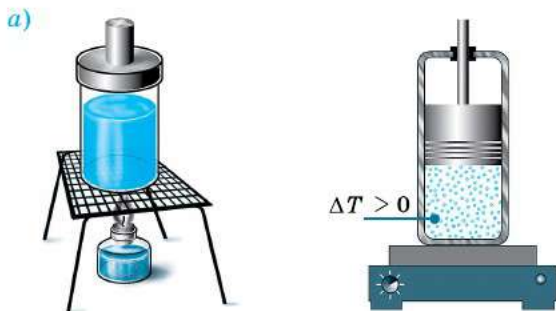
**Теплообмен — процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы.**

Мерой такой передачи энергии, как теплообмен, является *количество теплоты  $Q$ .*

**Количество теплоты — энергия, получаемая или отдаваемая телом в процессе теплообмена.**

При нагревании тела увеличиваются его температура и внутренняя энергия (рис. 146, а).





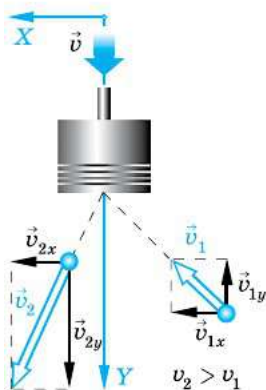
### ▲ 146

Способы изменения внутренней энергии:

a — теплообмен;

b — совершение работы над системой

Для уменьшения внутренней энергии тела можно привести его в контакт с более холодным телом. В результате теплообмена температура и внутренняя энергия горячего тела уменьшаются, но работа не совершается, так как тела не перемещаются.



Количество теплоты, полученное или отданное телом при теплообмене, рассчитывается по формуле  $Q = cm\Delta t$ , где  $c$  — удельная теплоёмкость вещества.

За счёт изменения внутренней энергии тела при теплообмене не может совершаться работа.

За счёт совершения работы может происходить увеличение температуры и внутренней энергии системы, например при вращении лопастей в жидкости и сжатии газа в сосуде (рис. 146, б).

Согласно молекулярно-кинетической теории, при расширении газа происходит его охлаждение из-за уменьшения средней кинетической энергии молекул после их отражения от поршня (см. рис. 141).

При сжатии газа поршень передаёт молекулам газа часть своей кинетической энергии (рис. 147), в результате чего средняя кинетическая энергия молекул возрастает — газ нагревается.

### ▲ 147

Увеличение скорости молекул в результате столкновения с поршнем

В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте определение внутренней энергии тела. Зависит ли внутренняя энергия тела от его движения и положения относительно других тел?
2. От какого макроскопического параметра зависит внутренняя энергия идеального газа?
3. Как можно изменить внутреннюю энергию жидкости, газа?
4. Дайте определение количества теплоты, получаемого телом.
5. Почему при сжатии газа он нагревается?

З А Д А Ч И

1. Гелий массой 5 кг нагревается от 10 до 30 °С. Определите изменение внутренней энергии газа. Молярную массу гелия следует принять равной  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.
2. Определите изменение внутренней энергии гелия при его изобарном расширении от начального объёма 10 л до конечного 15 л. Давление газа  $10^4$  Па.
3. Одноатомный газ находится под давлением  $10^5$  Па в сосуде объёмом  $1,33$  м<sup>3</sup>. При изохорном охлаждении внутренняя энергия газа уменьшается на 100 кДж. Чему равно конечное давление газа?

## § 48. Работа газа при изопроцессах

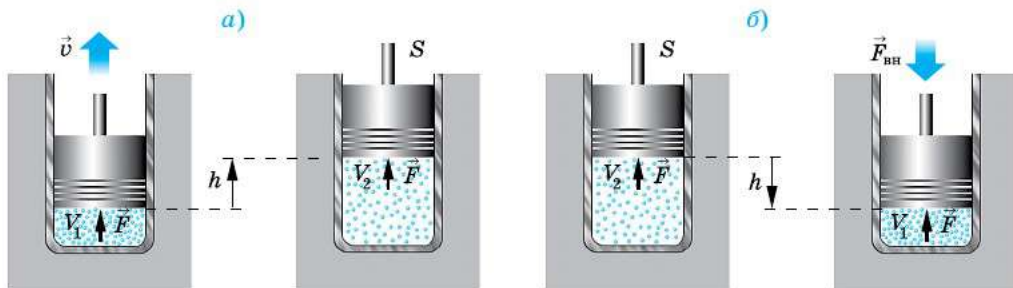
**Работа газа при расширении и сжатии.** Для обратного перехода внутренней энергии тела в механическую работу необходимо каким-то образом преобразовать хаотическое движение его молекул в упорядоченное движение другого тела. В качестве такого тела наиболее целесообразно использовать поршень в цилиндре, перемещающийся под давлением газа, заполняющего цилиндр. Устройство, осуществляющее такое преобразование, называют *тепловым двигателем*. В этом параграфе вы познакомитесь с работой поршневого двигателя.

Вычислим работу, совершаемую силой давления  $F$  газа при его расширении от начального объёма  $V_1$  до конечного  $V_2$  (рис. 148, а).

Будем считать, что поршень, площадь поперечного сечения которого равна  $S$ , перемещается на высоту  $h$  и что сила давления газа остаётся постоянной в процессе перемещения.

Работа силы давления газа при таком перемещении по определению равна

$$A = Fh \cos 0^\circ = \frac{F}{S} Sh.$$



### ▲ 148

Работа, совершаемая газом:

а — расширение газа ( $\Delta V > 0$ ;  $A > 0$ );

б — сжатие газа ( $\Delta V < 0$ ;  $A < 0$ )

Так как среднее давление газа  $\bar{p} = \frac{F}{S}$ , изменение его объема  $\Delta V = V_2 - V_1 - V_1 = Sh$ , то выражение для работы газа можно представить в виде

$$A = \bar{p}\Delta V = \bar{p}(V_2 - V_1). \quad (119)$$

Работа, совершаемая газом, равна произведению среднего давления газа на изменение его объема.

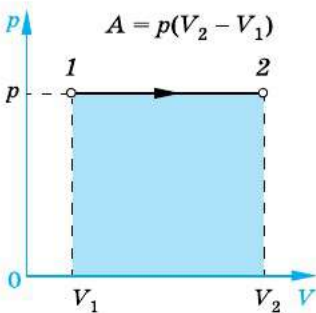
При расширении ( $\Delta V > 0$ ) газ совершает положительную работу, отдавая энергию окружающим телам. Внутренняя энергия газа при расширении уменьшается.

При сжатии ( $\Delta V < 0$ ) работа, совершаемая газом, отрицательна (рис. 148, б). Внутренняя энергия газа при сжатии увеличивается (см. § 47).

**Работа газа при изопроцессах.** При изохорном процессе ( $\Delta V = 0$ ) работа газом не совершается:  $A = 0$ .

Рассмотрим *изобарное расширение газа*, имеющего давление  $p$ , от начального объема  $V_1$  до конечного  $V_2$ . Работа, совершаемая газом, равна площади прямоугольника под изобарой со сторонами  $p$  и  $(V_2 - V_1)$  (рис. 149).

При *изотермическом расширении газа* его давление изменяется по гиперболическому закону. Выделим на изотерме небольшой участок,



### ▲ 149

Работа, совершаемая газом при изобарном расширении ( $p = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ )



## § 49. Первый закон термодинамики

**Закон сохранения энергии для тепловых процессов.** До сих пор мы рассматривали два способа изменения внутренней энергии системы: теплообмен и совершение работы над системой независимо друг от друга. В общем случае внутренняя энергия может изменяться одновременно как за счёт теплообмена с окружающими телами, так и за счёт совершения работы внешними силами.

*Первый закон термодинамики (закон сохранения энергии для тепловых процессов)* определяет количественное соотношение между изменением внутренней энергии системы  $\Delta U$ , количеством теплоты  $Q$ , подведённым к ней, и работой  $A$ , совершаемой системой над внешними телами.

### *Первый закон термодинамики*

**Количество теплоты, подведённое к системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами:**

$$Q = \Delta U + A.$$

Количество теплоты, подведённое к системе, считают положительным, а выделяемое — отрицательным.

Для изолированной системы, которая не обменивается энергией с окружающими телами ( $Q = 0$ ) и над которой не совершается работа внешних сил ( $A_{\text{вн}} = 0$ ) — *теплоизолированной системы*,

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0,$$

или

$$U_2 = U_1.$$

*Внутренняя энергия замкнутой, теплоизолированной системы сохраняется.*

**Первый закон термодинамики для изопроцессов.** Количество теплоты, сообщаемое газу для изменения его состояния, зависит от способа перехода газа из одного состояния в другое. При разных процессах, связывающих два состояния тела, подведённое (отведённое) количество теплоты также будет различным.

*При изохорном процессе* объём газа остаётся постоянным ( $\Delta V = 0$ ), поэтому газ не совершает работу ( $A = 0$ ).

Изменение внутренней энергии газа происходит благодаря теплообмену с окружающими телами:

$$Q = \Delta U. \quad (120)$$

Если начальная температура идеального одноатомного газа равна  $T_1$ , а конечная  $T_2$ , то

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T, \quad (121)$$

где  $\Delta T = T_2 - T_1$  — изменение температуры газа.

Подставляя это выражение в равенство (120), получаем

$$Q = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T.$$

Нагревание газа ( $\Delta T > 0$ ) происходит при подведении к нему количества теплоты ( $Q > 0$ ). При изохорном нагревании (рис. 152) давление газа возрастает из-за увеличения средней кинетической энергии молекул.

Если от газа отводится количество теплоты ( $Q < 0$ ), то газ охлаждается ( $\Delta T < 0$ ) и его давление падает.

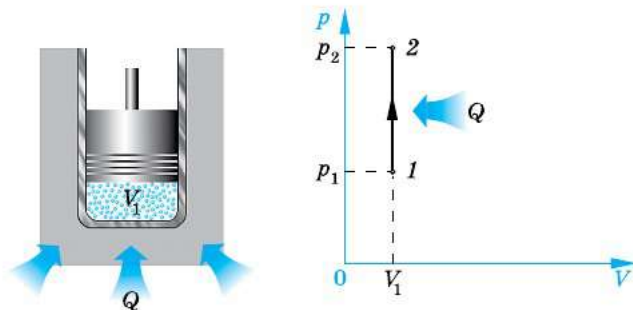
При изотермическом процессе постоянна температура ( $\Delta T = 0$ ), поэтому внутренняя энергия газа не изменяется ( $\Delta U = 0$ ) (см. (121)).

При изотермическом процессе количество теплоты, переданное газу от нагревателя, полностью расходуется на совершение работы:

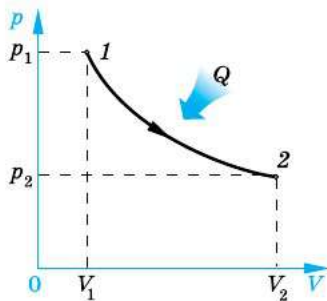
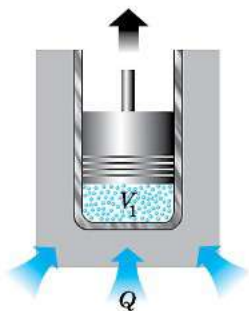
$$Q = A.$$

Температура газа может оставаться постоянной при подведении к нему определённого количества теплоты, если газ будет совершать работу при его расширении.

При изотермическом расширении газа, находящегося в цилиндре под поршнем, молекулы газа, сталкиваясь с поршнем, уменьшают свою ско-



**152** ►  
Изохорный процесс  
( $V = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):  
 $A = 0$



### 153

*Изотермический процесс*

$(T = \text{const}, m = \text{const}):$   
 $\Delta U = 0$

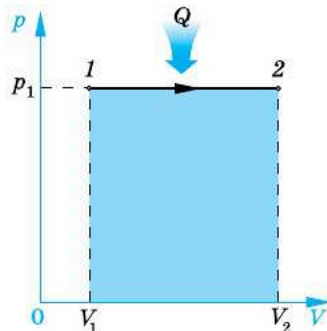
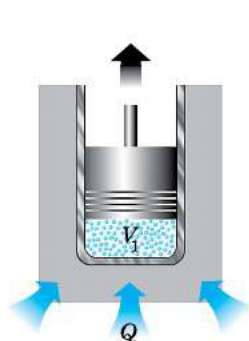
рость и соответственно среднюю кинетическую энергию (см. рис. 141), поэтому для поддержания температуры газа постоянной к нему подводится дополнительное количество теплоты (рис. 153).

При изотермическом сжатии газа ( $A < 0$ ) для сохранения температуры постоянной от газа отводится определённое количество теплоты ( $Q < 0$ ).

При изобарном расширении газа подведённое к нему количество теплоты расходуется на увеличение его внутренней энергии ( $\Delta U > 0$ ) и на совершение работы газом ( $A > 0$ ) (рис. 154):

$$Q = \Delta U + A.$$

Для изобарного расширения газа от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$ , при котором увеличивается его температура, требуется большее количество теплоты, чем при изотермическом процессе, где температура газа не изменяется.



### 154

*Изобарный процесс*  
 $(p = \text{const}, m = \text{const}):$   
 $\Delta U > 0$



## В О П Р О С Ы

1. На что расходуется, согласно первому закону термодинамики, количество теплоты, подведённое к системе?
2. Сформулируйте первый закон термодинамики для изохорного процесса.
3. Запишите первый закон термодинамики для изотермического процесса.
4. Сформулируйте первый закон термодинамики для изобарного процесса.
5. Почему при изобарном расширении газа от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$  требуется большее количество теплоты, чем при изотермическом процессе?

## З А Д А Ч И

1. При подведении к идеальному газу количества теплоты 125 кДж газ совершает работу 50 кДж над внешними телами. Чему равна конечная внутренняя энергия газа, если его энергия до подведения количества теплоты была равна 220 кДж?
2. Гелий массой 4 г находится в закрытом сосуде под давлением 0,1 МПа при температуре 17 °С. После нагревания давление в сосуде увеличилось в 2 раза. Найдите: 1) объём сосуда; 2) температуру, до которой нагрели газ; 3) количество теплоты, сообщённое газу.
3. Какое количество теплоты было подведено к гелию, если работа, совершаемая газом при изобарном расширении, составляет 2 кДж? Чему равно изменение внутренней энергии гелия?

## § 50. Тепловые двигатели

**Работа, совершаемая двигателем.** В современных тепловых машинах и механизмах механическая работа совершается в основном за счёт внутренней энергии веществ. Примером такого механизма может служить *тепловой двигатель*.

**Тепловой двигатель — устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.**

Механическая работа в двигателе совершается при расширении рабочего вещества, перемещающего поршень в цилиндре. Для циклической, непрерывной работы двигателя необходимо возвращать поршень в первоначальное положение, т. е. сжимать рабочее тело (вещество). Легко сжимаемым является вещество в газообразном состоянии, поэтому в качестве рабочего вещества в тепловых двигателях используется газ или



пар. В процессе работы теплового двигателя периодически повторяются процессы расширения и сжатия газа. Сжатие газа не может быть самопроизвольным, оно происходит только под действием внешней силы, например за счёт энергии, запасённой маховиком двигателя при расширении газа.

Полная механическая работа  $A$  складывается из работы расширения газа  $A_{\text{расш}}$  и работы  $A_{\text{сж}}$ , совершаемой силами давления газа при его сжатии. Так как при сжатии  $\Delta V < 0$ , то  $A_{\text{сж}} = -|A_{\text{сж}}| < 0$ , поэтому

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}|.$$

Для получения положительной полной механической работы ( $A > 0$ ) необходимо, чтобы работа сжатия газа была меньше работы расширения. С учётом формулы (119) получим

$$A = (p_{\text{расш}} - p_{\text{сж}}) \Delta V.$$

Изменение объёма  $\Delta V$  газа при расширении и сжатии одинаково из-за цикличности работы двигателя.

Следовательно, давление газа при сжатии должно быть меньше его давления при расширении. При одном и том же объёме давление газа тем меньше, чем ниже его температура, поэтому перед сжатием газ должен быть охлаждён, т. е. приведён в контакт с холодильником — телом, имеющим более низкую температуру. Для получения механической работы в тепловом двигателе при циклическом процессе расширение газа должно происходить при более высокой температуре, чем сжатие.

*Необходимое условие для циклического совершения механической работы в тепловом двигателе — наличие нагревателя и холодильника.*

**КПД замкнутого цикла.** Для непрерывного совершения механической работы термодинамический цикл должен быть замкнутым.

**Замкнутый процесс (цикл) — совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние.**

Замкнутые (круговые) процессы используются при работе всех тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, холодильных машин. Для оценки эффективности преобразования внутренней энергии газа в механическую работу, совершаемую за цикл, вводится *коэффициент полезного действия*.

**Коэффициент полезного действия теплового двигателя (КПД) — отношение работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:**

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (122)$$

В циклическом тепловом двигателе нельзя преобразовать в механическую работу всё количество теплоты  $Q_1$  ( $Q_1 > 0$ ), получаемое от нагревателя. Некоторое количество теплоты  $|Q_2|$  ( $Q_2 = -|Q_2| < 0$ ) отдаётся холодильнику, поэтому работа, совершаемая двигателем за цикл, не может быть больше

$$A = Q_1 - |Q_2|.$$

Учитывая полученное равенство, формулу для определения КПД можно записать в виде

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (123)$$

*Коэффициент полезного действия теплового двигателя всегда меньше единицы.*

Для повышения КПД теплового двигателя следует понижать температуру холодильника и увеличивать температуру нагревателя.

В таблице 15 даны реальные КПД различных тепловых двигателей.

**Таблица 15**

**КПД тепловых двигателей**

Двигатель	КПД, %	Двигатель	КПД, %
Первые паровые машины	1	Газовая турбина	36
Паровоз	8	Паровая турбина	35—46
Карбюраторный двигатель	20—30	Ракетный двигатель на жидком топливе	47

**Тепловые двигатели и охрана окружающей среды.** Тепловые двигатели — необходимый атрибут современной цивилизации. С их помощью вырабатывается около 80% электроэнергии. Без тепловых двигателей невозможно представить современный транспорт. В то же время повсе-



местное использование тепловых двигателей связано с отрицательным воздействием на окружающую среду.

Сжигание топлива сопровождается выделением в атмосферу углекислого газа, способного поглощать тепловое инфракрасное (ИК) излучение поверхности Земли. Рост концентрации углекислого газа в атмосфере, увеличивая поглощение ИК-излучения, приводит к повышению её температуры (*парниковый эффект*). Ежегодно температура атмосферы Земли повышается на 0,05 °С. Этот эффект может привести к таянию ледников и катастрофическому повышению уровня Мирового океана.

Продукты сгорания топлива существенно загрязняют окружающую среду. Углеводороды, вступая в реакцию с озоном, находящимся в атмосфере, образуют химические соединения, неблагоприятно воздействующие на жизнедеятельность растений, животных и человека. Потребление кислорода при горении топлива уменьшает его содержание в атмосфере.

Для охраны окружающей среды широко используют очистные сооружения, препятствующие выбросу в атмосферу вредных веществ, резко ограничивают использование соединений тяжёлых металлов, добавляемых в топливо, разрабатывают двигатели, в которых в качестве горючего используется водород (выхлопные газы в этом случае состоят из безвредных паров воды), создают электромобили и автомобили, работающие на солнечной энергии.

Всё большее внимание учёных привлекает перспектива использования возобновляемых источников энергии, экологически чистых, безвредных для окружающей среды, таких как энергия ветра, морских приливов и отливов, солнечная энергия и т. п.

### В О П Р О С Ы

1. Какие устройства относят к тепловым двигателям?
2. Почему в качестве рабочего тела в тепловых двигателях используют газы и пары?
3. Почему наличие нагревателя и холодильника является необходимым условием для циклического совершения полезной механической работы в тепловом двигателе?
4. Как определяют КПД замкнутого цикла?
5. В чём состоит отрицательное воздействие тепловых двигателей на окружающую среду? Какие методы защиты окружающей среды используют в настоящее время?

## § 51. Второй закон термодинамики

**Направленность тепловых процессов.** Первый закон термодинамики является законом сохранения энергии для тепловых процессов. Однако он не определяет направление этих процессов. Достаточно часто процес-

сы, допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, не могут быть реализованы в действительности.

**Обратимый процесс — процесс, который может происходить как в прямом, так и в обратном направлении.**

Обратимый процесс является идеализацией реального процесса. Обратимыми можно считать медленные (квазистатические) процессы.

Макроскопические процессы, в которых участвует большое число частиц ( $N \gg 1$ ), протекают в определённом направлении. В обратном направлении самопроизвольно (без воздействия внешних тел) они протекать не могут.

**Необратимый процесс — процесс, обратный которому самопроизвольно не происходит.**

Например, процесс теплообмена необратим. Количество теплоты самопроизвольно передаётся от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой. Теплопередача от холодного тела к более нагретому самопроизвольно не возникает, а достигается лишь за счёт дополнительной работы холодильной установки.

**Диффузия.** Примером необратимого процесса также является диффузия.

**Диффузия — физическое явление, при котором происходит самопроизвольное взаимное проникновение частиц одного вещества в другое при их контакте.**

Например, молекулы чернил, проникая между молекулами воды, равномерно распределяются по всему объёму, окрашивая воду в сосуде (рис. 155). Обратная локализация чернил на поверхности воды невозможна.

Диффундировать могут и атомы твёрдых тел. Поэтому трудно бывает отвинтить от болта гайку, туго завинченную в течение длительного времени, даже если они сделаны из нержавеющей стали.

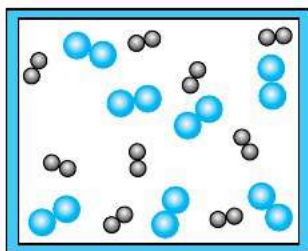
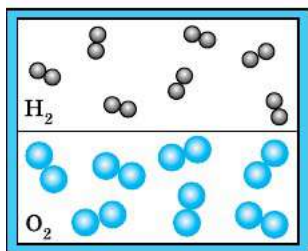
**Статистическое истолкование второго закона термодинамики.** Второй закон термодинамики отражает необратимость процессов в природе.





◀ 155

Диффузия чернил  
и воды



◀ 156

При диффузии газы  
смешиваются, равно-  
мерно распределяясь  
по объёму сосуда

### Второй закон термодинамики

**В циклически действующем тепловом двигателе невозможно преобразовать всё количество теплоты, полученное от нагревателя, в механическую работу.**

Второй закон термодинамики, определяющий направление перехода большого числа частиц, входящих в состав изолированной системы из одного микросостояния в другое, допускает статистическое истолкование.

*Замкнутая система многих частиц самопроизвольно переходит из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное.*

*Другими словами, изолированная система самопроизвольно переходит из менее вероятного состояния в более вероятное.*

Например, взаимная диффузия водорода и кислорода, находящихся до открывания перегородки в разных половинах сосуда, приводит к перемешиванию газов (рис. 156).

### В О П Р О С Ы

1. Выделите главный отличительный признак необратимого процесса.
2. Сформулируйте второй закон термодинамики.
3. Как второй закон термодинамики связан с необратимостью тепловых процессов?
4. В чём заключается статистическая интерпретация второго закона термодинамики?
5. Почему дым «тает» в воздухе?



### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Найдите КПД теплового двигателя, работающего по круговому циклу, состоящему из двух изобар (при давлениях  $p_0$  и  $0,5p_0$ ) и двух изохор (объёмы  $V_0$  и  $2V_0$ ) (рис. 157). Рабочим телом является одноатомный идеальный газ — гелий.

**Решение.**

КПД теплового двигателя — отношение работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}.$$

Работа  $A$  складывается из работ, совершаемых на участках  $1-2$ ,  $2-3$ ,  $3-4$  и  $4-1$ :

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41},$$

где  $A_{12} = p_0(2V_0 - V_0) = p_0V_0$ ;  $A_{23} = 0$ ;

$$A_{34} = 0,5p_0(V_0 - 2V_0) = -0,5p_0V_0; \quad A_{41} = 0.$$

Следовательно,

$$A = 0,5p_0V_0.$$

(Для контроля! Площадь внутри цикла равна работе  $A$ .)

Количество теплоты  $Q_1$  получает газ от нагревателя на участках  $1-2$  и  $4-1$ , т. е.

$$Q_1 = Q_{12} + Q_{41}.$$

Для изобарного процесса  $1-2$  первый закон термодинамики имеет вид:

$$Q_{12} = A_{12} + \Delta U_{12} = p_0V_0 + \left( \frac{3}{2}p_0 \cdot 2V_0 - \frac{3}{2}p_0V_0 \right) = \frac{5}{2}p_0V_0.$$

Для изохорного процесса  $4-1$ :

$$Q_{41} = \Delta U_{41} = \frac{3}{2}p_0V_0 - \frac{3}{2}(0,5p_0V_0) = \frac{3}{4}p_0V_0.$$

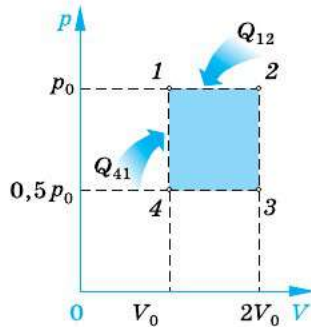
Тогда

$$Q_1 = \frac{5}{2}p_0V_0 + \frac{3}{4}p_0V_0 = \frac{13}{4}p_0V_0.$$

Следовательно, КПД рассматриваемого цикла

$$\eta = \frac{2}{13}.$$

**Ответ:**  $\eta = \frac{2}{13}$ .



**▲ 157**  
Круговой цикл

## ТВОРЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Какие факторы и условия способствовали переходу от применения механической энергии к использованию внутренней энергии? Ответ представьте в виде схемы.
2. Подготовьте дискуссию «Тепловые двигатели: эволюция или революция».
3. Каковы экологические требования к топливу для автотранспорта? Различаются ли эти требования для разных стран?
4. Выпишите встречающиеся в физической литературе определения второго начала термодинамики. Почему существует несколько формулировок данного закона? Какой смысл приобретает этот закон для описания живых систем?

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**Внутренняя энергия тела** — сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов или молекул) тела и потенциальной энергии их взаимодействия.

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Изменение внутренней энергии возможно в результате теплообмена, а также при совершении работы. Внутренняя энергия замкнутой теплоизолированной системы сохраняется.

**Теплообмен** — процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы.

**Количество теплоты** — энергия, получаемая или отдаваемая телом в процессе теплообмена.

**Работа, совершаемая газом,**

$$A = \bar{p}\Delta V,$$

где  $\Delta V = V_2 - V_1$  — изменение объёма газа.

При расширении газа  $\Delta V > 0$ , при его сжатии  $\Delta V < 0$ .

**Первый закон термодинамики:** количество теплоты, подведённое к системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A.$$

Первый закон термодинамики:

1) при изохорном процессе:

$$Q = \Delta U;$$

2) при изотермическом процессе:

$$Q = A;$$

3) при изобарном процессе:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

**Тепловой двигатель** — устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Наличие нагревателя и холодильника — необходимое условие для циклического совершения механической работы в тепловом двигателе.

**Замкнутый процесс (цикл)** — совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние.

■ **Коэффициент полезного действия теплового двигателя** — отношение работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}.$$

КПД теплового двигателя всегда меньше единицы. Использование тепловых двигателей неблагоприятно влияет на окружающую среду.





### § 52. Распространение волн в упругой среде

**Волновой процесс.** Основной физической моделью вещества является совокупность движущихся и взаимодействующих между собой атомов и молекул. Использование этой модели позволяет объяснить с помощью молекулярно-кинетической теории не только свойства различных агрегатных состояний вещества, но и физический механизм переноса энергии и импульса в среде. При этом под средой следует понимать либо вещество, либо поле (например, электромагнитное). В данной главе мы ограничимся изучением переноса энергии и импульса в среде (твёрдом теле, жидкости, газе).

Существует два фундаментальных способа передачи энергии и импульса в пространстве:

- *непосредственное перемещение частиц из одной точки в другую;*
- *перенос энергии без переноса вещества в результате последовательной передачи энергии и импульса по цепочке между соседними взаимодействующими друг с другом частицами среды.*

При этом перемещение отдельных частиц оказывается существенно меньшим, чем расстояние между точками пространства.

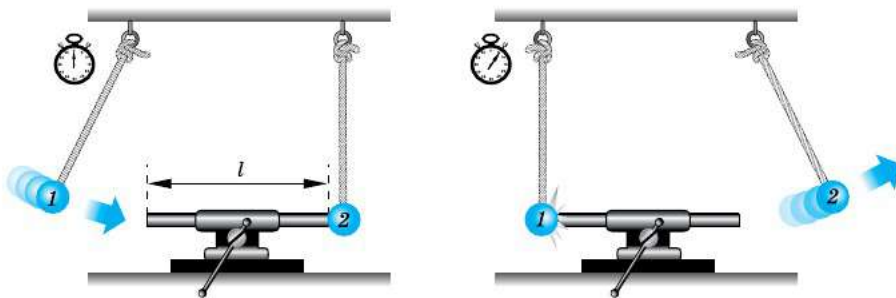
Рассмотрим более подробно второй способ, называемый *волновым процессом*.

**Волновой процесс — процесс переноса энергии без переноса вещества.**

В результате внешнего воздействия на среду в ней возникает *возмущение* — отклонение частиц среды от положения равновесия.

**Механическая волна — возмущение, распространяющееся в упругой среде.**





▲ 158

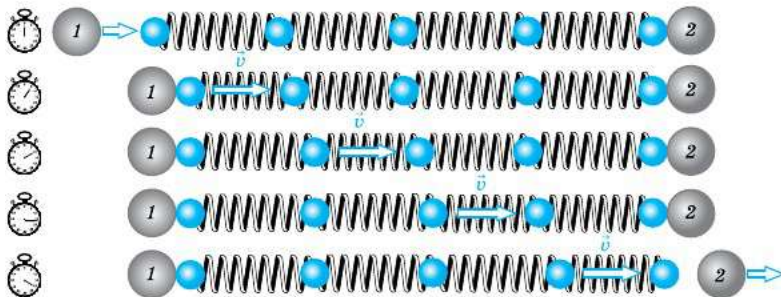
*Волновой процесс передачи энергии в твёрдом теле*

Наличие упругой среды — необходимое условие распространения механических волн.

Одни виды волн можно визуально наблюдать (морские волны, рябь на поверхности воды), другие виды волн (звуковые, электромагнитные, не относящиеся к диапазону видимого света) недоступны нашему зрению.

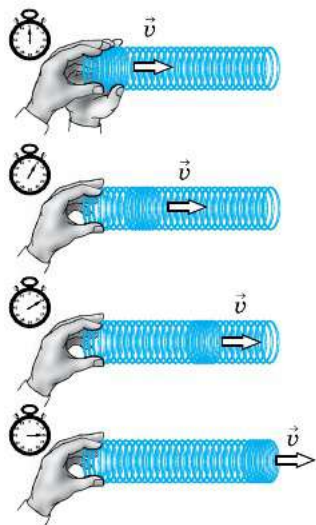
**Продольные волны.** Рассмотрим волновой процесс передачи энергии в стержне (рис. 158). Маятник 1, отклонённый от положения равновесия на некоторый угол, начинает двигаться к положению равновесия. Маятник 2, прислонённый к неподвижному закреплённому стержню, отскакивает от него через некоторое время после удара о стержень маятника 1.

Для объяснения процесса обратимся к одномерной механической модели кристалла в виде шариков, связанных между собой пружинами (рис. 159). Воздействие маятника на один из атомов (левый шарик) приводит к изменению его положения: пружина, соединяющая его с соседним шариком, сжимается. Изменение потенциальной энергии взаимо-



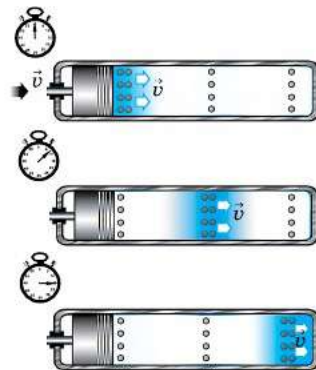
◀ 159

*Возникновение и распространение продольной волны в твёрдом теле*



### ▲ 160

*Продольная механическая волна в пружине*



### ▲ 161

*Возникновение и распространение продольной механической волны в газе*

действия соседних атомов приводит к перемещению следующего атома (сжатию соседней пружины). Таким образом, внешнее воздействие в виде сжатия распространяется со скоростью  $v$  от атома к атому вдоль стержня.

*Скорость механической волны — скорость распространения возмущения в среде.*

Энергия взаимодействия крайних атомов правого конца стержня длиной  $l$  передаётся маятнику 2 через промежуток времени  $t = l/v$  после удара маятника 1.

В рассматриваемом случае движение частиц среды происходит вдоль направления распространения волны, т. е. возникает *продольная волна*.

**Продольная механическая волна — волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны.**

Продольные волны могут распространяться в любой среде. Наглядным примером продольных механических волн в твёрдом теле является волна, возбуждённая в пружине (рис. 160).

Возможно возникновение и распространение продольной механической волны в газе (рис. 161).

Сжатие газа поршнем изменяет компоненту скорости  $v$  молекул, направленную вдоль хода поршня. При последующих упругих столкновениях молекул одинаковой массы движущиеся молекулы останавливаются, а покоящиеся приобретают скорость  $\vec{v}$  в направлении удара (подобно бильярдным шарам). Продольные волны могут возникать и в жидкости.

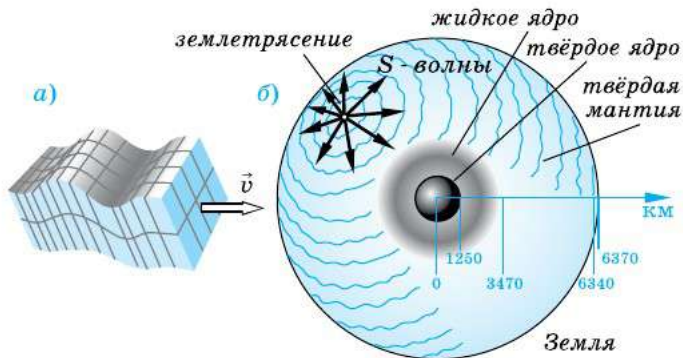
**Поперечные волны.** В твёрдом теле из-за сильной связи частиц между собой (большая потенциальная энергия их взаимодействия) могут возникать *поперечные волны*.





## 164

**Распространение поперечных сейсмических волн:**  
 а — поперечные волны в мантии;  
 б — огибание поперечными волнами жидкого ядра Земли



оказываются недостаточными. Возвращение шарика 1 в первоначальное положение под действием внешней силы в момент времени  $\tau$  приведёт в движение шарик 4 и связанные с ним шарики 5, 6. Шарик 4 двигается вверх, так как соседний с ним шарик 3 идёт вниз, а пружина между ними, сохраняя первоначальное положение, «подбрасывает» вверх шарик 4. В момент времени  $3\tau/2$  роль шарика 1 перейдёт к шарика 4, а в движение придёт следующая тройка: 7, 8, 9.

Таким образом, первоначальное возмущение в направлении оси  $Y$  начинает распространяться в виде поперечной волны по оси  $X$ .

Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают из-за отсутствия упругости формы.

Так, из-за наличия у Земли жидкого ядра поперечные сейсмические  $S$ -волны, имеющие скорость около 8 км/с, не фиксируются на стороне Земли, диаметрально противоположной месту землетрясения (рис. 164).

При землетрясениях возникают как поперечные, так и продольные волны, распространяющиеся с различной скоростью. По разности этих скоростей на сейсмических станциях определяют локализацию эпицентра землетрясения.

### В О П Р О С Ы

1. Назовите два фундаментальных способа передачи энергии и импульса в пространстве.
2. Какова главная особенность волнового процесса?
3. В чём заключается необходимое условие распространения механических волн?
4. Объясните процесс возникновения и распространения продольной волны в твёрдом теле и газе.
5. Объясните процесс возникновения и распространения поперечной волны в твёрдом теле.

## § 53. Периодические волны

**Длина волны.** Ранее мы рассматривали механические волны, возникающие и распространяющиеся в веществе при однократном внешнем воздействии. *Периодическое внешнее воздействие вызывает периодические волны в упругой среде.*

При гармонических колебаниях физическая величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально) с определённым периодом  $T$  (частотой  $\nu$ ).

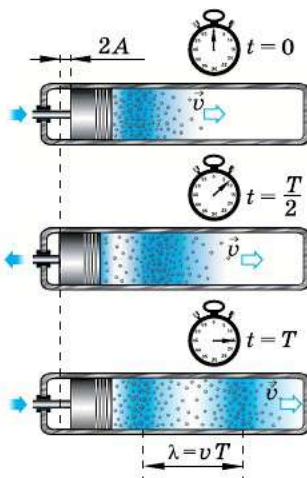
**Гармоническая волна — волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды.**

Возникновение периодических продольных волн в цилиндре, наполненном газом, возможно в результате гармонического движения поршня с амплитудой  $A$  и периодом  $T$  (рис. 165). При сжатии газа ( $t = 0$ ) его давление вблизи поршня (и соответственно концентрация молекул) возрастает. Когда поршень смещается в крайнее левое положение ( $t = T/2$ ), пройдя расстояние  $2A$ , газ расширяется, а его давление вблизи поршня уменьшается. Возникает волна разрежения. Возвращение поршня в крайнее правое положение вновь создаёт волну сжатия. *Расстояние между соседними областями наибольшего сжатия определяет длину волны.* Вообще говоря, наибольшее сжатие в данном примере характеризует лишь определённую фазу колебания: максимальное отклонение поршня от среднего положения.

**Длина волны — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний её источника:**

$$\lambda = \nu T.$$

Гармонические волны на поверхности жидкости могут возникать, например, при падении в жидкость капле через равные интервалы времени (рис. 166, а) или при периодических колебаниях какого-либо участка её поверхности (рис. 166, б). Области сжатия соответствуют *гребням волн*, области разрежения — *впадинам*.



### ▲ 165

*Продольные гармонические волны сжатия и разрежения в газе*

## 166 ▶

Гармонические волны на поверхности жидкости:

*а* — при падении капля через равные промежутки времени;  
*б* — при периодических колебаниях участка поверхности

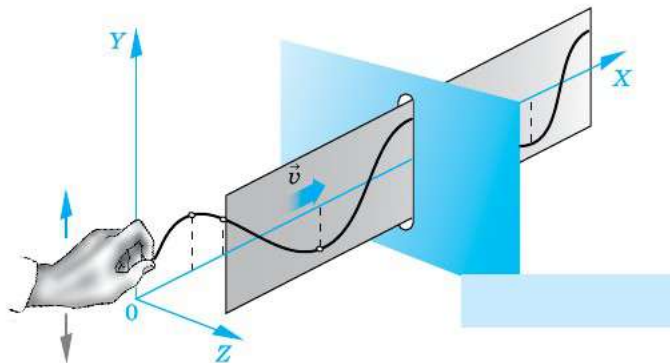


Это объясняется тем, что при сжатии жидкости (например, при сближении боковых стенок сосуда) её уровень повышается, так как жидкость практически несжимаема. Наоборот, при удалении друг от друга боковых стенок сосуда уровень жидкости уменьшается.

**Поляризация.** Колебания частиц среды могут происходить либо в произвольных направлениях, либо во вполне определённых. Волны, возникающие в результате этих колебаний, распространяются в соответствующих направлениях. В случае упорядоченных колебаний частиц возникает явление *поляризации*.

**Поляризация — пространственная упорядоченность направления колебаний частиц среды в поперечной волне.**

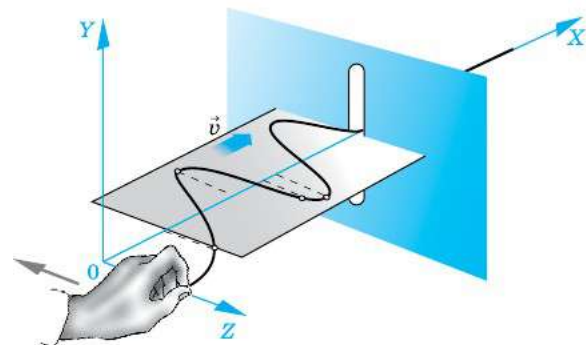
Для создания гармонических поперечных волн в горизонтальном шнуре достаточно периодически перемещать его конец, например, вверх и вниз. В этом случае колебания частиц шнура распространяются вдоль оси  $X$  в плоскости  $XY$  (рис. 167), называемой *плоскостью поляризации*.



## 167 ▶

Прохождение через поляризатор (щель) гармонической поперечной механической волны, линейно-поляризованной в плоскости  $XY$





## ◀ 168

*Поляризатор (щель) — непреодолимое препятствие для проникновения гармонической поперечной механической волны, линейно-поляризованной в плоскости  $XZ$*

**Плоскость поляризации** — плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне.

Рассмотренная волна является *линейно-поляризованной*.

**Линейно-поляризованная механическая волна** — поперечная волна, вызывающая колебания частиц среды вдоль определённого направления (линии).

Для выделения волны определённой поляризации используют специальное устройство — *поляризатор*. Простейшим поляризатором является щель. Такой поляризатор не пропускает волну, поляризованную в перпендикулярной щели плоскости  $XZ$  (рис. 168).

Явление поляризации присуще и световым волнам. Световые волны поперечны. Это значит, что электромагнитные колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света. Солнечные очки из поляризованного стекла пропускают, например, лишь вертикальные колебания. Поэтому яркость света, падающего в глаз, уменьшается.

## В О П Р О С Ы

1. Какую волну называют гармонической?
2. Объясните возникновение сжатия и разрежения в продольных гармонических волнах.
3. Что такое длина волны? По какой формуле её вычисляют?
4. В чём суть явления поляризации? Как определяется плоскость поляризации?
5. Какое устройство называют поляризатором? Приведите пример поляризатора.

## З А Д А Ч И

1. Длина продольной волны, распространяющейся в воде со скоростью 1498 м/с, равна 3,4 м. Определите частоту источника, вызывающего эту волну.
2. Чему равна скорость звука в граните, если колебания с периодом 0,5 мс вызывают звуковую волну, длина которой 3 м?
3. Колебания, происходящие с частотой  $\nu$ , имеют в первой среде длину волны  $\lambda$ , а во второй —  $2\lambda$ . Определите отношение скоростей распространения волн в первой и второй средах.

## § 54. Звуковые волны

**Возникновение и восприятие звуковых волн.** Звуки, воспринимаемые ухом человека, являются одним из важнейших источников информации об окружающем мире. Шум моря и ветра, пение птиц, голоса людей и крики животных, раскаты грома, звуки движущихся машин, воспринимаемые ухом человека, позволяют легче адаптироваться в изменяющихся внешних условиях.

Звук, в широком смысле, — колебательное движение частиц упругой среды, распространяющееся в виде волн.

**Звуковые волны — упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.**

Слуховые ощущения у человека вызывают волны с частотой колебаний, лежащей в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

Необходимое условие распространения звуковых волн — *наличие упругой среды*. В вакууме звуковые волны не распространяются, так как там нет частиц, передающих взаимодействие от источника колебаний.

Рассмотрим процесс возникновения и восприятия звуковых волн. Колебания источника звука (например, струны или голосовых связок) вызывают в воздухе волны сжатия и разрежения (рис. 169). Достигнув уха человека, звуковые волны заставляют барабанную перепонку совершать вынужденные колебания с частотой, равной частоте колебаний источ-

### 169 ▶

*Возникновение и восприятие звуковых волн. Звуковые волны могут распространяться только в материальной среде*



ника. Свыше 20 000 нитевидных рецепторных окончаний, находящихся во внутреннем ухе, преобразуют механические колебания в электрические импульсы. При передаче импульсов по нервным волокнам в головной мозг у человека возникают определённые слуховые ощущения.

**Высота звука.** Слуховые ощущения человека определяются физическими параметрами звуковой волны, воздействующей на орган слуха. Одной из важнейших характеристик воспринимаемого звука является *высота*. Выясним, какая физическая величина определяет эту характеристику звука.

*Высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний. Чем больше частота колебаний, тем выше звук. Колебаниям малых частот соответствуют низкие звуки.*

Например, звук, который мы слышим при полёте комара, соответствует 500—600 взмахам его крыльев в секунду, жужжание шмеля — 220 взмахам.

Колебания голосовых связок певцов могут создавать звуки в диапазоне от 80 до 1400 Гц (табл. 16) (хотя в эксперименте фиксировались рекордно низкая (44 Гц) и высокая (2350 Гц) частоты).

**Таблица 16**

**Диапазон частот, соответствующий голосу певца**

Голос	Частота, Гц
Бас	80—400
Баритон	110—400
Тенор	150—500
Контральто	200—700
Колоратурное сопрано	250—1400

В телефоне для воспроизведения речи человека используется область частот от 300 до 2000 Гц.

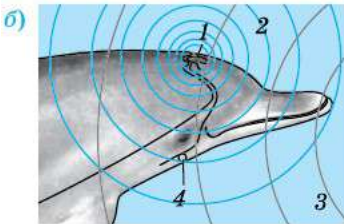
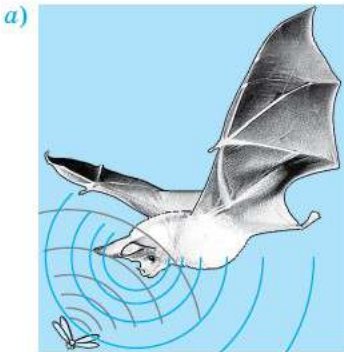
На рисунке 170 приведён диапазон частот колебаний некоторых струнных инструментов.

Изучению звука посвящена специальная область физики — *акустика*.

Опыт показывает, что чем меньше размер источника, вызывающего колебания, тем выше их частота. Так, *инфразвуковые волны*, имеющие малую частоту ( $\nu < 16$  Гц), вызываются источниками, размеры которых превышают расстояния, характерные для повседневного опыта челове-







### 171

*Ультразвуковая локация как способ ориентации в пространстве и поиска пищи в условиях слабой освещённости:*

*а — при крике летучей мыши генерируется ультразвуковая волна с частотой 100 кГц; б — частота ультразвукового сигнала, испускаемого дельфином (порядка 1 МГц), позволяет обнаруживать дробинку диаметром 4 мм на расстоянии 30 м.*

*1 — источник звука;  
2 — испускаемый сигнал;  
3 — отражённая волна;  
4 — внутреннее ухо*

Скорость звука в воздухе впервые была измерена в 1708 г. английским естествоиспытателем **Уильямом Деремом**. Стоя на крыше Апминстерской церкви в Эссексе, он наблюдал вспышку пороха в пушках в 19 км от церкви и измерял время, прошедшее между вспышкой и звуком выстрела.

В воздухе при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $v_r = 343\text{ м/с} = 1235\text{ км/ч}$ .

*Скорость звука тем больше, чем больше потенциальная энергия взаимодействия молекул вещества, поэтому скорость звука в твёрдом теле  $v_{т.т}$ , как правило, больше скорости звука в жидкости  $v_{ж}$ , которая, в свою очередь, превышает скорость звука в газе  $v_r$ :  $v_{т.т} > v_{ж} > v_r$ .*

Например, в морской воде при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  скорость звука  $v_{ж} = 1513\text{ м/с}$ . В стали, где могут распространяться как поперечные, так и продольные волны, скорость их распространения различна. Поперечные волны распространяются со скоростью 3300 м/с, а продольные — со скоростью 5900 м/с.

### В О П Р О С Ы

1. Какие волны называют звуковыми?
2. Опишите процесс возникновения и восприятия звуковых волн.
3. Охарактеризуйте частотный диапазон инфразвуковых, звуковых и ультразвуковых волн.

- Укажите примерные размеры источников, генерирующих инфразвуковые, звуковые и ультразвуковые волны.
- Что можно сказать о соотношении скорости звука в твёрдом теле, жидкости и газе?

### З А Д А Ч И

- Принимая скорость звука в воздухе при 20 °С равной 343 м/с, найдите диапазон длин волн, вызывающих у человека слуховые ощущения.
- Определите длину волны сигналов, испускаемых летучими мышами и дельфинами.
- Звук выстрела и пули, вылетающая из винтовки вертикально, одновременно достигают высоты 686 м. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найдите начальную скорость пули.

## § 55. Эффект Доплера

**Зависимость высоты звука от скорости движения источника.** Как отмечалось ранее, высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний. Однако сигнал одной и той же частоты может восприниматься наблюдателем по-разному в зависимости от того, движутся источник сигнала и наблюдатель относительно друг друга или нет. Например, звук сирены приближающегося автомобиля кажется наблюдателю более высоким, чем удаляющегося от него. Впервые подобный эффект был предсказан в 1842 г. австрийским физиком *Кристианом Доплером*.

**Эффект Доплера — зависимость частоты сигнала, фиксируемого приёмником, от скорости движения источника сигнала и приёмника.**

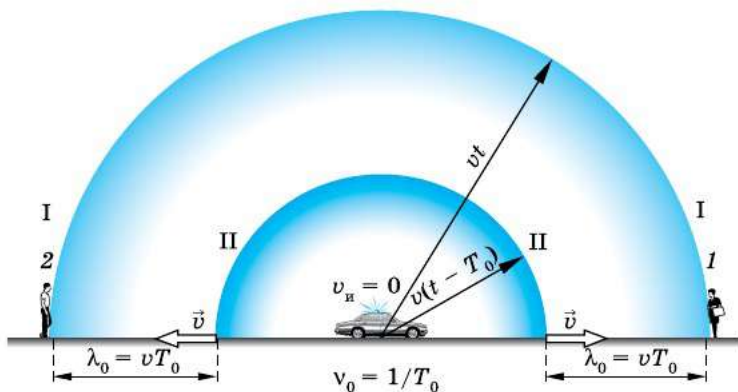
Рассмотрим, как частота сигнала, воспринимаемого неподвижным наблюдателем, зависит от скорости движения источника. В отсутствие движения источника сигнала частотой  $\nu_0$  неподвижные наблюдатели *I* и *2* (рис. 172, *a*) воспринимают сигнал с частотой  $\nu_0$  (длиной волны  $\lambda_0$ ). Волна сжатия *I*, распространяющаяся от неподвижного источника, попадает к наблюдателям через время  $t$ . Ближайшая к ней волна сжатия *II* дойдёт до наблюдателей позднее на время  $T_0$  — период колебаний, генерируемых источником звуковых волн.

Оба наблюдателя будут воспринимать частоту сигнала, равную частоте источника

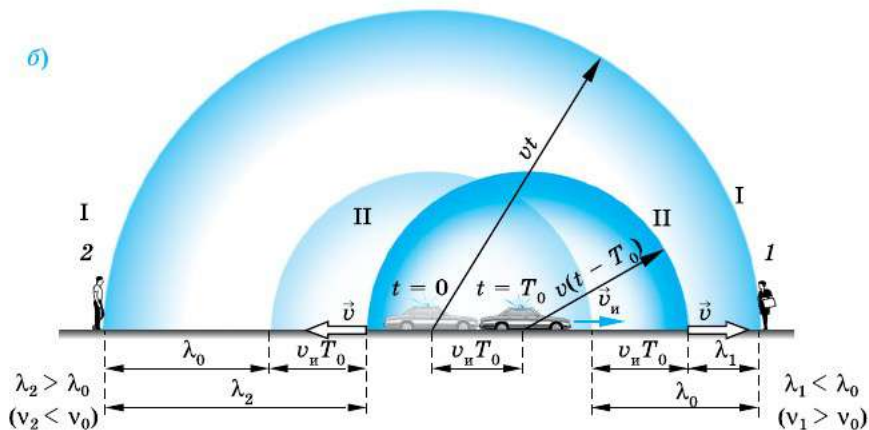
$$\nu_0 = \frac{1}{T_0}.$$



а)



б)



## ▲ 172

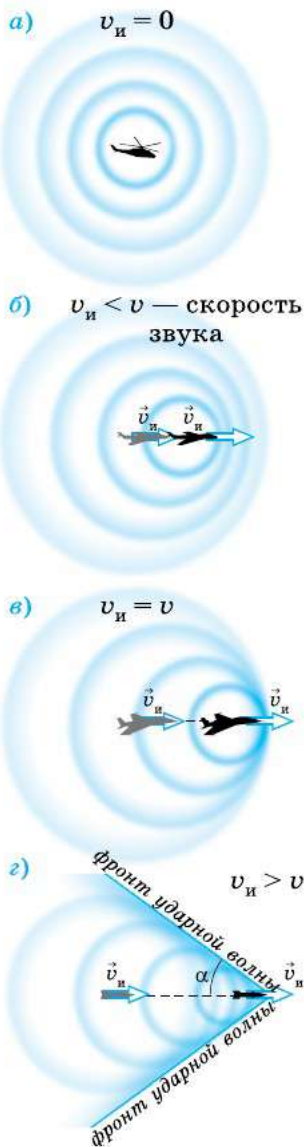
Зависимость высоты звука, воспринимаемой наблюдателем, от скорости движения источника сигнала:

а — неподвижный источник: для наблюдателей 1 и 2 воспринимаемые частоты сигнала совпадают с частотой  $\nu_0$  сигнала источника;

б — движущийся источник: для наблюдателя 1 воспринимаемая частота  $\nu_1$  звука выше частоты  $\nu_0$  сигнала источника, для наблюдателя 2 воспринимаемая частота  $\nu_2$  ниже частоты  $\nu_0$  сигнала источника

Соответственно расстояние между ближайшими волнами сжатия  $\lambda_0 = vT_0$ , где  $v$  — скорость звука.

Предположим теперь, что источник движется со скоростью  $v_n$  в направлении наблюдателя 1 (рис. 172, б). Тогда расстояние между ближай-



шими волнами сжатия в этом направлении — длина волны

$$\lambda_1 = \lambda_0 - v_{\text{и}} T_0,$$

где  $v_{\text{и}} T_0$  — расстояние, на которое сместился источник в момент излучения волны II.

Волна II дойдёт до наблюдателя 1 за время

$$T_1 = \frac{\lambda_1}{v} = T_0 \left( 1 - \frac{v_{\text{и}}}{v} \right), \quad (124)$$

а до наблюдателя 2 — за время

$$T_2 = \frac{\lambda_2}{v} = T_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{и}}}{v} \right). \quad (125)$$

При получении формулы (125) мы учли, что

$$\lambda_2 = \lambda_0 + v_{\text{и}} T_0.$$

Частота сигнала источника, воспринимаемая наблюдателями 1 и 2, как следует из формул (124), (125), определяется следующим образом:

$$\nu_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{\nu_0}{1 - \frac{v_{\text{и}}}{v}}, \quad (126)$$

$$\nu_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{\nu_0}{1 + \frac{v_{\text{и}}}{v}}. \quad (127)$$

Это означает, что  $\nu_1 > \nu_0$ , а  $\nu_2 < \nu_0$ . Наблюдатель 1, к которому приближается источник сигнала частоты  $\nu_0$ , слышит звук более высокой частоты  $\nu_1$ , чем частота излучения. Наблюдатель 2, от которого удаляется источник, слышит звук меньшей частоты  $\nu_2$ , чем частота  $\nu_0$  сигнала источника.

Формулы (126), (127) можно представить в виде одной

$$\nu_{1,2} = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v_{\text{и}}}{v}},$$

## ▲ 173

*Звуковые волны сжатия при различной скорости движения источника*

где знак «минус» соответствует случаю приближения источника к приёмнику, а знак «плюс» — случаю удаления источника от приёмника.

Если  $v_{\text{и}} \ll v$ , последнюю формулу можно представить в виде

$$v_{1,2} = v_0 \left( 1 \pm \frac{v_{\text{и}}}{v} \right), \quad (128)$$

умножив числитель и знаменатель на выражение  $1 \pm \frac{v_{\text{и}}}{v}$ . При этом с увеличением скорости источника частота сигнала увеличивается, при уменьшении скорости источника — уменьшается.

Соответственно

$$\lambda_{1,2} = \lambda_0 \left( 1 \mp \frac{v_{\text{и}}}{v} \right). \quad (129)$$

С увеличением скорости источника расстояние между ближайшими волнами сжатия в направлении движения уменьшается (рис. 173).

При  $v_{\text{и}} = v$  волны сжатия накладываются друг на друга, резко увеличивая результирующее сжатие. Возникает ударная волна (см. рис. 173). При  $v_{\text{и}} > v$  фронт ударной волны располагается под углом  $\alpha$  к направлению движения источника.

**«Красное смещение» спектральных линий.** Эффект Доплера наблюдается не только для звуковых, но и для электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве со скоростью света. При таких скоростях последовательное описание эффекта Доплера возможно лишь в рамках релятивистской механики. Однако при скорости источника излучения, много меньшей скорости света, результаты релятивистской механики должны совпадать с результатами классической. Поэтому в приближении  $v_{\text{и}} \ll c$  частота электромагнитных волн, фиксируемая приёмником, определяется по формуле (128).

Знак «плюс» в формуле (128) соответствует случаю сближения приёмника и источника, знак «минус» — их удалению друг от друга. Зная частоту  $v_0$  излучения неподвижного источника и измеряя частоту  $v_{1,2}$ , воспринимаемую приёмником, из формулы (128) можно оценить относительную скорость сближения (удаления) источника и приёмника.

С помощью эффекта Доплера определяют скорость движения отдалённых галактик. Фиксируемая частота электромагнитного излучения,



## ▲ 174

*Истребитель преодолевает звуковой барьер*



приходящего от таких галактик, оказывается меньше излучаемой частоты. В этом случае говорят о «красном смещении» частоты, так как красный свет имеет минимальную частоту в видимом человеком спектре. «Красное смещение» частоты означает, что галактики удаляются друг от друга. Чем больше сдвиг фиксируемой частоты, тем больше скорость галактики. Измерения показывают, что быстрее всего удаляются наиболее отдалённые от нас галактики. Эти наблюдения подтвердили гипотезу о расширении Вселенной в результате Большого взрыва, вызвавшего рождение Вселенной около 14 млрд лет тому назад.

### В О П Р О С Ы

1. Какой физический эффект называют эффектом Доплера?
2. Как зависит высота звука от скорости и направления движения источника звукового сигнала?
3. При какой скорости движения источника и почему возникает ударная волна?
4. Что такое «красное смещение» в спектре излучения галактик?
5. Как оценивается скорость движения источника электромагнитных волн?

### Т В О Р Ч Е С К И Е   З А Д А Н И Я

1. Приведите примеры продольных и поперечных волн, которые вы когда-либо наблюдали.
2. Существуют ли классификации музыкальных инструментов? Какие физические величины положены в основу этих классификаций?
3. Напишите эссе «Электронная музыка в моей жизни».
4. Какие заболевания слуховой системы человека могут возникнуть при различных акустических воздействиях?
5. Подготовьте доклад «Применение эффекта Доплера».

### О С Н О В Н Ы Е   П О Л О Ж Е Н И Я

- **Волновой процесс** — процесс переноса энергии без переноса вещества.
- **Механическая волна** — возмущение, распространяющееся в упругой среде. Перенос энергии и импульса в среде происходит в результате взаимодействия между соседними частицами среды.
- **Продольная механическая волна** — волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны. Продольные волны могут распространяться в любой среде.
- **Поперечная механическая волна** — волна, в которой частицы среды перемещаются перпендику-

лярно направлению распространения волны.

Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают из-за отсутствия упругости формы.

■ Периодическое внешнее воздействие вызывает периодические волны в упругой среде.

■ **Гармоническая волна** — волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды.

■ **Длина волны** — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний её источника:

$$\lambda = vT,$$

где  $v$  — скорость распространения волны.

■ **Скорость механической волны** — скорость распространения возмущения в среде.

■ **Поляризация** — пространственная упорядоченность направления колебаний частиц среды в поперечной волне.

■ **Плоскость поляризации** — плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне.

**Линейно-поляризованная механическая волна** — поперечная волна, вызывающая колебания частиц среды вдоль определённого направления (линии).

■ **Поляризатор** — устройство, выделяющее волну определённой поляризации.

■ **Звуковые волны** — упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.

Частота колебаний, соответствующих звуковым волнам, лежит в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

Скорость распространения звуковых волн определяется плотностью и упругими свойствами среды. Скорость звука в твёрдом теле  $v_{т.т}$ , как правило, больше скорости звука в жидкости  $v_{ж}$ , которая, в свою очередь, превышает скорость звука в газе  $v_{г}$ :

$$v_{т.т} > v_{ж} > v_{г}.$$

■ **Высота звука** определяется частотой источника звуковых колебаний.

Чем больше частота колебаний, тем выше звук; колебаниям малых частот соответствуют низкие звуки.

■ **Эффект Доплера** — зависимость частоты сигнала, фиксируемого приёмником, от скорости движения источника сигнала и приёмника.

■ Частота  $\nu$  звукового сигнала, фиксируемого приёмником, зависит от частоты  $\nu_0$  сигнала, генерируемого источником, скорости  $v_{и}$  источника и скорости  $v$  звука:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 \mp v_{и}/v}.$$

Знак «минус» соответствует приближению источника к приёмнику, знак «плюс» — удалению.

■ Частота  $\nu$  электромагнитных волн, фиксируемая приёмником, зависит от частоты  $\nu_0$  сигнала, генерируемого источником, скорости  $v_{и}$  источника и скорости  $c$  света ( $v_{и} \ll c$ ):

$$\nu = \nu_0(1 \pm v_{и}/c).$$

Знак «плюс» соответствует приближению источника к приёмнику, знак «минус» — удалению.



## Силы электромагнитного взаимодействия неподвижных зарядов

### § 56. Электрический заряд. Квантование заряда

**Электродинамика и электростатика.** Структура Вселенной формируется гравитационным притяжением тел. Однако наличие лишь сил притяжения привело бы к неограниченному гравитационному сжатию тел. Для существования тел стабильных размеров должны действовать силы отталкивания между частицами тела. Такими силами являются силы электромагнитного взаимодействия. Они могут вызывать как отталкивание частиц, так и их притяжение. Силы электромагнитного взаимодействия частиц тела на много порядков превосходят гравитационные силы, поэтому структура тел определяется электромагнитным взаимодействием.

Гравитационное притяжение испытывают все частицы, обладающие массой. Электромагнитное притяжение и отталкивание возникает лишь между заряженными частицами.

---

**Электродинамика изучает электромагнитное взаимодействие заряженных частиц.**

**Электростатика — раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных (статических) электрических зарядов.**

---

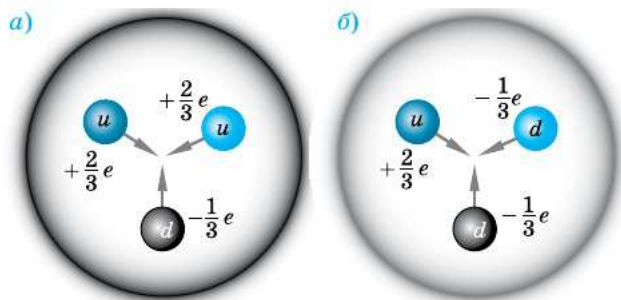
**Электрический заряд.** Способность частиц (или тел) к электромагнитному взаимодействию характеризует *электрический заряд*.

---

**Электрический заряд — физическая величина, определяющая силу электромагнитного взаимодействия.**

---





## 176 ▶

Кварковая модель  
протона и нейтрона:

*a* — протон;

*б* — нейтрон

Суммарный заряд тела кратен элементарному заряду.

*Электрический заряд дискретен (квантован).* Минимальное различие модулей любых зарядов равно  $e$ .

Согласно современной квантовой теории протон и нейтрон являются комбинацией других элементарных частиц — кварков *u* и *d* с зарядом  $+\frac{2}{3}e$  и  $-\frac{1}{3}e$  соответственно (рис. 176).

Кварки, как независимые частицы, в экспериментах не наблюдались. Однако даже если будет обнаружен заряд, в 3 раза меньший заряда электрона, то и это не нарушит принцип квантования заряда: изменится лишь значение минимального заряда.

Полный заряд электронейтрального атома равен нулю, так как число протонов в ядре равно числу электронов в атоме (рис. 177, *a*).

*Макроскопические тела, состоящие из нейтральных атомов, электронейтральны.*

Суммарный положительный заряд протонов всего тела уравновешивается отрицательным зарядом всех электронов. Чтобы зарядить тело, надо нарушить этот баланс. Нарушение этого баланса возможно при удалении электронов из электронных оболочек атомов и при присоединении электронов к электронным оболочкам. Например, при удалении одного элект-

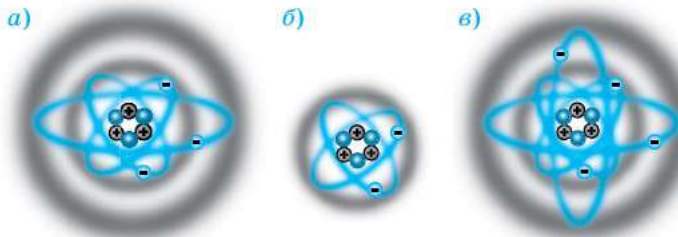
## 177 ▶

Планетарные  
модели атома  
и ионов лития:

*a* — атом  $\text{Li}$ ;

*б* — положительный  
ион  $\text{Li}^+$ ;

*в* — отрицательный  
ион  $\text{Li}^-$



рона с электронной оболочки атома Li образуется однозарядный положительный ион  $\text{Li}^+$  с суммарным зарядом  $(+e)$  (рис. 177, б). При присоединении дополнительного электрона на внешнюю электронную оболочку Li образуется однозарядный отрицательный ион  $\text{Li}^-$  с результирующим зарядом  $(-e)$  (рис. 177, в).

При удалении электронов (ионизации атомов) тело заряжается положительно. Например, тело, заряд которого  $q = +7e$ , отличается от нейтрального тела отсутствием семи электронов.

Зарядить тело отрицательно можно, добавив избыточные электроны. Обычно результирующей (избыточный) заряд тела много меньше полного заряда протонов и электронов в отдельности, так как удаётся ионизовать лишь незначительную часть атомов образца.

### В О П Р О С Ы

1. Какие силы определяют взаимодействие заряженных частиц?
2. Что характеризует электрический заряд?
3. Какой минимальный заряд известен в настоящее время?
4. Как квантуется электрический заряд?
5. Почему экспериментальное обнаружение кварков не нарушает принцип квантования заряда?

## § 57. Электризация тел.

### Закон сохранения электрического заряда

#### Электризация при соприкосновении (трении).

Первые наблюдения притяжения и отталкивания тел в результате взаимного трения отмечались ещё в VI в. до н. э. в Греции. После полировки янтарь притягивал кусочки бумаги, волосы, другие лёгкие предметы (рис. 178).

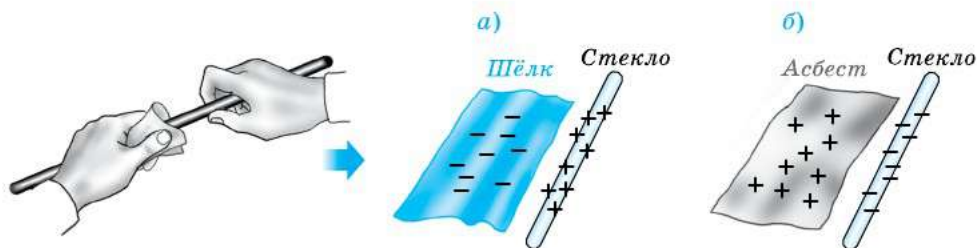
Взаимодействие тел в результате трения было названо *электрическим* (от греч. *elektron* — янтарь).

Степень электризации тел в результате взаимного трения характеризуется значением и знаком электрического заряда, полученного телом. Каучук, натёртый мехом, оказывается отрицательно заряженным, а стекло, потёртое о шёлк, положительно заряженным. При этом мех заряжается положительно, а шёлк — отрицательно.



#### ▲ 178

*Электрическое действие натёртого янтаря*



## ▲ 179

*Электризация трением (эксперимент)*

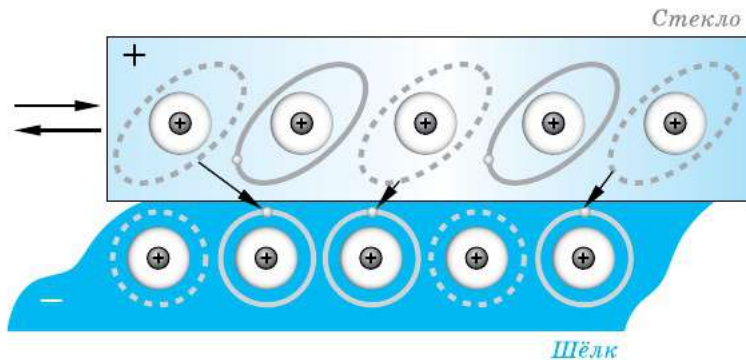
В результате трения стекла о шёлк стекло заряжается положительно, а шёлк — отрицательно (рис. 179, а). При трении стекла об асбест стекло заряжается отрицательно, а асбест — положительно (рис. 179, б).

Это означает, что *одно и то же вещество при трении с различными веществами может получать заряд разного знака.*

Знак заряда тел в результате электризации определяется тем, что одни вещества при трении отдают электроны, а другие их присоединяют. *Причина этого явления — в различии энергии связи электрона с атомом в этих веществах.*

**Электризация — процесс возникновения электрических зарядов на макроскопических телах (или их частях) при внешних воздействиях.**

В атомах тех веществ, где электрон находится далеко от ядра и слабо с ним связан (например, в стекле), энергия связи электрона с атомом мала. Электрон может легко оторваться от атома. Атом при этом превра-



## 180 ▶

*Электризация трением (теория)*

Шёлк



щается в *положительный ион*, а вещество заряжается положительно.

В других веществах (например, в шёлке) ядро атома сильно удерживает электрон, так что энергия связи электрона с атомом велика. Атом может присоединить дополнительный электрон, образуя *отрицательный ион*. Вещество при этом заряжается отрицательно. При трении стекла о шёлк часть электронов от атомов стекла, имеющих малую энергию связи, переходит к атомам шёлка, которые эти электроны присоединяют (рис. 180).

Обратите внимание на ряд веществ, записанных в порядке возрастания энергии связи электрона с атомами (или молекулами). В асбесте энергия связи электрона минимальна, поэтому при контакте с другими веществами электроны легко покидают асбест и он заряжается положительно. У каучука энергия связи электрона максимальна, поэтому при трении каучук заряжается отрицательно.

С помощью приведённого ряда легко установить знаки зарядов двух веществ, полученные ими в результате взаимного трения. Вещество, находящееся в списке выше, заряжается положительно, а ниже — отрицательно. Заряды взаимодействующих веществ оказываются равными по модулю.

Явление электризации лежит в основе дактилоскопического метода получения отпечатка, так как при соприкосновении пальцев, например, с купюрой на ней остаются мельчайшие положительно заряженные частицы белка (рис. 181). Эти частицы белка притягивают отрицательно заряженные частицы золотой пыли, наносимой на купюру, создавая видимые отпечатки.

Трение — лишь один из многих способов электризации вещества. Тело может заряжаться вследствие соприкосновения с заряженным телом, в результате нагревания, светового облучения и т. д.

### Вещество

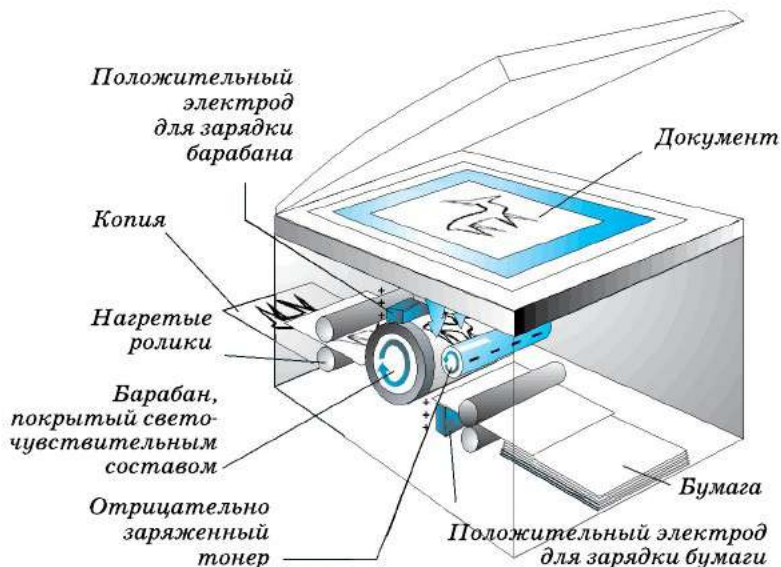
Асбест  
 Мех (кролика)  
 Стекло  
 Слюда  
 Шерсть  
 Кварц  
 Мех (кошки)  
 Шёлк  
 Кожа человека,  
 алюминий  
 Хлопок  
 Дерево  
 Янтарь  
 Медь, латунь  
 Резина  
 Сера  
 Целлюлоид  
 Каучук

Энергия связи электрона с атомами вещества



### ▲ 181

Дактилоскопические отпечатки, полученные с помощью явления электризации



## 182

Электризация при облучении

Электризация при облучении используется, например, в светокопировальном аппарате (рис. 182).

Положительно заряженный алюминиевый цилиндр светокопировального аппарата покрыт составом, электризующимся отрицательно под действием света. Области цилиндра, освещаемые светом, становятся электронейтральными. Части цилиндра, на которые свет не попадает, остаются положительно заряженными и притягивают отрицательно заряженный чёрный порошок. Порошок фиксируется нагретыми роликами на положительно заряженной бумаге.

**Закон сохранения электрического заряда.** В результате взаимного трения электронейтральных тел, образующих электрически изолированную систему, заряды перераспределяются между телами. Отрицательный заряд тела обусловлен избытком электронов, а положительный — их недостатком.

**Электрически изолированная система тел — система тел, через границу которой не проникают заряды.**

Уменьшение числа электронов в одном теле электрически изолированной системы равно увеличению их числа в другом.

Облака состоят из мельчайших капель воды или льдинок, приобретающих при движении и столкновении статические электрические заряды. Верхняя часть облака оказывается заряженной положительно, а его нижние слои — отрицательно.

Полный заряд такой системы не изменяется, оставаясь равным нулю.

### Закон сохранения электрического заряда

**Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна:**

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \text{const},$$

где  $n$  — число зарядов в системе.

Закон сохранения заряда выполняется и в том случае, если электрически изолированную систему образуют заряженные тела. Справедливость этого закона подтверждается не только в процессах электризации, но и при рождении, уничтожении и взаимном превращении элементарных частиц.

В соответствии с законом сохранения заряда *разноимённые заряды рождаются или исчезают попарно: сколько родилось (исчезло) положительных зарядов, столько родилось (исчезло) и отрицательных.*

### В О П Р О С Ы

1. Почему при электризации трением заряжаются оба трущихся тела?
2. Определите знак избыточных зарядов на дереве после того, как об него потрётся кошка. Какие по знаку заряды остаются на шерсти кошки?
3. Остаётся ли неизменной масса тела при его электризации?
4. Почему при электризации трением тела оказываются заряжены разноимёнными зарядами?
5. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.

### З А Д А Ч И

1. Какой положительный и какой отрицательный заряд содержатся в атоме изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ?
2. При электризации эбонитовой палочки о шерсть ей сообщили заряд  $-4,8 \cdot 10^{-13}$  Кл. Какое число электронов перешло при этом из шерсти в эбонит?
3. Какой положительный и какой отрицательный заряд находится в капле воды объёмом  $V = 9 \text{ мм}^3$ ? Масса молекулы воды  $m_0 = 3 \cdot 10^{-26}$  кг.



## § 58. Закон Кулона

**Измерение силы взаимодействия зарядов с помощью крутильных весов.** Первые количественные результаты по измерению силы взаимодействия зарядов были получены в 1785 г. французским учёным *Шарлем Огюстеном Кулоном*.

Кулон для измерения этой силы использовал крутильные весы. Их основным элементом был лёгкий изолирующий стержень (коромысло) 3, подвешенный за его середину на серебряной упругой нити 4 (рис. 183).

Маленький незаряженный позолоченный шарик из ягоды бузины 1 на одном конце коромысла уравнивался бумажным диском 5 на другом конце. Поворотом коромысла он приводился в контакт с таким же неподвижным заряженным шариком 2, в результате чего его заряд делился поровну между шариками.

Диаметр  $D$  шариков выбирался много меньше, чем расстояние между шариками ( $D \ll r$ ), чтобы исключить влияние размеров и формы заряженного тела на результаты измерений.

**Точечный заряд — заряженное тело, размер которого много меньше расстояния от него до других заряженных тел.**

Шарики, имеющие одноимённые заряды, начинали отталкиваться, закручивая упругую нить. Максимальный угол  $\alpha$  поворота коромысла, фиксируемый по наружной шкале 6, был пропорционален силе, действующей на шарик 1.

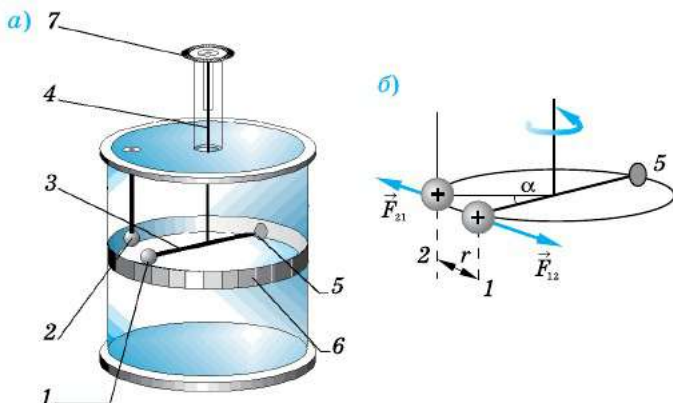
Кулон определял силу взаимодействия заряженных шариков по углу поворота коромысла.

### 183

**Определение силы взаимодействия зарядов с помощью крутильных весов (1785):**

*a* — схема установки;  
*б* — силы взаимодействия зарядов

$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$   
(по третьему закону Ньютона)



Для выяснения зависимости силы взаимодействия от расстояния нить закручивалась на некоторый угол по градуировочной шкале 7 так, что заряженные шарики сближались. При этом возрастающая сила отталкивания шариков измерялась по углу поворота нити.

Для получения зависимости силы взаимодействия от величины зарядов Кулон уменьшал заряд на взаимодействующих шариках в 2, 4, 8, ... раз, используя эффект перераспределения зарядов между шариками при их контакте. При первом прикосновении незаряженного шарика коромысла к заряженному неподвижному шарiku с зарядом  $Q$  заряд на шариках распределяется поровну по  $\frac{Q}{2}$ . Затем шарик коромысла разрядили и повторно соединили с неподвижным шариком. В результате заряды на шариках становились равными  $\frac{Q}{4}$  и т. д.

**Закон Кулона.** В результате многочисленных измерений силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме Кулон установил закон, названный впоследствии его именем.

### Закон Кулона

**Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по прямой, соединяющей заряды:**

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (130)$$

где  $q_1, q_2$  — модули зарядов,  $r$  — расстояние между зарядами,  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

Силу  $F_{12}$  называют *силой Кулона*.

В СИ коэффициент пропорциональности в законе Кулона равен

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Часто его записывают в виде

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная.

Согласно закону Кулона два точечных заряда по 1 Кл, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой

$$F = 9 \cdot 10^9 \text{ Н},$$

примерно равной весу египетских пирамид.

Из этой оценки ясно, что кулон — очень большая единица заряда. Поэтому на практике обычно пользуются дольными единицами кулона:

$$1 \text{ мкКл} = 10^{-6} \text{ Кл},$$

$$1 \text{ мКл} = 10^{-3} \text{ Кл}.$$

1 Кл содержит  $6 \cdot 10^{18}$  зарядов электрона.

**Сравнение электростатических и гравитационных сил.** Зная закон Кулона, можно сравнить электростатическую и гравитационную силы, действующие между электроном и протоном в атоме водорода. Протон составляет ядро атома водорода. Электрон вращается вокруг ядра по орбите радиусом  $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$  м (см. рис. 117).

Согласно современным физическим представлениям, электрон в атоме водорода, имея минимальную энергию, может находиться и на другом расстоянии от ядра. Однако наиболее вероятно, что он будет находиться на расстоянии  $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$  м от ядра.

По закону Кулона сила электростатического взаимодействия (притяжения) электрона и протона равна

$$F_{\text{к}} = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(0,53 \cdot 10^{-10})^2} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}.$$

Из закона всемирного тяготения гравитационная сила притяжения электрона и протона равна

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{(0,53 \cdot 10^{-10})^2} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^2} = 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ Н}.$$

Тогда

$$\frac{F_{\text{к}}}{F_g} = 2,3 \cdot 10^{39},$$

*т. е. электростатическая сила взаимодействия частиц больше гравитационной на 39 порядков.* Примерно во столько же раз масса Галактики превышает массу человека.



Почему же в таком случае гравитационное взаимодействие (самое слабое из всех фундаментальных взаимодействий) формирует структуру Вселенной?

Это происходит потому, что макроскопические тела во Вселенной содержат огромное число частиц. Все эти частицы испытывают силы гравитационного притяжения. Чем больше частиц в теле, т. е. чем больше его масса, тем больше гравитационное притяжение между телами.

В то же время макроскопические тела электронейтральны, так как огромный положительный заряд протонов в теле полностью компенсируется суммарным отрицательным зарядом электронов. Электростатические силы взаимодействия макроскопических тел определяются лишь малыми избыточными зарядами, находящимися на них, и поэтому невелики по сравнению с гравитационными силами. Если бы удалось довести долю избыточных электронов в теле человека до 1%, то, например, сила отталкивания двух учеников, сидящих за одной партой, превысила бы силу гравитационного притяжения Земли к Солнцу.

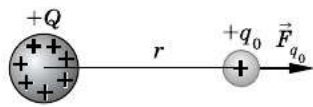
### В О П Р О С Ы

1. Опишите эксперимент Кулона с крутильными весами.
2. Сформулируйте закон Кулона. В чём заключается физический смысл коэффициента  $k$  в законе Кулона? Для взаимодействия каких зарядов закон справедлив?
3. Во сколько раз кулоновская сила отталкивания протонов больше силы их гравитационного притяжения?
4. Почему при описании механического движения не учитываются гигантские электрические силы?
5. Каков порядок кулоновской силы взаимодействия двух учеников, сидящих за одной партой, если доля избыточных электронов в их телах составляет 1% от полного заряда тела?

### З А Д А Ч И

1. Определите силу взаимодействия двух одинаковых точечных зарядов по 1 мкКл, находящихся на расстоянии 30 см друг от друга.
2. Сила взаимодействия двух одинаковых точечных зарядов, находящихся на расстоянии 0,5 м, равна 3,6 Н. Найдите значения этих зарядов.
3. Два одинаковых шарика массой 44,1 г подвешены на нитях длиной 0,5 м. При сообщении шарикам одинаковых избыточных зарядов они оттолкнулись друг от друга так, что угол между нитями стал равным  $90^\circ$ . Найдите значения избыточных зарядов на шариках.

## § 59. Напряжённость электростатического поля



### ▲ 184

*Зондирование  
пробным зарядом  
электростатического  
поля, созданного  
зарядом +Q*

**Силовая характеристика электростатического поля.**

Рассмотрим электростатическое поле, созданное точечным положительным зарядом  $Q$ . Это поле в любой точке можно характеризовать силой, действующей на пробный заряд, помещённый в эту точку (рис. 184).

Пробный заряд должен быть настолько мал, чтобы его внесение в исследуемое поле не изменяло поле, т. е. не вызывало перераспределение заряда  $Q$ . По знаку пробный заряд выбирают положительным.

По закону Кулона сила отталкивания, действующая на пробный заряд  $q_0$ , равна

$$F_{q_0} = k \frac{Qq_0}{r^2}. \quad (131)$$

Как видно, сила  $F_{q_0}$  зависит не только от заряда  $+Q$ , создающего поле, но и от пробного заряда  $q_0$ . В то же время отношение силы, действующей на пробный заряд  $q_0$ , к этому заряду не зависит от его модуля и определяет *напряжённость электростатического поля*.

**Напряжённость электростатического поля точечного заряда — векторная физическая величина, равная отношению силы Кулона, с которой поле действует на пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к этому заряду:**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{q_0}}{q_0}. \quad (132)$$

Напряжённость поля — *силовая характеристика электростатического поля*.

*Напряжённость любого электростатического поля в некоторой точке пространства равна отношению силы, с которой поле действует на пробный положительный заряд, помещённый в этой точке, к этому заряду.*

Единица напряжённости — *ньютон на кулон (Н/Кл)*.

Направление вектора напряжённости совпадает с направлением силы Кулона, действующей на единичный положительный заряд, помещённый в данную точку поля (рис. 185).

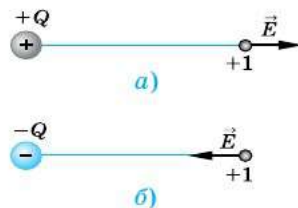
С учётом выражения (131) напряжённость поля, созданного точечным положительным зарядом  $Q$ , в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от него, равна

$$E = k \frac{Q}{r^2}. \quad (133)$$

Примеры значений напряжённости электростатического поля в природе даны в таблице 17.

Зная напряжённость поля в какой-либо точке пространства, можно найти силу, действующую на заряд  $q$ , помещённый в эту точку:

$$\vec{F}_q = q\vec{E}. \quad (134)$$



### ▲ 185

Направление вектора напряжённости:

*a* — вектор напряжённости направлен радиально от положительного точечного заряда  $+Q$ ;

*б* — вектор напряжённости направлен радиально к отрицательному точечному заряду  $-Q$

Таблица 17

### Характерные значения напряжённости электростатического поля

Источник электростатического поля	Напряжённость поля, Н/Кл	Источник электростатического поля	Напряжённость поля, Н/Кл
Космическое фоновое излучение	$3 \cdot 10^{-6}$	Солнечный свет	$10^3$
Электропроводка	$10^{-2}$	Гроза	$10^4$
Радиоволны	$10^{-1}$	Пробой воздуха	$3 \cdot 10^6$
Электрические часы	1,5	Мембрана клетки	$10^7$
Стереосистема	10	Импульсный лазер	$5 \cdot 10^{11}$
Гелий-неоновый лазер	100	Протон в атоме водорода	$6 \cdot 10^{11}$
Атмосфера (ясная погода)	150	Поверхность пульсара	$10^{14}$
Брызги воды в душе	800	Поверхность ядра урана	$2 \cdot 10^{21}$



Силы, действующие на единичный положительный заряд в данной точке со стороны других зарядов, не зависят друг от друга. Согласно принципу суперпозиции сил (см. формулу (30)) результирующая сила, действующая, например, на единичный положительный заряд, равна векторной сумме сил, с которыми на него действует каждый заряд. Учитывая определение напряжённости поля, можно сформулировать *принцип суперпозиции электростатических полей* (по аналогии с принципом суперпозиции сил).

### **Принцип суперпозиции электростатических полей**

**Напряжённость поля системы зарядов в данной точке равна геометрической (векторной) сумме напряжённостей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (135)$$

### **В О П Р О С Ы**

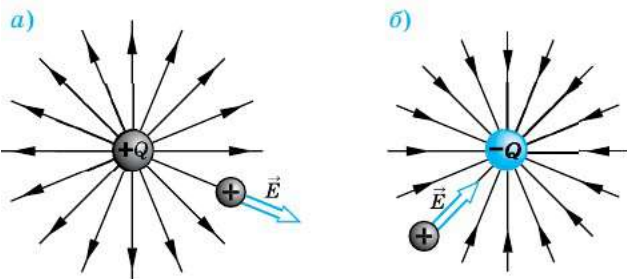
1. Как обнаружить в пространстве наличие электростатического поля?
2. Сформулируйте определение напряжённости электростатического поля. Какова единица напряжённости?
3. Как напряжённость поля, созданного точечным зарядом, зависит от расстояния?
4. Какую поверхность образует геометрическое место точек с одинаковым модулем напряжённости электростатического поля точечного заряда?
5. Сформулируйте принцип суперпозиции электростатических полей.

### **З А Д А Ч И**

1. Напряжённость поля в точке  $A$  направлена на восток и равна  $2 \cdot 10^5$  Н/Кл. Какая сила и в каком направлении будет действовать на заряд  $-3$  мкКл?
2. Определите напряжённость поля, созданного протоном на расстоянии  $5,3 \cdot 10^{-11}$  м от него. Какая сила действует на электрон, находящийся в этой точке?
3. Определите ускорение электрона в точке  $B$ , если напряжённость поля в этой точке равна  $1,3 \cdot 10^{11}$  Н/Кл.

## **§ 60. Линии напряжённости электростатического поля**

**Графическое изображение электрического поля.** Для того чтобы составить представление о распределении электростатического поля в пространстве, можно показать векторы напряжённости в некоторых точках.



### 186

Линии напряжённости  
точечного заряда:

а — положительный  
заряд;

б — отрицательный  
заряд

Для большей наглядности электростатическое поле представляют непрерывными *линиями напряжённости*.

**Линии напряжённости** — линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора напряжённости электростатического поля в данной точке.

*Линии напряжённости поля не пересекаются* (в противном случае напряжённость электростатического поля не имела бы определённого направления в данной точке).

*Линии напряжённости электростатического поля, созданного точечным положительным зарядом, направлены радиально от заряда*, так как пробный заряд в любой точке отталкивается от него.

Положительный заряд является *источником линий напряжённости*.

Линии напряжённости выходят из изолированного положительного заряда и уходят в бесконечность (рис. 186, а).

*Линии напряжённости электростатического поля, созданного точечным отрицательным зарядом, направлены радиально к заряду*, так как пробный заряд в любой точке притягивается к нему.

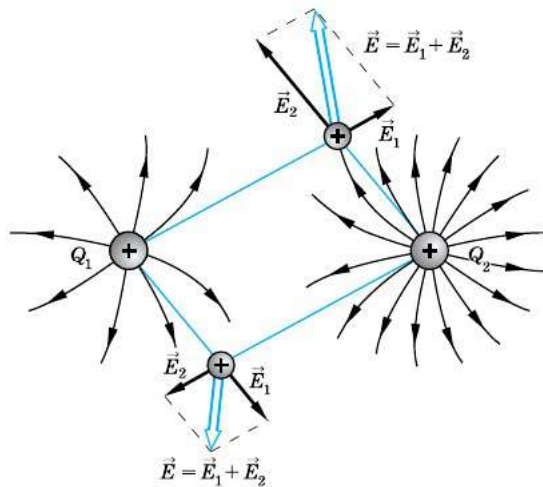
Отрицательный заряд является *стоком линий напряжённости*.

Линии напряжённости входят в изолированный отрицательный заряд из бесконечности (рис. 186, б). Линии напряжённости электростатического поля не замкнуты.

**Линии напряжённости поля системы зарядов.** Благодаря принципу суперпозиции задача о нахождении напряжённости электростатического поля, создаваемого любой системой заряженных частиц, сводится к суммированию напряжённостей полей точечных зарядов.

## 187

Использование принципа суперпозиции для построения линий напряжённости системы двух положительных зарядов



Например, напряжённость электростатического поля, созданного двумя точечными положительными зарядами, равна геометрической сумме напряжённостей в каждой точке пространства (рис. 187).

Систему зарядов с суммарным зарядом  $Q \neq 0$  на расстоянии  $r$  от неё, значительно превышающем размер системы  $l$  ( $r \gg l$ ), можно рассматривать как точечный заряд. Напряжённость поля, создаваемого такой системой, совпадает с напряжённостью поля точечного заряда

$$E \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте определение линий напряжённости электростатического поля.
2. Почему линии напряжённости поля точечных зарядов направлены радиально?
3. Где начинаются и где заканчиваются линии напряжённости электростатического поля? Почему они не пересекаются?
4. Как построить линии напряжённости электростатического поля произвольной системы зарядов с помощью принципа суперпозиции?
5. Когда систему зарядов можно рассматривать как точечный заряд?

### З А Д А Ч И

1. Два одинаковых точечных положительных заряда  $q = 10$  мкКл находятся на расстоянии  $l = 12$  см один от другого. Найдите напряжённость поля в точке  $A$ , находя-





**Проводники, диэлектрики, полупроводники.** Все вещества по концентрации и степени подвижности заряженных частиц делят на три группы: *проводники, диэлектрики, полупроводники.*

**Проводник — вещество, в котором свободные заряды могут перемещаться по всему объёму.**

К проводникам относят металлы, растворы солей, щелочей, кислот, плазму, тело человека.

Если в веществе отсутствуют свободные заряды, но имеются связанные, то вещество относят к *диэлектрикам.*

**Диэлектрик — вещество, содержащее только связанные заряды.**

Свободные заряды в диэлектрике отсутствуют, поэтому диэлектрик не проводит электрический ток, являясь хорошим изолятором.

К диэлектрикам относят газы, некоторые жидкости (дистиллированную воду, бензол, масла и др.) и твёрдые тела (стекло, фарфор, слюду и др.).

В *полупроводнике* энергия связи электрона с атомом соизмерима с энергией его взаимодействия с соседним атомом. Свободные электроны могут образоваться в полупроводнике лишь при получении ими дополнительной энергии. Например, в результате нагревания число свободных зарядов в полупроводнике может увеличиться настолько, что его можно отнести к проводникам. Подвижность зарядов в полупроводнике изменяется также под действием света, электрического поля, при введении в него примесей.

**Полупроводник — вещество, в котором количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температура, напряжённость электростатического поля).**

К полупроводникам относят вещества, составляющие 80% массы земной коры: минералы, оксиды, сульфиды, теллуриды, германий, кремний, селен и др.

### В О П Р О С Ы

1. На какие группы по концентрации и степени подвижности электрических зарядов делят все вещества?
2. Чем определяется подвижность заряженных частиц в среде?
3. Какие заряды называют свободными? Какие вещества называют проводниками? Приведите примеры проводников.

- Какие заряды называют связанными? Какие вещества называют диэлектриками? Приведите примеры диэлектриков.
- Какие вещества называют полупроводниками? Приведите примеры полупроводников.

## § 62. Диэлектрики в электростатическом поле

**Полярные и неполярные диэлектрики.** Молекулы по структуре распределения в них электрического заряда делят на два вида: *полярные* и *неполярные*.

В полярных молекулах (таких как  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) центры связанных зарядов (ядер, электронных оболочек) находятся на некотором расстоянии друг от друга. Моделью электронейтральной молекулы  $\text{CO}$  может служить электрический диполь — система, состоящая из двух равных по модулю разноимённых зарядов.

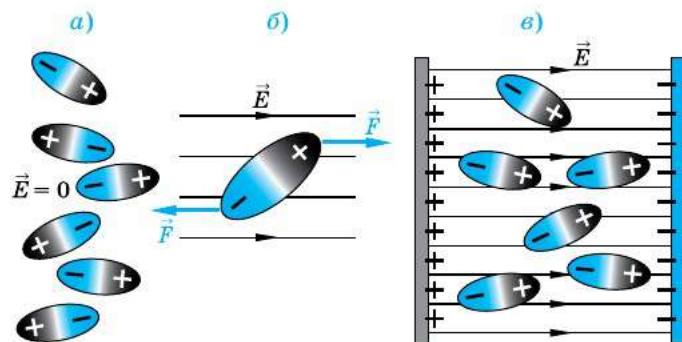
В неполярных молекулах (таких как  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), имеющих симметричное строение, центры положительных и отрицательных связанных зарядов совпадают.

*Диэлектрики в соответствии со структурой их молекул делят на два вида: полярные и неполярные.*

*Полярный диэлектрик состоит из полярных молекул, а неполярный — из неполярных.*

Внутри диэлектрика, помещённого во внешнее электростатическое поле, происходит пространственное перераспределение зарядов.

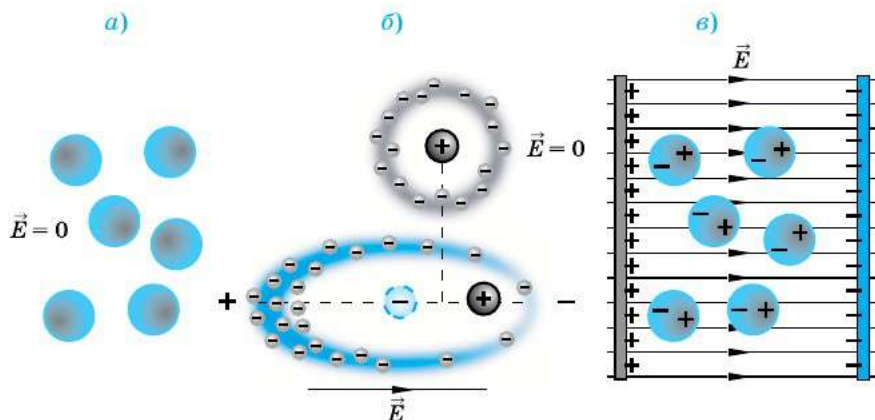
В полярных диэлектриках электростатическое поле ориентирует хаотически расположенные молекулы, поворачивая их вдоль напряжённости внешнего поля (рис. 188).



### 188

*Полярный диэлектрик в электростатическом поле:*

- полярные молекулы в отсутствие поля;
- поворот молекулы вдоль линий напряжённости;
- ориентация полярных молекул в электростатическом поле



### ▲ 189

*Неполярный диэлектрик в электростатическом поле:*

*а — неполярные молекулы в отсутствие поля;*

*б — механизм поляризации молекулы;*

*в — поляризация неполярных молекул в электростатическом поле*

В неполярных диэлектриках электростатическое поле поляризует молекулы, растягивая в разные стороны положительные и отрицательные заряды (рис. 189) вдоль линий напряжённости поля.

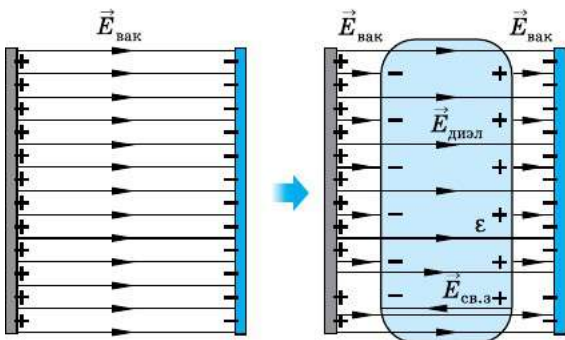
**Поляризация диэлектрика — пространственное разделение разноимённых зарядов, входящих в состав атомов (молекул) вещества, под действием внешнего электростатического поля.**

Явлением поляризации объясняется притяжение наэлектризованным телом лёгких кусочков бумаги. В электростатическом поле тела электро-нейтральные кусочки бумаги поляризуются. На поверхности, ближайшей к заряженному телу, появляется противоположный заряд, что приводит к притяжению бумаги к наэлектризованному телу.

**Относительная диэлектрическая проницаемость.** Напряжённость суммарного поля связанных зарядов направлена противоположно напряжённости внешнего поля (рис. 190).

Вследствие этого поле в диэлектрике ослабляется. Уменьшение напряжённости электростатического поля в среде по сравнению с вакуумом характеризуется *относительной диэлектрической проницаемостью среды*.





### 190

Электростатическое поле в диэлектрике. Поле связанных зарядов, направленно противоположно напряжённости внешнего электростатического поля, уменьшает напряжённость в  $\epsilon$  раз

Относительная диэлектрическая проницаемость среды — число, показывающее, во сколько раз напряжённость электростатического поля в однородном диэлектрике меньше, чем напряжённость в вакууме:

$$\epsilon = \frac{E_{\text{вак}}}{E}$$

Следовательно, напряжённость поля в диэлектрике

$$E = \frac{E_{\text{вак}}}{\epsilon}$$

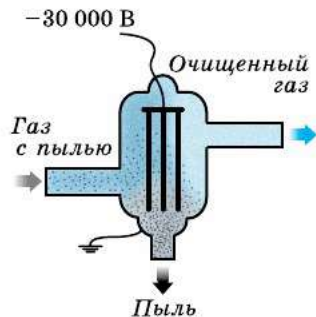
(136)

Уменьшение напряжённости электростатического поля в диэлектрике приводит к тому, что сила взаимодействия точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся в диэлектрике на расстоянии  $r$  друг от друга, уменьшается в  $\epsilon$  раз:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

Соответственно напряжённость поля, созданного точечным зарядом, в диэлектрике уменьшается в  $\epsilon$  раз.

Поляризация частиц в сильном электростатическом поле используется в электрических фильтрах для очистки газа от угольной пыли (рис. 191).



### 191

Очистка газа от угольной пыли с помощью электростатического фильтра

Поляризованные частицы угольной пыли притягиваются к вертикальным электродам.

Когда сила тяжести частиц, задержанных фильтром, становится больше их силы притяжения к электродам, пыль оседает на дно фильтра. Для очистки фильтра пыль со дна периодически удаляется.

### В О П Р О С Ы

1. На какие два вида делят молекулы веществ по характеру пространственного распределения в них зарядов?
2. В чём проявляется действие внешнего электростатического поля на молекулы полярного диэлектрика?
3. Как действует внешнее электростатическое поле на молекулы неполярного диэлектрика?
4. Почему диэлектрик ослабляет электростатическое поле? Что показывает относительная диэлектрическая проницаемость среды?
5. Как используется поляризация для очистки газа?

### З А Д А Ч И

1. Земной шар обладает отрицательным зарядом порядка  $Q = -5,7 \cdot 10^5$  Кл. Оцените напряжённость электростатического поля, создаваемого этим зарядом вблизи поверхности Земли в воздухе и в водоёмах, принимая  $R = 6400$  км, диэлектрическую проницаемость воды  $\epsilon = 80$ .
2. Напряжённость поля между двумя заряженными плоскопараллельными пластинами в воздухе 200 Н/Кл. После их погружения в жидкий аммиак напряжённость поля оказалась равной 8 Н/Кл. Чему равна диэлектрическая проницаемость аммиака?
3. Найдите заряд шарика массой 41 мг, находящегося в равновесии под действием гравитационной и электростатической силы в поле напряжённостью  $E = 400$  кН/Кл.

## § 63. Проводники в электростатическом поле

**Распределение зарядов.** В незаряженных проводниках, к которым в первую очередь относятся все металлы, суммарный заряд электронов и протонов равен нулю.

Выясним сначала, как пространственно распределяются электрические заряды в заряженном металлическом проводнике в отсутствие внешнего электростатического поля.

В отрицательно заряженном проводнике избыточные электроны из-за взаимного отталкивания расходятся на максимальное расстояние друг от друга, распределяясь по поверхности проводника. При этом внутри проводника существует баланс положительных и отрицательных зарядов.

В положительно заряженном проводнике электронов меньше, чем протонов. Свободные электроны втягиваются внутрь проводника избыточным положительным зарядом. Из-за ухода электронов с поверхности проводника на ней остаётся избыточный положительный заряд.

Таким образом, *заряды, сообщённые проводнику, распределяются по его поверхности.*

**Электростатическая индукция.** При приложении к электронейтральному проводнику внешнего электростатического поля на его поверхности происходит перераспределение зарядов, называемое *электростатической индукцией*. Предположим, что внешнее электрическое поле создаётся двумя разноимёнными пластинами (рис. 192, а).

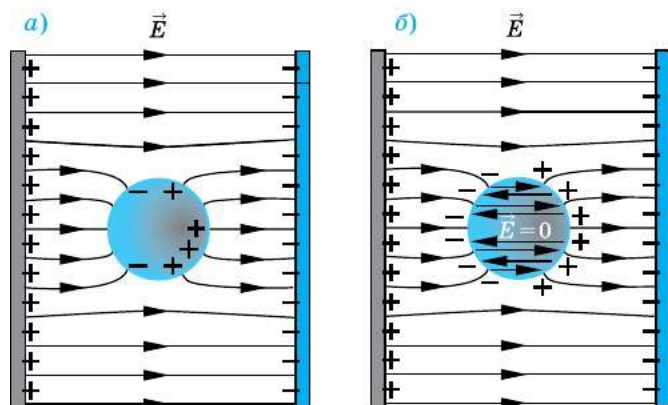
Отрицательные заряды проводника притягиваются к положительной пластине, а положительные заряды — к отрицательной. Эти заряды называются *индуцированными* (или *наведёнными*). Разделение зарядов прекращается при установлении равновесия, когда сила притяжения зарядов к пластинам будет равна силе притяжения между индуцированными зарядами (рис. 192, б).

В равновесии движение свободных зарядов прекращается, что свидетельствует об отсутствии электростатического поля внутри проводника.

Если в диэлектрике напряжённость поля связанных зарядов лишь уменьшает напряжённость внешнего поля, то в проводнике поле индуцированных (наведённых) зарядов полностью его компенсирует.

*Напряжённость поля внутри проводника, помещённого в электростатическое поле, равна нулю.*

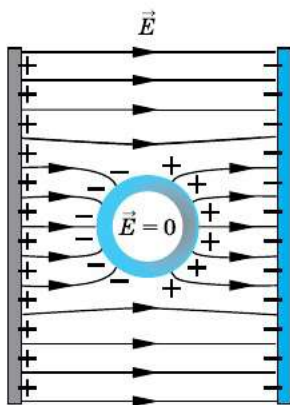
Суммарный заряд внутренней области проводника равен нулю и не влияет на распределение зарядов на поверхности и на напряжённость поля внутри проводника.



## 192

*Проводник в электростатическом поле:*  
 а — заряды располагаются на внешней поверхности проводника;  
 б — напряжённость поля внутри проводника равна нулю





### ▲ 193

*Электростатическая защита. Электростатическое поле не проникает внутрь проводника*

Следовательно, напряжённость электростатического поля в полости проводника будет такой же, как и в сплошном проводнике (рис. 193).

Внутри полости в проводящей оболочке напряжённость поля равна нулю.

Это означает, что *электростатическое поле не проникает внутрь проводника*.

Это свойство проводников используется при электростатической защите, когда проводящие оболочки защищают различные измерительные приборы от воздействия электростатических полей.

Экранирование электростатического поля возможно, так как наряду с силами притяжения между зарядами действуют силы отталкивания между ними. Экранирование гравитационного поля невозможно, так как тела могут лишь притягиваться друг к другу гравитационными силами.

Напряжённость поля в проводнике равна нулю.

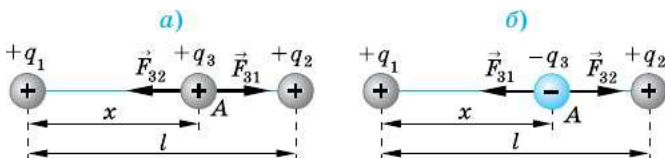
*Линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны поверхности металла (см. рис. 192, 193).*

## В О П Р О С Ы

1. Чему равен суммарный заряд незаряженного проводника?
2. Как размещается избыточный заряд на изолированном проводнике в отсутствие внешнего электростатического поля?
3. Чему равна напряжённость поля внутри проводника, помещённого в электростатическое поле?
4. Почему электростатическое поле не проникает внутрь проводника? Что называют электростатической защитой?
5. Почему электронейтральная металлическая сфера притягивает как положительные, так и отрицательные заряды, находящиеся на малых расстояниях от неё?

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Два положительных точечных заряда  $q_1$  и  $q_2$  ( $q_2 < q_1$ ) находятся в воздухе на расстоянии  $l$  один от другого. В какую точку следует поместить третий заряд  $q_3$ , чтобы равнодействующая сила, действующая на него со



194

Заряд  $q_3$  в равновесии:  
 а — положительный;  
 б — отрицательный

стороны зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , была равна нулю? Будет ли положение третьего заряда зависеть от его значения и знака?

### Решение.

Единственная точка, в которой силы, действующие на третий заряд, могут компенсировать друг друга, находится на прямой между зарядами (ближе к меньшему  $q_2$ ) на расстоянии  $x$  от заряда  $q_1$ . При этом заряд  $q_3$  может быть как положительным (рис. 194, а), так и отрицательным (рис. 194, б).

В первом случае компенсируются силы отталкивания  $F_{31}$  и  $F_{32}$ , во втором — силы притяжения:  $F_{31} = F_{32}$ . Учитывая закон Кулона, перепишем это условие:

$$k \frac{q_3 q_1}{x^2} = k \frac{q_3 q_2}{(l-x)^2}.$$

Существенно, что в этом равенстве  $q_3$  сокращается. Это означает, что положение равновесия не зависит от значения заряда  $q_3$ . Этот заряд может быть любым.

Для решения квадратного уравнения относительно  $x$  перепишем его иначе:

$$(\sqrt{q_2} x)^2 - (\sqrt{q_1})^2 (l-x)^2 = 0.$$

Разложим разность квадратов на множители:

$$[\sqrt{q_2} x - \sqrt{q_1} (l-x)] [\sqrt{q_2} x + \sqrt{q_1} (l-x)] = 0.$$

Приравнявая к нулю каждый множитель, получим

$$x_1 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}; \quad x_2 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} - \sqrt{q_2}}.$$

Равновесие заряда  $q_3$  возможно лишь между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , т. е. при  $x < l$ . Поэтому не подходит корень  $x_2 > l$ , так как

$$\frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} - \sqrt{q_2}} > 1.$$

Следовательно, заряд  $q_3$  любого знака и значения будет находиться

в точке  $A$  на расстоянии  $x_1 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1 + \sqrt{q_2}}}$  от заряда  $q_1$ .

**Ответ:** положение равновесия заряда  $q_3$ , помещённого на расстоянии

$l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1 + \sqrt{q_2}}}$  от заряда  $q_1$ , не будет зависеть от его значения и знака.

## Т В О Р Ч Е С К И Е   З А Д А Н И Я

1. Возникает ли электромагнитное взаимодействие между людьми?
2. Подготовьте доклад «Явление электризации в технике».
3. Напряжённость поля является силовой характеристикой электростатического поля. Какой параметр человека можно считать его силовой характеристикой? Поясните смысл словосочетания «силовые виды спорта».
4. Проведите классификацию различных домашних предметов по признаку «ди-электрик/проводник». Результат представьте в виде таблицы.

## О С Н О В Н Ы Е   П О Л О Ж Е Н И Я

**Электрический заряд** — физическая величина, определяющая силу электромагнитного взаимодействия.

Единица электрического заряда — кулон (Кл).

Существует два вида электрических зарядов — положительные и отрицательные.

Минимальным положительным зарядом ( $+e$ ) обладает протон, минимальным отрицательным зарядом ( $-e$ ) — электрон.

*Электрический заряд дискретен:* суммарный положительный заряд тела кратен заряду протона, суммарный отрицательный — заряду электрона.

Если суммарный заряд тела равен нулю, оно является электронейтральным.

**Электростатическое взаимодействие** — взаимодействие неподвижных заряженных тел или частиц.

Заряды одинакового знака отталкиваются, а противоположных знаков притягиваются друг к другу.

**Закон сохранения электрического заряда:** алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна.

Сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме определяется **законом Кулона:**

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — модули зарядов,  $r$  — расстояние между ними,



$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2,$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

■ Электростатическое поле в данной точке характеризуется напряжённостью поля.

**Напряжённость электростатического поля** — векторная физическая величина, равная отношению силы Кулона, с которой поле действует на пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к этому заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{q_0}}{q_0}.$$

Единица напряжённости — *НЬЮТОН на кулон* (Н/Кл).

■ Напряжённость электростатического поля, созданного точечным положительным зарядом  $Q$  в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от него,

$$E = k \frac{Q}{r^2}.$$

■ Сила, действующая на точечный заряд, помещённый в электростатическое поле, напряжённость которого  $\vec{E}$ ,

$$\vec{F}_q = q\vec{E}.$$

■ **Принцип суперпозиции электростатических полей:** *напряжённость поля системы зарядов в данной точке равна геометрической (векторной) сумме напряжённостей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности:*

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

■ **Линии напряжённости** — линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора напряжённости электростатического поля в данной точке.

■ **Свободные заряды** — нескомпенсированные заряды, способные перемещаться под действием электрического поля по всему объёму проводника.

■ **Связанные заряды** — разноимённые заряды, входящие в состав атомов (или молекул), которые не могут перемещаться под действием электрического поля независимо друг от друга.

■ **Проводник** — вещество, в котором свободные заряды могут перемещаться по всему объёму.

■ **Диэлектрик** — вещество, содержащее только связанные заряды.

■ **Полупроводник** — вещество, в котором количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температура, напряжённость электростатического поля).

■ **Поляризация диэлектрика** — пространственное разделение разноимённых зарядов, входящих в состав атомов (молекул) вещества, под действием внешнего электростатического поля.

■ **Относительная диэлектрическая проницаемость среды** — число, показывающее, во сколько раз напряжённость электростатического поля в однородном диэлектрике меньше, чем напряжённость в вакууме:

$$\epsilon = \frac{E_{\text{вак}}}{E}.$$



## § 64. Потенциал электростатического поля

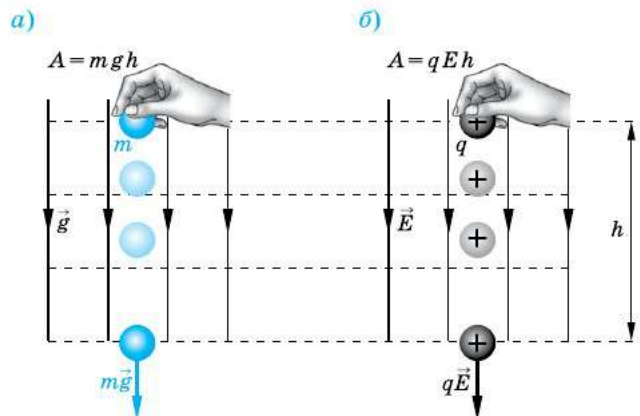
**Аналогия движения частиц в электростатическом и гравитационном полях.** Физические величины, введённые в механике (перемещение, сила, работа силы, потенциальная энергия), используются при описании любого фундаментального взаимодействия, включая электромагнитное.

Работа, совершаемая силой тяжести в однородном ( $g = \text{const}$ ) гравитационном поле Земли (рис. 195, *а*) при перемещении частицы на расстояние  $h$  вдоль  $\vec{g}$ , равна

$$A_g = mgh. \quad (137)$$

При перемещении положительного заряда  $+q$  на расстояние  $h$  вдоль линии напряжённости однородного ( $\vec{E} = \text{const}$ ) электростатического поля (рис. 195, *б*) (созданного, например, заряженной плоскостью) совершается работа

$$A_q = F_K h = qEh. \quad (138)$$



### 195 ▶

*Аналогия движения частиц:  
а — в гравитационном поле;  
б — в однородном электростатическом поле*

В зависимости от рассматриваемого вида взаимодействия в выражении работы фигурирует либо гравитационная сила  $mg$ , либо кулоновская  $qE$ . Движение заряженной частицы массой  $m$  в однородном электростатическом поле в отсутствие гравитации аналогично её движению в однородном гравитационном поле, если

$$qE = mg. \quad (139)$$

При напряжённости электростатического поля  $E = mg/q$  ускорения частицы, движущейся в гравитационном и электростатическом полях, совпадают.

Силы гравитационного и электростатического взаимодействия одинаково зависят от расстояния между телами ( $\sim 1/r^2$ ) и направлены по прямой, соединяющей тела.

Тело массой  $m$  притягивается к Земле гравитационной силой

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{r^2},$$

а отрицательный заряд  $-q$  притягивается к положительному заряду  $Q$  силой Кулона (рис. 196):

$$F_{-q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2}.$$

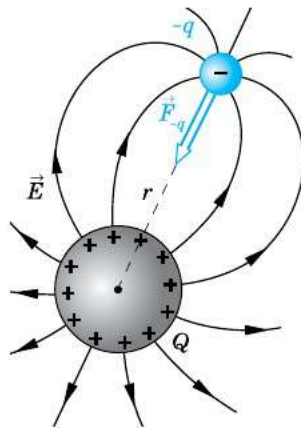
Поэтому, так же как и в случае гравитационного поля, *работа сил электростатического поля при перемещении заряженной частицы из одной точки в другую не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения частицы*. Это означает, что электростатическое поле потенциально.

**Потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов.** Потенциальную энергию взаимодействия точечных зарядов можно найти, используя аналогию между электромагнитным и гравитационным взаимодействиями.

Потенциальная энергия гравитационного притяжения зависит от расстояния между телом и Землёй по закону (см. формулу (67)):

$$E_p = W = -G \frac{mM_{\oplus}}{r}.$$

В этом разделе мы будем обозначать потенциальную энергию буквой  $W$  (чтобы не путать с обозначением напряжённости поля  $E$ ).



### ▲ 196

*Аналогия электрического притяжения разноимённых зарядов и гравитационного притяжения*



Заменяя  $GmM_{\oplus}$  на  $\frac{Qq}{4\pi\epsilon_0}$  в этом выражении, получим потенциальную

энергию заряда  $-q$  в поле заряда  $+Q$ :

$$W_{-q} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}. \quad (140)$$

Знак «минус» в выражении для потенциальной энергии означает, что между зарядами действует сила притяжения.

Потенциальная энергия положительного заряда  $+q$ , находящегося на расстоянии  $r$  от неподвижного заряда  $+Q$ , равна

$$W_{+q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}. \quad (141)$$

Знак «плюс» в выражении для потенциальной энергии означает, что между зарядами действует сила отталкивания.

Нуль отсчёта потенциальной энергии в формулах (140), (141) выбран на бесконечно большом расстоянии, где заряды практически не взаимодействуют друг с другом.

**Потенциал** — энергетическая характеристика поля. Подобно напряжённости, характеризующей силу, действующую на единичный положительный заряд, вводится величина, характеризующая потенциальную энергию единичного положительного заряда, — *потенциал*.

Потенциальная энергия пробного заряда  $q_0$ , находящегося в электростатическом поле заряда  $Q$ , пропорциональна произведению значений этих зарядов. Очевидно, что энергетическая характеристика поля, созданного зарядом  $Q$ , не должна зависеть от значения пробного заряда, внесённого в это поле. Из формул (140), (141) видно, что от значения пробного заряда не зависит отношение потенциальной энергии к заряду  $q_0$ .

**Потенциал электростатического поля в данной точке** — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии, которой обладает пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к этому заряду:

$$\phi = \frac{W_{q_0}}{q_0}. \quad (142)$$

Пробный заряд должен быть достаточно малым, чтобы не перераспределять заряды, создающие поле.

Единицей потенциала является *вольт* (В):

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$$

*Вольт равен потенциалу точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж.*

Зная потенциал, с помощью формулы (142) легко найти потенциальную энергию заряда  $q$ :

$$W_q = q\varphi.$$

Выражение для потенциала электростатического поля, созданного точечным зарядом  $+Q$  (см. (139), (140)), имеет вид

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (143)$$

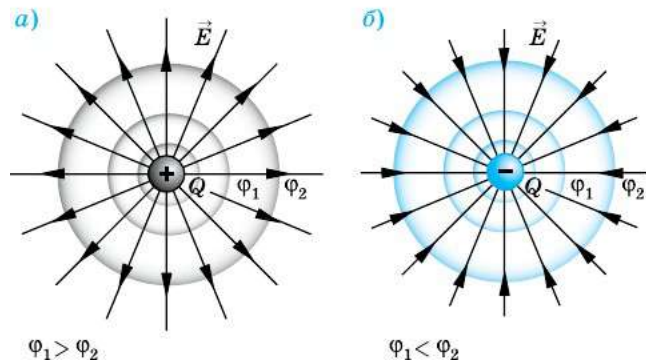
(Потенциал электростатического поля вне заряженной сферы определяется такой же формулой.)

**Эквипотенциальные поверхности.** На одинаковом расстоянии  $r$  от заряда  $Q$ , т. е. на поверхности сферы радиусом  $r$ , потенциал одинаков.

**Эквипотенциальная поверхность — поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение.**

Для точечного заряда эквипотенциальными поверхностями являются сферы, в центре которых расположен заряд (рис. 197).

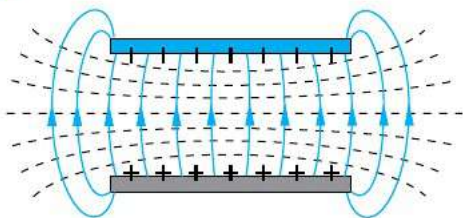
При удалении от положительного заряда  $+Q$  потенциал уменьшается, а при удалении от отрицательного заряда  $-Q$  потенциал возрастает.



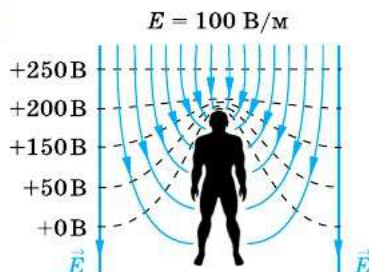
## 197

*Эквипотенциальные поверхности и линии напряжённости для положительного и отрицательного точечных зарядов*

а)



б)



## ▲ 198

*Эквипотенциальные поверхности:*

*а — линии напряжённости и эквипотенциальные поверхности параллельных пластин;*

*б — эквипотенциальные поверхности и линии напряжённости вокруг человека, стоящего на земле*

*Линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям и направлены от поверхности с большим потенциалом к поверхности с меньшим.*

На рисунке 198 показаны эквипотенциальные поверхности и линии напряжённости параллельных, разноимённо заряженных пластин и электростатического поля вокруг человека, стоящего на земле.

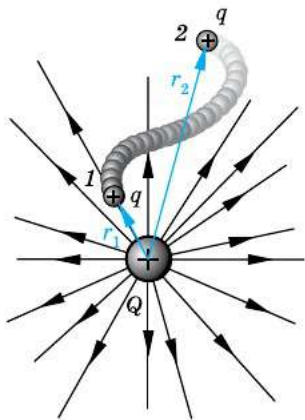
### В О П Р О С Ы

1. В чём прослеживается аналогия движения заряда в однородном электростатическом поле и движения тела в гравитационном поле?
2. Зависит ли работа сил электростатического поля от формы траектории заряженной частицы?
3. Почему электростатическое поле потенциально?
4. Сформулируйте определение потенциала. В каких единицах он измеряется?
5. Какую поверхность называют эквипотенциальной?
6. Как линии напряжённости направлены относительно эквипотенциальных поверхностей?

### З А Д А Ч И

1. Найдите потенциальную энергию электрона, вращающегося в атоме водорода вокруг протона по круговой орбите радиусом  $5,3 \cdot 10^{-11}$  м.
2. На каком расстоянии от себя заряд 1 мкКл создаёт потенциал 900 В? За нуль отсчёта потенциала примите потенциал точки, бесконечно удалённой от заряда.
3. При какой напряжённости однородного электростатического поля электрон движется с ускорением  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ?





находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга в однородном ( $E = \text{const}$ ) электростатическом поле вдоль линии напряжённости (рис. 199):

$$A_{+1} = F_{+1}d,$$

где  $F_{+1}$  — сила, действующая на единичный положительный заряд, численно равная  $E$ . Следовательно,

$$U = Ed. \quad (145)$$

В качестве единицы напряжённости, как следует из формулы (145), можно использовать *вольт на метр* (В/м).

Разность потенциалов между точками 1 и 2 (рис. 200), находящимися на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от точечного заряда  $+Q$ , равна

$$U = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

При получении этой разности потенциалов мы воспользовались формулой для потенциала, созданного точечным зарядом  $+Q$ .

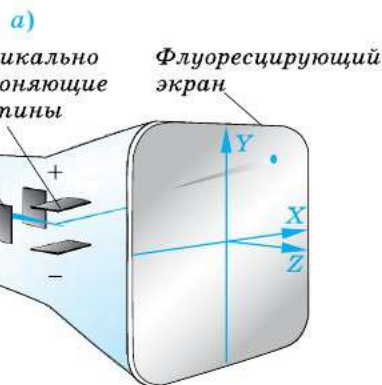
Значительная разность потенциалов ( $\sim 10^4$  В)

используется для формирования электронного пучка в электронно-лучевой трубке (рис. 201, а).

На рисунке 201, б показана параболическая траектория движения электрона между вертикально отклоняющими пластинами и практиче-

## ▲ 200

*Потенциальность электростатических сил. Разность потенциалов не зависит от формы траектории заряда между точками 1 и 2*



## ▲ 201

*Движение электронов в электронно-лучевой трубке*

ски прямолинейная траектория перед попаданием электрона на флуоресцирующий экран электронно-лучевой трубки. Красный, зелёный и синий люминофоры покрытия экрана обеспечивают цветное изображение.

### В О П Р О С Ы

1. Почему работа сил электростатического поля при перемещении заряженной частицы из одной точки в другую не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения частицы?
2. Как работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2, связана с разностью потенциалов между этими точками?
3. Сформулируйте определение разности потенциалов.
4. Как выглядят эквипотенциальные поверхности в однородном электростатическом поле?
5. Почему между вертикально отклоняющими пластинами электронно-лучевой трубки электрон движется по параболической траектории?

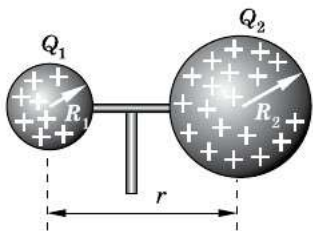
### З А Д А Ч И

1. Найдите напряжённость однородного поля между точками 1 и 2 (см. рис. 199), если расстояние между ними 2 см, а разность потенциалов — 220 В.
2. Какую скорость приобретёт изначально неподвижный электрон, пройдя разность потенциалов 1 В?
3. Электрон движется по направлению линий напряжённости однородного электростатического поля напряжённостью 120 В/м. Какое расстояние он проходит до полной остановки, если его начальная скорость 1 мм/с? Сколько времени электрон будет двигаться до остановки?

## § 66. Электроёмкость уединённого проводника

**Гидростатическая аналогия.** Рассмотрим более детально распределение зарядов по поверхностям металлических проводников. Для простоты в качестве проводников возьмём две заряженные металлические сферы разных радиусов. При соединении их с проводящей перемычкой электрический заряд между сферами (рис. 202) перераспределяется подобно массам жидкости в сообщающихся сосудах. В этом смысле масса жидкости в гидростатике — аналог электрического заряда в электростатике.

Закон сохранения заряда аналогичен закону сохранения массы. При соединении двух сообщающихся сосудов, площадь поперечного сечения которых  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 203), жидкость перетекает из сосуда 2 (с большей высотой столба) в сосуд 1. Равновесие установится, когда уровни жидкост-



### ▲ 202

*Заряд на сферах перераспределяется пропорционально радиусу сфер*

ти в сосудах станут одинаковыми (при этом давление жидкости является аналогом потенциала). Масса жидкости в каждом сосуде различна и пропорциональна площади поперечного сечения сосуда или его объёму (ёмкости). Ёмкость сосуда не зависит от массы жидкости, налитой в него. Суммарная масса жидкости в сообщающихся сосудах сохраняется (подобно суммарному заряду на сферах, соединяемых металлической перемычкой).

**Електроёмкость.** Определим электроёмкость произвольного уединённого проводника, на электростатическое поле которого не влияют другие заряженные тела.

**Электрическая ёмкость (электроёмкость) уединённого проводника — физическая величина, равная отношению заряда проводника к потенциалу этого проводника:**

$$C = \frac{Q}{\varphi}. \quad (145)$$

Единицей электроёмкости является *фарад* (Ф):

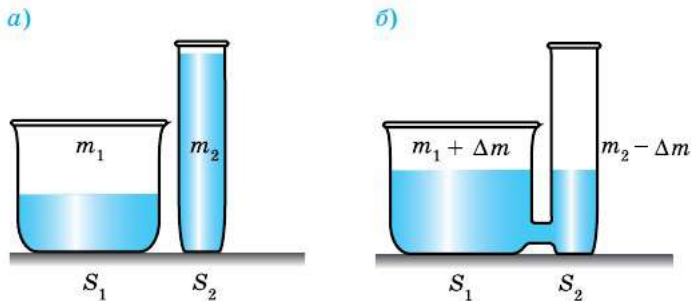
$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В.}$$

Найдём электроёмкость уединённой сферы радиусом  $R$ . Потенциал на её поверхности (см. (143))

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R},$$

### 203 ▶

*Гидростатическая аналогия распределения электрических зарядов на соединённых металлических сферах. Масса жидкости в сообщающихся сосудах пропорциональна их ёмкости*





поэтому

$$C = \frac{Q}{Q/(4\pi\epsilon_0 R)} = 4\pi\epsilon_0 R.$$

Следовательно, электроёмкость сферы зависит от её радиуса и не зависит от заряда на её поверхности.

Электроёмкость уединённого проводника в вакууме является его геометрической характеристикой, так же как ёмкость сосуда.

Электроёмкость 1 Ф очень большая. Такой электроёмкостью обладает, например, сфера радиусом

$$R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м} = 9 \cdot 10^6 \text{ км}.$$

Этот радиус в 13 раз превышает радиус Солнца.

На практике используют дольные единицы фарада.

Электроёмкость земного шара достаточно велика и составляет 0,7 мФ.

Поэтому при соединении заряженных тел проводником с Землёй, т. е. при заземлении, практически весь заряд тела переходит на Землю. Чем больше электроёмкость проводника, тем больший максимальный заряд может находиться на проводнике.

### В О П Р О С Ы

1. Какая гидростатическая аналогия соответствует перераспределению зарядов на двух сферах, соединённых перемычкой?
2. Сформулируйте определение электрической ёмкости уединённого проводника. Какова единица электроёмкости?
3. Почему на практике используют дольные единицы электроёмкости?
4. Почему электроёмкость сферы не зависит от заряда на её поверхности?
5. Объясните, почему при заземлении заряженное тело разряжается.

## § 67. Электроёмкость конденсатора

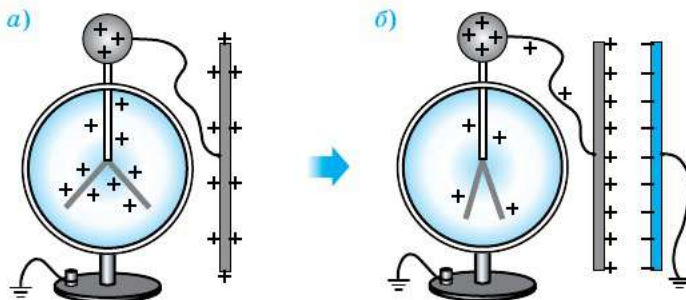
**Способ увеличения электроёмкости проводника.** Электроёмкость уединённого проводника определяется его геометрическими размерами. Однако существуют способы, позволяющие увеличить максимальный заряд, который может находиться на проводнике определённого размера, и тем самым увеличить его электроёмкость.

Присоединим положительно заряженную пластину к электроскопу. При этом положительный заряд распределится между ними приблизительно поровну (рис. 204, а).

Придвинем теперь к заряженной пластине нейтральную заземлённую пластину (рис. 204, б). На ближайшей к положительной пластине сторо-

## 204 ▶

*Перераспределение заряда в проводниках. Система двух пластин обладает большей ёмкостью, чем одна пластина*



не в результате действия сил электростатического притяжения начинают скапливаться отрицательные заряды. В то же время с отдалённой стороны пластины положительные заряды стекают на Землю, имеющую значительную электрическую ёмкость.

Отрицательные заряды на заземлённой пластине притягивают дополнительные положительные заряды к положительной пластине от электроскопа. Таким образом, введение дополнительного проводника (заземлённой пластины) существенно нейтрализует положительный заряд и уменьшает потенциал заряженной пластины, т. е. увеличивает её ёмкость.

**Конденсатор — система двух проводников с равными по величине зарядами противоположного знака.**

Одна из особенностей конденсатора заключается в том, что электрическое поле оказывается локализованным в пространстве между проводниками, его составляющими. В конденсаторе накапливается электрический заряд и, соответственно, энергия электростатического поля. Способность конденсатора к накоплению заряда характеризуется его *электрической ёмкостью*.

**Электрическая ёмкость конденсатора — физическая величина, равная отношению заряда положительно заряженного проводника к разности потенциалов между ним и отрицательно заряженным проводником:**

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (147)$$

**Ёмкость плоского конденсатора.** Найдём ёмкость плоского конденсатора (система двух плоскопараллельных пластин площадью  $S$ , находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга).

Будем считать, что пространство между пластинами заполнено воздухом, для которого  $\varepsilon \approx 1$ .

Вычисление электроёмкости сводится к расчёту разности потенциалов  $U$  между пластинами. Так как разность потенциалов связана с напряжённостью электрического поля (см. формулу (145)), зададимся вопросом об электрическом поле заряженной плоскости.

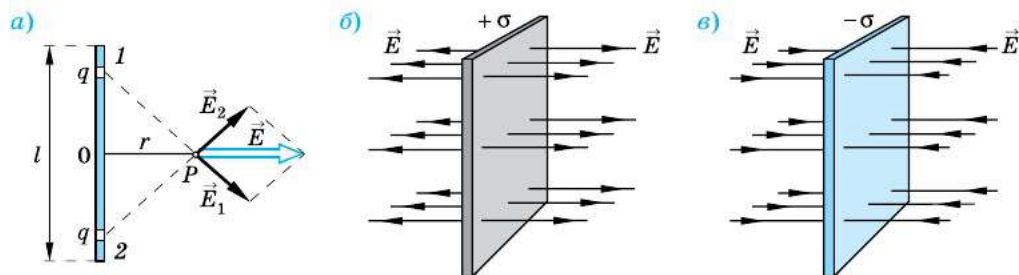
Определим направление напряжённости электростатического поля в непосредственной близости от заряженной плоскости, т. е. на расстоянии  $r$ , значительно меньшем, чем линейный размер плоскости  $l$  ( $r \ll l$ ). На этом расстоянии в точке  $P$  (рис. 205, а) плоскость можно считать бесконечной.

Так, бесконечным кажется невысокий дом, если смотреть на него с очень близкого расстояния.

Предположим, что положительный заряд  $Q$  равномерно распределён по плоскости площадью  $S$ . Характеристикой его распределения по плоскости является *поверхностная плотность заряда*.

**Поверхностная плотность заряда — физическая величина, равная отношению заряда, равномерно распределённого по поверхности площадью  $S$ , к площади:**

$$\sigma = \frac{Q}{S}. \quad (148)$$



### ▲ 205

Линии напряжённости бесконечной заряженной плоскости:

- а — принцип суперпозиции;  
 б — положительно заряженная плоскость;  
 в — отрицательно заряженная плоскость



Единица поверхностной плотности заряда — *кулон на квадратный метр* ( $\text{Кл}/\text{м}^2$ ).

Поверхностная плотность заряда численно равна заряду, находящемуся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности.

Разобьём мысленно положительно заряженную плоскость на пары одинаковых зарядов  $q$ , симметричных относительно точки  $O$ . В произвольной точке  $P$  каждый заряд создаёт электростатическое поле напряжённостью  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  (см. рис. 205, а).

Результирующая напряжённость поля в точке  $P$  от этой пары зарядов направлена перпендикулярно плоскости от неё. Аналогичным будет направление напряжённости поля, созданного другими симметричными парами зарядов в точке  $P$ .

Так как плоскость бесконечна, то можно утверждать, что напряжённость поля в любой точке направлена аналогично.

*Линии напряжённости положительно заряженной бесконечной плоскости направлены от неё перпендикулярно её поверхности* (рис. 205, б).

*Линии напряжённости отрицательно заряженной бесконечной плоскости направлены к ней перпендикулярно её поверхности* (рис. 205, в), так как единичный положительный заряд притягивается к плоскости.

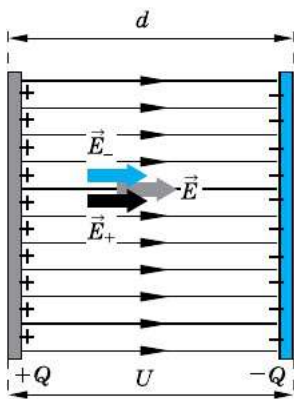
Линии напряжённости электростатического поля параллельны лишь в случае однородного поля. Это означает, что напряжённость поля, созданного бесконечной заряженной плоскостью, постоянна (одинакова на любом расстоянии от плоскости) и зависит лишь от поверхностной плотности заряда  $\sigma$ :

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \quad (149)$$

Приведённое выражение справедливо лишь на малых (по сравнению с размерами плоскости) расстояниях от плоскости.

Напряжённость однородного электростатического поля внутри конденсатора (рис. 206) складывается (по принципу суперпозиции) из напряжённостей полей, созданных положительной  $E_+$  и отрицательной  $E_-$  пластинами. Согласно формуле (149)

$$E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \quad (150)$$



## ▲ 206

*Плоский конденсатор. Конденсатор сосредоточивает электростатическое поле в пространстве между пластинами*

Вне пластин поле отсутствует, так как напряжённости  $E_+$  и  $E_-$  полей компенсируют друг друга. Таким образом, реально *электростатическое поле конденсатора сосредоточено между его пластинами.*

Зная результирующую напряжённость поля в конденсаторе

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad (151)$$

найдем разность потенциалов между пластинами (см. формулу (145)):

$$U = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d, \quad (152)$$

где  $\sigma = Q/S$ .

Подставляя  $U$  в формулу (147), находим *ёмкость плоского воздушного конденсатора:*

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (153)$$

*Ёмкость плоского воздушного конденсатора зависит только от его геометрических характеристик: площади пластин и расстояния между ними.*

Зависимость ёмкости конденсатора от расстояния между его пластинами используется в схемах кодирования клавиатуры персонального компьютера. Под каждой клавишей находится конденсатор, ёмкость которого изменяется при нажатии на клавишу (рис. 207).

Микросхема, подключённая к каждой клавише, при изменении ёмкости выдаёт кодированный сигнал, соответствующий данной букве.

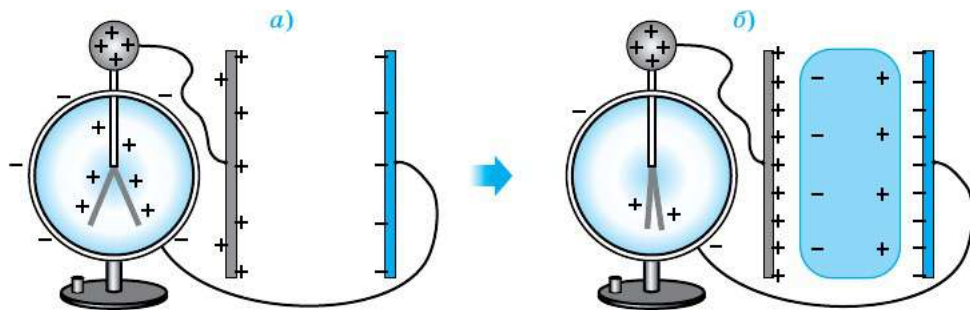
Напряжённость поля в заряженном конденсаторе, отключённом от источника тока, и разность потенциалов между пластинами уменьшаются в  $\epsilon$  раз по сравнению с их значениями в вакууме. Если между пластинами конденсатора поместить диэлектрик с относительной диэлектрической

## 207

*Принцип работы клавиатуры компьютера.*

*При нажатии на клавишу изменяется ёмкость под клавишей и создаётся определённый электрический сигнал*





### ▲ 208

Распределение зарядов в системе электроскоп—пластины:

*а* — до введения диэлектрика;

*б* — после введения диэлектрика

проницаемостью  $\varepsilon$ , то электроёмкость конденсатора с диэлектриком возрастает в  $\varepsilon$  раз по сравнению с электроёмкостью воздушного конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (154)$$

В результате введения диэлектрика в пространство между пластинами конденсатора связанные заряды диэлектрика уменьшают разность потенциалов на обкладках конденсатора и таким образом увеличивают его электроёмкость (рис. 208).

Электроёмкость конденсатора зависит от площади пластин, расстояния между ними, а также от относительной диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего пространство между пластинами, и не зависит от заряда на пластинах и разности потенциалов, приложенной к ним.

Электроёмкость конденсатора не зависит от внешнего электростатического поля, не проникающего внутрь конденсатора.

Обычный конденсатор устроен так: две длинные ленты металлической фольги, разделённые изолирующими лентами из тонкой пластмассы, скручены в тугую спираль и герметично запаяны.

### В О П Р О С Ы

1. Какую систему проводников называют конденсатором?
2. Сформулируйте определение электроёмкости конденсатора.
3. Как зависит электроёмкость плоского конденсатора от его геометрических размеров?



- Почему введение диэлектрика увеличивает ёмкость конденсатора? Во сколько раз увеличивается ёмкость конденсатора при введении диэлектрика?
- Почему ёмкость конденсатора не зависит от внешних электростатических полей?

### З А Д А Ч И

- Заряд  $Q = +6 \cdot 10^{-4}$  Кл на пластинах плоского конденсатора создаёт разность потенциалов между пластинами  $U = 200$  В. Определите ёмкость конденсатора.
- Найдите толщину слоя диэлектрика ( $\epsilon = 4$ ), занимающего весь объём между пластинами плоского конденсатора ёмкостью  $C = 1$  пФ. Площадь каждой пластины  $S = 1$  см<sup>2</sup>.
- Какую площадь должны иметь пластины плоского воздушного конденсатора для того, чтобы его ёмкость была равна 1 пФ? Расстояние между пластинами 0,5 мм. Как изменится результат, если пространство между пластинами заполнить слюдой с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 7?

## § 68. Энергия электростатического поля

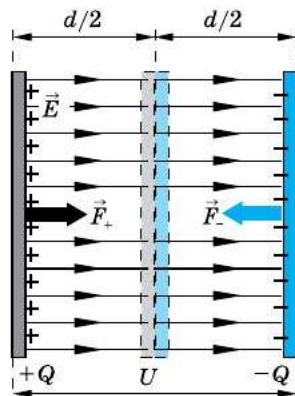
**Потенциальная энергия пластин конденсатора.** Работа, совершаемая при разделении положительных и отрицательных зарядов, сообщаемых пластинам конденсатора, равна энергии, приобретаемой конденсатором. (Аналогично работа по растяжению упругой пружины переходит в накопленную ею потенциальную энергию силы упругости.) Лампочка карманного фонаря, подключённая к пластинам заряженного конденсатора, вспыхивает. Этим подтверждается наличие энергии конденсатора.

Положительная и отрицательная пластины площадью  $S$ , расстояние между которыми  $d$ , притягиваются одна к другой, обладая определённой потенциальной энергией (рис. 209).

Рассчитаем энергию электростатического поля, накопленную конденсатором, если заряды на его пластинах  $+Q$  и  $-Q$ , а разность потенциалов между ними  $U$ .

Энергия электростатического поля, запасённая конденсатором, подобна энергии, накопленной сжатой пружиной.

Силы кулоновского притяжения  $F_+$  и  $F_-$ , действующие на каждую пластину, определяются



### ▲ 209

*Потенциальная энергия пластин конденсатора*

напряжённостью поля, созданной противоположной пластиной:

$$E_+ = E_- = \frac{1}{2} E = \frac{1}{2} \frac{U}{d}. \text{ Следовательно,}$$

$$F_+ = F_- = Q \cdot \frac{1}{2} \frac{U}{d}. \quad (155)$$

Под действием сил кулоновского притяжения пластины, предоставленные сами себе, схлопнутся. Считая их конечную энергию равной нулю, получаем, что работа сил электростатического поля равна начальной потенциальной энергии пластин:

$$A = W.$$

Найдём работу по перемещению каждой пластины на расстояние  $d/2$  в центр конденсатора:

$$A_+ = F_+ \cdot \frac{d}{2}, \quad A_- = F_- \cdot \frac{d}{2}.$$

Полная работа и потенциальная энергия сил электростатического поля равна

$$A = A_+ + A_- = \frac{QU}{2} = W.$$

Зная электроёмкость (см. формулу (147)), получаем энергию электростатического поля, запасённую в конденсаторе:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}. \quad (156)$$

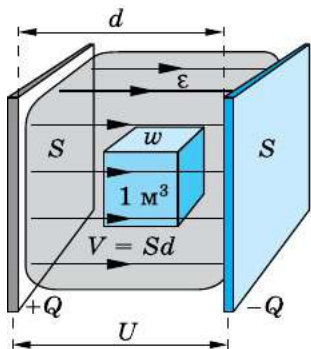
Потенциальная энергия электростатического поля плоского конденсатора с учётом выражения (154) имеет вид

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d}. \quad (157)$$

**Объёмная плотность энергии электростатического поля.** Концентрация энергии электростатического поля в пространстве характеризуется *объёмной плотностью энергии поля*.

**Объёмная плотность энергии электростатического поля — физическая величина, равная отношению энергии электростатического поля, сосредоточенного в объёме, к этому объёму:**

$$w = \frac{W}{V}. \quad (158)$$



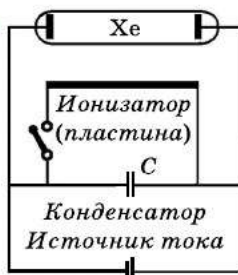
## ▲ 210

*Объёмная плотность энергии электростатического поля*

а)



б)



## 211

Электрическая лампа-вспышка:

а — общий вид;

б — принципиальная электрическая схема

Единица объёмной плотности — джоуль на кубический метр (Дж/м<sup>3</sup>).

Джоуль на кубический метр равен объёмной плотности энергии однородного электростатического поля, в 1 м<sup>3</sup> которого содержится энергия 1 Дж.

Используя выражения для объёма конденсатора  $V$  (рис. 210) и потенциальной энергии  $W$  (157), находим объёмную плотность энергии:

$$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2},$$

где  $E = \frac{U}{d}$  — напряжённость поля в конденсаторе.

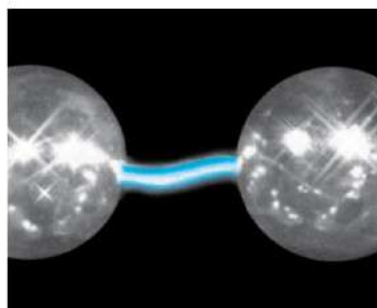
Объёмная плотность энергии электростатического поля пропорциональна квадрату напряжённости поля.

Энергия электростатического поля, запасённая заряженным конденсатором, вызывает электрический разряд в лампе-вспышке, сопровождающийся мощным излучением (рис. 211).

При значительной плотности энергии электростатического поля возникает атмосферный разряд (рис. 212).

## 212

Атмосферные разряды, возникающие при объёмной плотности энергии электростатического поля 40—50 Дж/м<sup>3</sup>





## В О П Р О С Ы

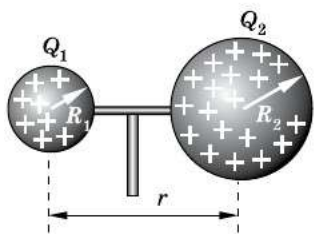
1. Почему схлопываются пластины плоского конденсатора, предоставленные сами себе?
2. От каких величин зависит энергия электростатического поля, запасённая конденсатором?
3. Сформулируйте определение объёмной плотности энергии электростатического поля.
4. Как объёмная плотность энергии зависит от напряжённости электростатического поля?
5. Приведите примеры использования энергии электростатического поля.

## З А Д А Ч И

1. Рассчитайте энергию электростатического поля конденсатора ёмкостью 0,1 мкФ, заряженного до разности потенциалов 200 В.
2. Энергия электростатического поля плоского конденсатора 2 мДж, расстояние между пластинами 0,5 мм. Найдите силы притяжения пластин друг к другу.
3. Пластины плоского конденсатора, электроёмкость которого  $C$ , имеют заряды  $+Q$  и  $-Q$ . Какая работа совершается внешними силами при увеличении расстояния между пластинами в 3 раза?

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Две проводящие сферы радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , находящиеся на значительном расстоянии  $r$  ( $r \gg \{R_1, R_2\}$ ) друг от друга, имели заряды  $Q_1$  и  $Q_2$  (рис. 213). Как перераспределятся заряды  $q_1$  и  $q_2$  между сферами после соединения сфер тонким проводником-перемычкой?



#### **Решение.**

Равновесие зарядов установится тогда, когда сила, действующая на заряды в перемычке, будет равна нулю, соответственно будет равна нулю и напряжённость поля в ней. При этом разность потенциалов между сферами равна нулю, а потенциалы сфер равны друг другу:  $\varphi_1 = \varphi_2$ , т. е.

$$\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2}.$$

Суммарный заряд ( $q_1 + q_2$ ) сфер после их соединения по закону сохранения электрического заряда остаётся тем же, что и до их соединения:

$$Q_1 + Q_2 = q_1 + q_2.$$

### ▲ 213

*Заряд на сферах перераспределяется пропорционально радиусу сфер*

Чтобы найти заряды  $q_1$  и  $q_2$ , выразим заряд  $q_2$  из первого уравнения:

$q_2 = q_1 \frac{R_2}{R_1}$ . Подставим  $q_2$  в закон сохранения электрического заряда:

$$Q_1 + Q_2 = q_1 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Тогда

$$q_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_1, \quad q_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_2.$$

Видно, что заряд на сферах перераспределяется пропорционально радиусу сфер.

**Ответ:**  $q_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_1, \quad q_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_2.$

### Т В О Р Ч Е С К И Е   З А Д А Н И Я

1. Что можно считать энергетической характеристикой человека?
2. В каких устройствах используются конденсаторы или их соединения? Объясните их предназначение.
3. В чём общность и различие конденсаторов и аккумуляторов?

### О С Н О В Н Ы Е   П О Л О Ж Е Н И Я

■ **Электростатическое поле** потенциально.

■ **Работа сил электростатического поля** при перемещении заряженной частицы из одной точки в другую не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения частицы.

■ **Потенциальная энергия точечного заряда**  $+q$ , находящегося на расстоянии  $r$  от неподвижного точечного заряда  $+Q$ ,

$$W_q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}.$$

■ **Потенциал электростатического поля** в данной точке — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии, которой обладает пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_{q_0}}{q_0}.$$

Единица потенциала — *вольт* (В):

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}.$$

■ **Потенциальная энергия заряда**  $q$  в точке, имеющей потенциал  $\varphi$ :

$$W_q = q\varphi.$$

**Эквипотенциальная поверхность** — поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение.

Линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям и направлены от поверхности с бóльшим потенциалом к поверхности с меньшим.

**Работа сил электростатического поля** равна произведению модуля перемещаемого заряда и разности потенциалов в начальной и конечной точках:

$$A_q = qU.$$

**Разность потенциалов в однородном электростатическом поле** между двумя точками, находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга вдоль линии напряжённости  $\vec{E}$ :

$$U = Ed.$$

**Ёмкость конденсатора** — физическая величина, равная отношению заряда положительно заряженного проводника к разности потенциалов между ним и отрицательно заряженным проводником:

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Ёмкость плоского конденсатора с диэлектриком:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  — площадь пластин конденсатора,  $d$  — расстояние между ними,  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Единица ёмкости — *фарад* (Ф):

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}.$$

**Энергия электростатического поля**, запасённая в конденсаторе ёмкостью  $C$ ,

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C},$$

где  $U$  — разность потенциалов между пластинами конденсатора,  $Q$  — заряд конденсатора.

**Объёмная плотность энергии электростатического поля** пропорциональна квадрату напряжённости поля:

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}.$$





## Абсолютная и относительная погрешности

*Результат измерения* физической величины всегда отличается от её *истинного значения*, наиболее точно отражающего соответствующую физическую характеристику.

Результат измерения — значение физической величины, найденное экспериментально.

*При прямых измерениях* отклонение результата измерения величины от её истинного значения вызывают следующие факторы:

1) ограниченная точность измерительного прибора, связанная с несовершенством его конструкции и определяемая ценой деления шкалы прибора;

2) непостоянство внешних условий опыта (например, колебания температуры и давления воздуха);

3) несовершенные действия экспериментатора (например, запаздывание включения секундомера, ошибочный отсчёт длины из-за несовпадения положения уровня глаз наблюдателя и делений на шкале прибора).

*При косвенных измерениях* отклонение результата измерения величины от её истинного значения является следствием таких факторов, как:

1) неточность метода измерений, т. е. идеализация условий протекания эксперимента (например, при изучении движения тела не учитывается сопротивление воздуха);

2) неполное соответствие исследуемого объекта используемой упрощённой физической модели (например, измеряемый брусок может не быть идеальным параллелепипедом из-за наличия закруглений на рёбрах и вершинах).

*Точность измерения* определяется близостью измеренного значения физической величины к истинному. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называют *погрешностью измерений*. Качество измерений физической величины характеризуют *абсолютной* и *относительной погрешностью*.

*Абсолютная погрешность* при однократном прямом измерении равна приборной погрешности ( $\Delta a = \Delta a_{\text{пр}}$ ), если стрелка прибора совпадает со

штрихом шкалы. При несовпадении положения стрелки прибора и штриха шкалы необходимо к приборной погрешности добавить погрешность отсчёта, граница которой равна половине цены деления шкалы прибора.

*Приборная* (инструментальная) *погрешность* — погрешность средства измерения. Абсолютную погрешность выражают в единицах измеряемой величины. Чем меньше абсолютная погрешность измерения, тем точнее оно выполнено.

Результат однократного прямого измерения принято записывать в виде

$$a = a_{\text{изм}} \pm \Delta a, \quad (1)$$

где  $a_{\text{изм}}$  — измеренное значение физической величины  $a$ ,  $\Delta a$  — абсолютная погрешность измерения.

Двойной знак  $\pm$  перед абсолютной погрешностью означает, что истинное значение измеряемой величины лежит в интервале  $(a_{\text{изм}} - \Delta a, a_{\text{изм}} + \Delta a)$ .

*Относительная погрешность* при однократном прямом измерении — безразмерная физическая величина, равная отношению абсолютной погрешности к измеренному значению физической величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_{\text{изм}}}. \quad (2)$$

Часто при повторении опытов результаты измерения отличаются друг от друга. В этом случае, как вам известно из курса математики, в формуле (2) качестве значения физической величины принимают среднее арифметическое значение измеряемой величины

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}, \quad (3)$$

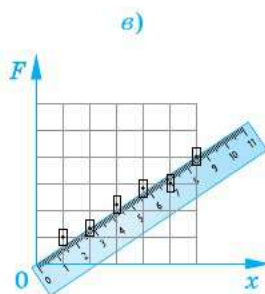
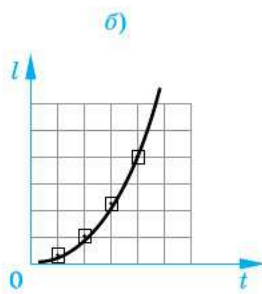
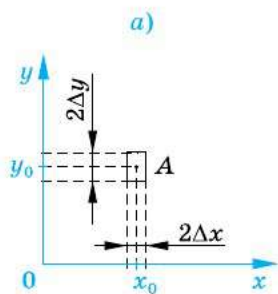
где  $n$  — число измерений.

При вычислении погрешностей целесообразно пользоваться инженерным непрограммируемым калькулятором, например  $fx - 82ES$ .

**Построение графиков по результатам измерений** с учётом погрешностей производится следующим образом. Каждой паре значений физических величин на графике будет соответствовать некоторая область, определяемая значениями погрешностей измерений. Поэтому в результате измерений величин  $x$  и  $y$  вместо геометрических точек на координатной плоскости получаются прямоугольники со сторонами  $2\Delta x$  и  $2\Delta y$  (рис. 214, а).

Линию следует проводить оптимальным образом через области, прилегающие к этим точкам, т. е. через «прямоугольники погрешностей» (рис. 214, б).

При исследовании линейных зависимостей целесообразно пользоваться прозрачной линейкой (рис. 214, в).



▲ 214



## 1

# Исследование скольжения шайбы по наклонной плоскости

■ **Цель работы:** описать движение шайбы на разгонном участке и при торможении; сравнить ускорения шайбы при разгоне и торможении; проиллюстрировать графически процессы разгона и торможения.

■ **Оборудование, средства измерения:** 1) шайба металлическая диаметром 3—5 мм, 2) наклонная плоскость (например, изготовленная из кабель-канала), 3) лента измерительная.

## Теоретическое обоснование

Экспериментальная установка для исследования скольжения шайбы изображена на рисунке 215.

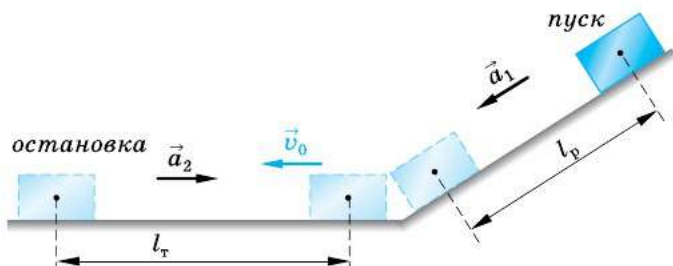
Конечная скорость  $v_0$  шайбы после разгона по наклонной плоскости (рис. 216) равна начальной скорости процесса торможения. Воспользовавшись формулой, которая связывает скорость с путём с учётом того, что начальная скорость разгона и конечная скорость торможения равны нулю, относительно просто доказать, что отношение ускорений обратно пропорционально путям разгона и торможения.

## Порядок выполнения работы

1. Докажите, что отношение ускорений  $a_1$  и  $a_2$  при разгоне и торможении обратно пропорционально путям разгона и торможения.



▲ 215



▲ 216

2. Измерьте длину разгона  $l_p$  (см. рис. 216). Проведите пять пусков шайбы из одного и того же места с верхнего торца наклонной плоскости и измерьте тормозные пути  $l_t$  при каждом пуске.

3. Результаты всех измерений занесите в таблицу 18.

Таблица 18

№ опыта	1	2	3	4	5
$l_p$ , м					
$l_t$ , м					

4. Найдите отношения ускорений при разгоне и торможении.

5. Постройте качественный график зависимости скорости движения шайбы от пройденного пути.

6. Сделайте вывод, постарайтесь ответить на все вопросы, сформулированные в целях работы.

## 2

# Измерение коэффициента трения скольжения

■ **Цель работы:** исследовать зависимость силы трения скольжения от силы нормального давления; построить график зависимости силы трения скольжения от силы нормального давления.

■ **Оборудование, средства измерения:** 1) деревянный брусок, 2) набор грузов, 3) динамометры с пределом измерения 4 Н (5 Н) и 1 Н, 4) деревянная линейка.

## Теоретическое обоснование

Деревянный брусок, на котором сверху помещаются грузы, присоединён к динамометру.

При приложении к динамометру внешней силы брусок может перемещаться по горизонтально расположенной деревянной линейке. При равномерном движении бруска его ускорение равно нулю. Согласно второму закону Ньютона геометрическая сумма сил, действующих на брусок в этом случае, также равна нулю. Это означает, что сила трения скольжения уравновешивает силу растяжения пружины динамометра и может быть измерена динамометром.

Коэффициент трения скольжения определяется как коэффициент пропорциональности между силой трения  $F_{\text{тр}}$  и силой нормального давления  $F_{\perp}$  бруска с грузами на опору (или весом  $P$  тела):  $\mu = \frac{F}{P}$ .

## Порядок выполнения работы

1. С помощью динамометра определите вес деревянного бруска  $P_0$ , бруска вместе с одним грузом ( $P_0 + P$ ), бруска с двумя грузами ( $P_0 + 2P$ ), бруска с тремя грузами ( $P_0 + 3P$ ). Результаты занесите в таблицу 19 (в строку  $P$ ).

Таблица 19

Число грузов	0	1	2	3
$P$ , Н				
$F_{\text{тр}}$ , Н				



2. Динамометром равномерно тяните брусок по линейке, измеряя силу трения  $F_{\text{тр}}$ , равную силе упругости пружины. Опыт повторите, нагрузив брусок одним, потом двумя и тремя грузами. Результаты измерений занесите в таблицу 19 (в строку  $F_{\text{тр}}$ ).

3. Используя данные таблицы 19, постройте график зависимости  $F_{\text{тр}}$  ( $P$ ). Результаты измерений откладывайте на координатной плоскости с учётом погрешности, считая, что при измерении веса она равна половине цены деления шкалы динамометра. При измерении силы трения стрелка динамометра обычно колеблется, тогда погрешность измерения силы трения равна цене деления шкалы динамометра.

4. Найдите коэффициент трения скольжения  $\mu$ . Для этого выберите произвольную точку с координатами ( $P$ ,  $F_{\text{тр}}$ ) на прямой и найдите  $\mu$  как отношение  $\mu = \frac{F}{P}$ .

## 3

## Исследование динамики движения бруска по наклонной плоскости<sup>1</sup>

■ **Цель работы:** проверить гипотезу «время перемещения бруска на одно и то же расстояние уменьшается, если на брусок поставить дополнительный груз, так как при увеличении массы ускорение уменьшается»; определить ускорение; определить равнодействующую сил, действующих на брусок; сравнить равнодействующую сил с произведением  $ma$ .

■ **Оборудование, средства измерения:** 1) груз, 2) брусок с пусковым магнитом, 3) секундомер с датчиками, 4) штатив с муфтой и лапкой, 5) направляющая, 6) динамометр.

### Порядок выполнения работы

1. Соберите установку, используя рисунок 217. При прохождении бруском первого датчика его пусковой магнит включает секундомер. Когда брусок проходит мимо второго датчика, секундомер выключается.

2. Для проверки гипотезы необходимо сначала провести серию из пяти пусков бруска с верхнего торца наклонной плоскости при определенном, но произвольном положении датчиков. Измеряйте время  $\Delta t_1$  движения бруска между датчиками.



◀ 217

<sup>1</sup> Описание составлено совместно с О. А. Поваляевым на оборудовании «ФГОС-лаборатория НР».

3. Установите на брусок груз, и проведите еще одну серию из пяти пусков (положения датчиков не изменять). Измеряйте время  $\Delta t_2$  движения бруска между датчиками.

4. Результаты всех измерений занесите в таблицу 20.

Таблица 20

№ опыта	1	2	3	4	5
$\Delta t_1$ , с					
$\Delta t_2$ , с					

5. Сравните средние значения времени движения.

6. Сделайте вывод о статусе проверяемой гипотезы.

При формулировке вывода учтите, что измерение времени сопровождается значительными случайными погрешностями и тот факт, что масса изменилась в 2 раза. Объясните результат проверки гипотезы, проанализировав все силы, действующие на брусок и их зависимость от массы.

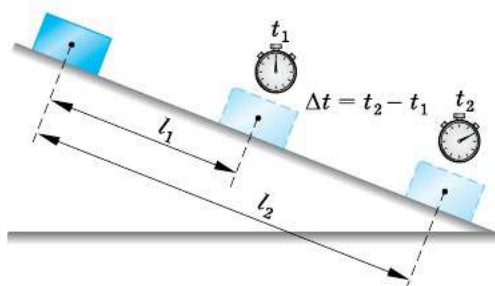
7. Определите по линейке направляющей расстояния  $l_1$  и  $l_2$  от начального положения пускового магнита бруска до первого и второго датчиков соответственно.

8. Определите ускорение бруска (рис. 218) по формуле

$$a = \frac{2(\sqrt{l_2} - \sqrt{l_1})^2}{\Delta t^2},$$

$\Delta t$  — среднее время движения бруска между датчиками.

9. Определите массу бруска с помощью динамометра. Пользуясь вторым законом Ньютона, рассчитайте равнодействующую силу, действующую на брусок.





**10.** Измерьте динамометром равнодействующую силу. Для этого, прикрепив динамометр к крючку бруска, равномерно перемещайте брусок вниз по наклонной плоскости. Сравните результат измерения с результатом, полученным в пункте 9.

**11.** Сделайте вывод.

4

## Исследование закона сохранения энергии при действии силы упругости и силы тяжести

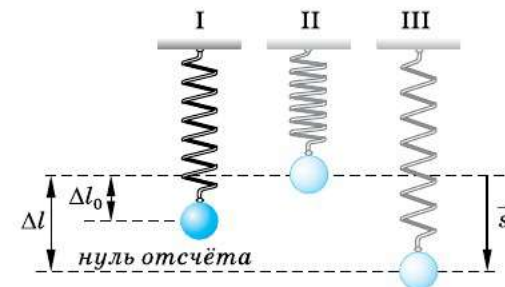
**Цель работы:** научиться применять законы физики для объяснения явлений; проверить гипотезу: «растяжение пружины падающим грузом в 2 раза больше, чем под действием висящего на ней неподвижно груза».

**Оборудование, средства измерения:** 1) динамометр, 2) штатив лабораторный с муфтой и лапкой, 3) груз массой 100 г — 1 шт., 4) линейка измерительная, 5) фиксатор, вырезанный из плотной бумаги.

### Теоретическое обоснование

На рисунке 219 показан динамометр с висящим на пружине грузом 100 г. Поднимем груз так, чтобы пружина оказалась в недеформированном состоянии. Каким с точки зрения закона сохранения энергии должно оказаться максимальное растяжение пружины, если отпустить груз?

Пусть начальное и максимальное растяжения пружины равны соответственно  $\Delta l_0$  и  $\Delta l$  (рис. 220). Применяя закон сохранения энергии, можно выбирать любые два состояния, ориентируясь только на простоту расчётов энергии. В данном случае за нуль отсчёта потенциальной энергии



▲ 219

▲ 220

удобно принять положение с максимальным отклонением груза. При написании уравнения следует учесть равенство деформации  $\Delta l$  пружины и перемещения  $s$  груза.

### ■ Порядок выполнения работы

1. Покажите, пользуясь законом сохранения механической энергии, что равенство  $\frac{\Delta l}{\Delta l_0} = 2$  верно.
2. Соберите экспериментальную установку (см. рис. 219). Измерьте линейкой деформацию пружины  $\Delta l_0$ .
3. Поднимите груз так, чтобы пружина оказалась в недеформированном состоянии.
4. Проведите пять опытов. Результаты всех измерений и вычислений занесите в таблицу 21.

Таблица 21

№ опыта	$\Delta l$ , мм	$\Delta l_0$ , мм	$\Delta l_{\text{ср}}$ , мм	$\frac{\Delta l_{\text{ср}}}{\Delta l_0}$
1				
2				
3				
4				
5				

5. Сделайте вывод в соответствии с целью работы.



5

## Изучение процесса установления теплового равновесия между горячей и холодной водой при теплообмене

**Цель работы:** исследовать переход замкнутой системы в состояние теплового равновесия.

**Оборудование, средства измерения:**

1) калориметр, 2) термометр — 2 шт.; 3) сосуды с горячей и холодной водой, 4) прищепка — 2 шт., 5) стаканчик, 6) часы.

**Порядок выполнения работы**

1. Экспериментальная установка показана на рисунке 221, а.

В калориметр поместите стаканчик. В него налейте горячую воду. Во внутренний стакан калориметра налейте холодную воду. Установите термометры так, чтобы один из них измерял температуру холодной воды при теплообмене, другой — температуру горячей воды (рис. 221, б).

2. Через равные промежутки времени определяйте показания термометров.

3. Результаты измерений запишите в таблицу 22.

4. Постройте в одной системе координат графики зависимости от времени температуры горячей и холодной воды.

а)



б)

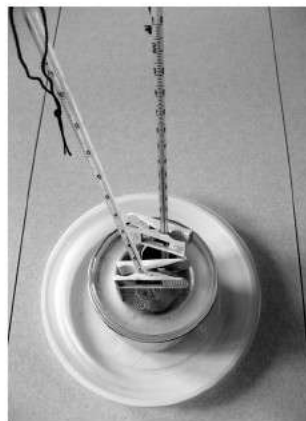


Таблица 22

Время $\tau$ , с							
$t_{\text{гор}}$ , °C							
$t_{\text{хол}}$ , °C							

5. Сделайте вывод в соответствии с целью исследования.

## 6 Энергия заряженного конденсатора

■ **Цель работы:** зарядить конденсатор и наблюдать преобразования энергии электрического поля в энергию излучения светодиода.

■ **Оборудование, средства измерения:** 1) конденсатор на панели — 2 шт., 2) батарейка типа «Крона» с напряжением 9 В, 3) светодиод, 4) выключатель, 5) проводник — 3 шт., 4) зажимы типа «крокодил».

■ **Порядок выполнения работы**

1. Начертите схему электрической цепи, представленной на рисунке 222. Обозначьте на ней полярность выводов конденсатора.

2. Используя значение ёмкости  $C$  конденсатора (указано на конденсаторе) рассчитайте энергию  $W$  электрического поля конденсатора, которой он будет обладать при полной зарядке, по формуле  $W = \frac{CU^2}{2}$ .

3. Соберите электрическую цепь.

Обратите внимание: нельзя подключать светодиод непосредственно к батарейке, сначала необходимо зарядить конденсатор.

4. Подключите заряженный конденсатор к светодиоду с соблюдением полярности, обозначенной на светодиоде, и замкните цепь. Пронаблюдайте вспышку светодиода.

5. Повторите п. 2—4 для второго конденсатора.

6. Объясните свои наблюдения.





## Ответы к задачам

### Глава 2

§ 7. 2. 880 км/ч. 3. 120 км/ч.

§ 8. 3. 2 ч; 300 км.

§ 10. 1. 5 с; 62,5 м. 3. 6,25 м/с<sup>2</sup>; 50 м.

§ 12. 1. 29,9 км/с. 2. 943 км/ч. 3. 0,16 мм/с<sup>2</sup>;  $3 \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup>;  $1,06 \cdot 10^{-10}$  м/с<sup>2</sup>.

### Глава 3

§ 15. 1.  $a = 5$  м/с<sup>2</sup>. 2. На север; 20 Н. 3.  $a = 3$  м/с<sup>2</sup>; 36,87°; на северо-восток.

§ 17. 1.  $1,47 \cdot 10^{11}$ . 2.  $F_3/F_C = 0,47$ . 3. 1 ч 36 мин.

§ 18. 1. В 2,65 раза. 2. 39,2 м/с<sup>2</sup>. 3. В 81 раз.

§ 19. 1. 7 мм. 2.  $F\sqrt{2}$ . 3.  $2,7 \cdot 10^4$  Н/м.

§ 20. 2. 5,1 кг. 3. 245 Н.

§ 21. 1. 50 с. 2.  $a = \frac{F}{m+M}$ ,  $x = \frac{F}{k} \cdot \frac{m}{m+M}$ . 3.  $a = 0,1$  м/с<sup>2</sup>; 5980 Н; 11960 Н.

### Глава 4

§ 22. 2. Юго-восток;  $7,07 \cdot 10^4$  кг·м/с. 3. 6 кг·м/с.

§ 23. 1. Северо-запад; 14,14 кг·м/с. 2. На восток; 100 м/с. 3.  $l \frac{m}{m+M} =$

$= 1,4$  м.

§ 24. 1. 6 Дж. 2. 4,9 кДж. 3. 100 кДж.

§ 25. 1. 2 кВт. 2. 20 Вт. 3. 1470 МВт.

§ 26. 1. 1 м. 2. 3,92 кДж. 3. -980 Дж.

§ 27. 1. Увеличивается в 2 раза. 2. 8 Дж. 3. 1,8 ГДж.

§ 28. 1. 20,4 м. 2. 47,7 м. 3. 11,1 м/с.

§ 29. 2. 2 м/с. 3.  $v + 2u$ .

### Глава 5

§ 31. 1.  $\sqrt{2}$ . 2. 0,125 Гц. 3.  $v_0/2\pi v_0$ .

§ 32. 1. 2 см. 2. 980 Н/м; 0,28 с. 3. 4 см.

### Глава 7

§ 38. 1.  $8,2 \cdot 10^{-14}$  Дж. 2.  $m_e = 0,511$  МэВ;  $m_p = 938,3$  МэВ. 3. 2,224 МэВ.

### Глава 9

§ 43. 1. 39 °С — 164 °С. 2. 427 м/с. 3. 130 К.

§ 44. 2. 1,21 кг/м<sup>3</sup>. 3. 53,6 кПа.

§ 45. 1. Увеличится в 6 раз. 2.  $2,3 \cdot 10^{23}$  м<sup>-3</sup>. 3.  $2,5 \cdot 10^{28}$ .

§ 46. 1. 10,3 м. 2. 300 К. 3. 27 °С.

### Глава 10

§ 47. 1. 519 МДж. 2. 75 Дж. 3.  $5 \cdot 10^4$  Па.

§ 48. 1. 2,08 кДж. 2. 16,6 кДж. 3. 9 кДж.

§ 49. 1. 295 кДж. 2.  $2,41 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>; 580 К; 3,6 кДж. 3. 5 кДж; 3 кДж.

### Глава 11

§ 53. 1. 440 Гц. 2. 6 км/с. 3.  $v_1/v_2 = 0,5$ .

§ 54. 1. 17 мм — 21,4 м. 2. 3,43 мм; 1,5 мм. 3.  $v_0 = v + \frac{gH}{2v} = 353$  м/с.

### Глава 12

§ 57. 1.  $+1,47 \cdot 10^{-17}$  Кл;  $-1,47 \cdot 10^{-17}$  Кл. 2. 3 млн. 3. +480 Кл; -480 Кл.

§ 58. 1. 0,1 Н. 2.  $10^{-5}$  Кл. 3. 4,9 мкКл.

§ 59. 1. 0,6 Н. 2.  $5,13 \cdot 10^{11}$  Н/Кл;  $8,2 \cdot 10^{-8}$  Н. 3.  $2,28 \cdot 10^{22}$  м/с<sup>2</sup>.

§ 60. 1. 0;  $1,44 \cdot 10^7$  Н/Кл. 2.  $4,4 \cdot 10^{10}$  Н/Кл. 3.  $5,74 \cdot 10^3$  Н/Кл.

§ 62. 1. 125 Н/Кл; 1,6 Н/Кл. 2. 25. 3. 1 мкКл.

### Глава 13

§ 64. 1.  $-4,4 \cdot 10^{-18}$  Дж. 2. 10 м. 3.  $5,6 \cdot 10^{-11}$  Н/Кл.

§ 65. 1. 11 кВ/м. 2.  $5,9 \cdot 10^5$  м/с. 3. 2,4 см; 47 нс.

§ 67. 1. 3 мкФ. 2. 3,5 мм. 3. 56,5 мм<sup>2</sup>; 8,1 мм<sup>2</sup>.

§ 68. 1. 2 мДж. 2. 4 Н. 3.  $A = Q^2/C$ .

# Предметно-именной указатель

- А**бсолютно твёрдое тело 127  
Абсолютный нуль температуры 169  
Агрегатное состояние вещества 153  
— газообразное 157  
— жидкое 155  
— плазменное 157  
— твёрдое 154  
Адрон 9  
Акустика 213  
Амплитуда колебаний 120  
— — **вынужденных** 123  
Атомистическая гипотеза 8  
Атомная единица массы 151
- Б**ойль Р. 36
- В**айнберг С. 12  
Ватт (единица мощности) 94  
Вес тела 70  
Волна механическая 204  
— гармоническая 209  
— звуковая 212  
— — **линейно-поляризованная** 211  
— — поперечная 207  
— — продольная 206  
Волновой процесс 204  
Вольт (единица электрического потенциала) 253  
Время 4  
Высота звука 213
- Г**алилей Г. 3  
Герц (единица частоты) 40  
Глэшоу Ш. 12  
Горизонт событий 137  
Гравитационная постоянная 63  
Гюйгенс Х. 36
- Д**авление идеального газа 173  
Дальтон Дж. 8  
**Движение аperiodическое** 122  
— вращательное 38  
— колебательное 38  
— периодическое 38  
— по инерции 48  
— равнозамедленное прямолинейное 32  
— равномерное прямолинейное 25  
— равнопеременное прямолинейное 34  
— равноускоренное прямолинейное 38  
Демокрит 8  
Дефект массы 150  
Джоуль (единица работы) 90  
Динамика 48  
Диффузия 199  
Диэлектрик 240  
— неполярный 241  
— полярный 241  
Длина волны 209  
Доплер К. 216



- З**акон Архимеда 130  
— Бойля—Мариотта 177  
— всемирного тяготения 62  
— Гей-Люссака 179  
— Гука 69  
— Дальтона 174  
— движения 15  
— изменения механической энергии 103  
— Кулона 231  
— Ньютона первый 53  
— — второй 58  
— — третий 60  
— равнозамедленного прямолинейного движения 32  
— равномерного прямолинейного движения 26  
— равнопеременного прямолинейного движения 34  
— равноускоренного прямолинейного движения 30  
— сложения скоростей 51  
— — — **релятивистский** 141  
— сохранения импульса 87  
— — механической энергии 104  
— — электрического заряда 229  
— Шарля 180  
Замкнутая система 86  
Замкнутый процесс (цикл) 196  
Зарядовое число 149  
Звук 212
- И**деальный газ 162  
Изобарный процесс 178  
Изопроецесс 176  
Изотермический процесс 176  
Изотоп 149  
Изохорный процесс 179  
Импульс силы 84  
— тела 84
- Инертность 55  
Инерциальные системы отсчёта 49  
Инерция 48  
Ионизация 158
- К**авендиш Г. 62  
Кварк 9  
Кельвин (единица термодинамической температуры) 169  
Кинематика 14  
— периодического движения 38  
Колебания **вынужденные** 117  
— гармонические 44  
— **затухающие** 121  
— свободные (собственные) 117  
Количество теплоты 187  
Конденсатор 261  
Консервативная система 103  
КПД теплового двигателя 197  
Кратные и дольные единицы 4  
Кулон (единица электрического заряда) 223  
Кулон Ш. 230
- Л**ептон 9  
Линии напряжённости электростатического поля 237
- М**айкельсон А. 134  
Макроскопические параметры 164  
Масса тела 56  
Массовое число 149  
Материальная точка 15  
Механическая модель кристалла 66  
Механическое движение 15  
Микроскопические параметры 164  
Модель в физике 7

- Моль (единица количества вещества) 152  
Момент силы 131  
Морли Э. 134  
Мощность средняя 94  
— мгновенная 94
- Напряжённость электростатического поля** 234  
— — — заряженной плоскости 263  
— — — точечного заряда 235  
Невесомость 78  
Нейтрон 9  
Необратимый процесс 199  
Ньютон (единица силы) 56  
Ньютон И. 6
- Обратимый процесс** 199  
**Объёмная плотность энергии электростатического поля** 266  
**Одновременность событий** 140  
Органы чувств 4  
Основное уравнение МКТ 173  
Относительная атомная масса 152  
— диэлектрическая проницаемость среды 243
- Падение тел в воздухе** 36  
— — без сопротивления воздуха 35  
Перегрузка 77  
Перемещение 18  
Период 38  
— вращения 39  
— колебаний 119  
Плазма 158  
**Плоскость поляризации** 211  
Поверхностная плотность заряда 261
- Поверхностное натяжение 157  
Полупроводник 240  
**Поляризатор** 211  
**Поляризация** 210  
— диэлектрика 242  
**Порядок следования событий** 139  
Постоянная Авогадро 153  
— Лошмидта 174  
Потенциал электростатического поля 252  
Преобразования Галилея 50  
Принцип минимума потенциальной энергии 98  
— относительности Галилея 52  
— суперпозиции сил 57  
— — электростатических полей 236  
Проводник 240  
Протон 9  
Путь 19
- Работа силы** 89  
— электростатического поля 255  
Радиус-вектор 16  
Радиус действия взаимодействия 11  
— Шварцшильда 136  
Разность потенциалов 255  
**Распределение молекул по скоростям** 167  
Реактивное движение 88  
Резерфорд Э. 9  
**Резонанс** 123
- Салам А.** 12  
Сила 55  
— гравитационного притяжения 62  
— натяжения 68  
— потенциальная 96

- реакции опоры 67
- трения 72
- — качения 75
- — покоя 72
- — скольжения 73
- тяжести 64
- упругости 66
- Система отсчёта 16
- Скорость
  - вторая космическая 115
  - мгновенная 23
  - относительная 24
  - первая космическая 113
  - света 136
  - средняя путевая 21
  - средняя квадратичная 170
- Сложение перемещений 19
- Специальная теория относительности 135
  - первый постулат 135
  - второй постулат 136
- Статистический метод 163
- Тело отсчёта 15**
- Температура идеального газа 168
- Теорема о кинетической энергии 101
- Тепловой двигатель 195
- Теплообмен 187
- Термодинамика 186
  - первый закон 192
  - второй закон 200
  - — — (статистическое истолкование) 199
- Томсон Дж. 9
- Точечный заряд 230
- Траектория 15
- Уатт Дж. 94**
- Удар абсолютно неупругий 106
  - — упругий 107
- Уравнение Клапейрона— Менделеева 175
- Ускорение мгновенное 28
  - свободного падения 35
- Условие статического равновесия для поступательного движения 129
  - — — — вращательного движения 131
- Условия идеальности газа 162
- Фарад (единица электроёмкости) 258**
- Физический закон 6
- Фотон 9
- Фундаментальные взаимодействия 10
- Частота вращения 40**
  - колебаний 45
- Чёрная дыра 136
- Шкалы температур 169**
- Эйнштейн А. 7**
- Эквипотенциальная поверхность 253
- Электризация 226
  - трением 226
  - облучением 228
- Электрически изолированная система тел 228
- Электрические заряды 222
  - — свободные 239
  - — связанные 239
- Электродинамика 222
- Электроёмкость уединённого проводника 258
  - конденсатора 260



- плоского конденсатора 263
- Электрон 9
- Электростатика 222
- Электростатическая индукция 245
- Электростатическое экранирование 246
- Элементарная частица 9
- Энергия взаимодействия точечных зарядов 251
- внутренняя 186
- гравитационного взаимодействия 96
- кинетическая 100
- механическая 103
- покоя 144
- потенциальная 96
- свободных колебаний 120
- упругого взаимодействия 97
- электростатического поля 265
- Эффект Доплера 216

## Приложения

### *Памятка № 1. Этапы поиска путей решения проблемы*

1. Выявление проблемы (противоречия между старым и новым знанием, конфликт точек зрения, ситуация неопределённости).
2. Выдвижение гипотезы решения проблемы.
3. Проверка гипотезы: выбор методов, отбор источников информации, получение и интерпретация результатов.
4. Подтверждение или опровержение гипотезы. При опровержении — выдвижение новой гипотезы.

### *Памятка № 2. Этапы работы над проектом*

1. Выбор тематики.
2. Определение задач, которые необходимо решить для создания продукта.
3. Планирование деятельности по решению задач.
4. Работа над проектом.
5. Оформление результатов работы.
6. Презентация проекта.

### *Памятка № 3. Этапы проведения исследования*

1. Выбор темы
2. Определение задач, которые необходимо решить.
3. Выдвижение гипотезы, позволяющей решить поставленные задачи.
4. Проверка гипотезы: выбор методов, отбор источников информации, получение и интерпретация результатов.
5. Оформление результатов работы.
6. Защита работы.

# Периодическая система химических

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ				
	I	II	III	IV	V
1	<b>H</b> 1 1s <sup>1</sup> 1,00797 Водород				
2	<b>Li</b> 3 2s <sup>2</sup> 6,939 Литий	<b>Be</b> 4 2s <sup>2</sup> 9,0122 Бериллий	<b>B</b> 5 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> 10,811 Бор	<b>C</b> 6 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> 12,01115 Углерод	<b>N</b> 7 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 14,0067 Азот
3	<b>Na</b> 11 3s <sup>1</sup> 22,9898 Натрий	<b>Mg</b> 12 3s <sup>2</sup> 24,312 Магний	<b>Al</b> 13 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> 26,9815 Алюминий	<b>Si</b> 14 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> 28,086 Кремний	<b>P</b> 15 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> 30,9738 Фосфор
4	<b>K</b> 19 4s <sup>1</sup> 39,102 Калий	<b>Ca</b> 20 4s <sup>2</sup> 40,08 Кальций	<b>Sc</b> 21 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> 44,956 Скандий	<b>Ti</b> 22 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> 47,90 Титан	<b>V</b> 23 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> 50,942 Ванадий
	<b>29</b> <b>Cu</b> 30 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> 63,546 Медь	<b>30</b> <b>Zn</b> 31 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 65,37 Цинк	<b>Ga</b> 31 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> 69,72 Галлий	<b>31</b> <b>Ge</b> 32 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> 72,59 Германий	<b>32</b> <b>As</b> 33 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> 74,9216 Мышьяк
5	<b>Rb</b> 37 5s <sup>1</sup> 85,47 Рубидий	<b>Sr</b> 38 5s <sup>2</sup> 87,62 Стронций	<b>39</b> <b>Y</b> 40 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> 88,905 Иттрий	<b>40</b> <b>Zr</b> 41 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> 91,22 Цирконий	<b>41</b> <b>Nb</b> 51 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup> 92,906 Нобий
	<b>47</b> <b>Ag</b> 48 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> 107,868 Серебро	<b>48</b> <b>Cd</b> 49 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 112,40 Кадмий	<b>In</b> 49 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> 114,82 Индий	<b>50</b> <b>Sn</b> 51 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> 118,69 Олово	<b>51</b> <b>Sb</b> 52 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> 121,75 Сурьма
6	<b>Cs</b> 55 6s <sup>1</sup> 132,905 Цезий	<b>Ba</b> 56 6s <sup>2</sup> 137,34 Барий	<b>57</b> <b>La</b> * 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> 138,81 Лантан	<b>72</b> <b>Hf</b> 73 4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> 178,49 Гафний	<b>73</b> <b>Ta</b> 83 4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> 180,948 Тантал
	<b>79</b> <b>Au</b> 80 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup> 196,967 Золото	<b>80</b> <b>Hg</b> 81 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 200,59 Ртуть	<b>Tl</b> 81 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> 204,37 Таллий	<b>Pb</b> 82 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> 207,19 Свинец	<b>82</b> <b>Bi</b> 83 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> 208,980 Висмут
7	<b>Fr</b> 87 7s <sup>1</sup> [223] Франций	<b>Ra</b> 88 7s <sup>2</sup> [226] Радий	<b>89</b> <b>Ac</b> ** 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> [227] Актиний	<b>104</b> <b>Rf</b> 105 5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> [261] Резерфордий	<b>105</b> <b>Db</b> 115 5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup> [262] Дубний
	<b>111</b> <b>Rg</b> 112 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>1</sup> [281] Рентгений	<b>112</b> <b>Cn</b> 113 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> [285] Коперниций	<b>Nh</b> 113 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7p <sup>1</sup> [284] Нихоний	<b>Fl</b> 114 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>2</sup> [289] Флеровий	<b>Mc</b> 115 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>3</sup> [288] Московский
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ	R <sub>2</sub> O	RO	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ				RH <sub>4</sub>	RH <sub>3</sub>

\* ЛАНТАНОИДЫ

<b>58</b> <b>Ce</b> 59 140,12 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Церий	<b>59</b> <b>Pr</b> 60 140,907 4f <sup>3</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Празеодим	<b>60</b> <b>Nd</b> 61 144,24 4f <sup>4</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Неодим	<b>61</b> <b>Pm</b> 62 [145] 4f <sup>5</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Прометий	<b>62</b> <b>Sm</b> 63 150,35 4f <sup>6</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Самарий	<b>63</b> <b>Eu</b> 64 151,96 4f <sup>7</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Европий	<b>64</b> <b>Gd</b> 65 157,25 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Гадолиний
---	--	--	---	---	---	---

\*\*АКТИНОИДЫ

<b>90</b> <b>Th</b> 91 232,038 5f <sup>0</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> Торий	<b>91</b> <b>Pa</b> 92 [231] 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Протактиний	<b>92</b> <b>U</b> 93 238,03 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Уран	<b>93</b> <b>Np</b> 94 [237] 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Нептуний	<b>94</b> <b>Pu</b> 95 [242] 5f <sup>6</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Плутоний	<b>95</b> <b>Am</b> 96 [243] 5f <sup>7</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Америций	<b>96</b> <b>Cm</b> 97 [247] 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Кюрий
--	--	---	---	---	---	--



# элементов Д. И. Менделеева

Э Л Е М Е Н Т О В									
VI		VII		VIII					
		(H)		Символ элемента		Порядковый номер		He 2 1s <sup>2</sup> 4,0026 Гелий	
O 8 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> 15,9994 Кислород		F 9 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> 18,9984 Фтор		Na 11 3s <sup>1</sup> 22,9898 Натрий		Электронная конфигурация внешнего слоя		Ne 10 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 20,183 Неон	
S 16 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> 32,064 Сера		Cl 17 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> 35,453 Хлор		Название элемента		Относительная атомная масса		Ar 18 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 39,948 Аргон	
24 Cr 51,996 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> Хром	25 Mn 54,938 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> Марганец	26 Fe 55,847 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> Железо	27 Co 58,9332 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> Кобальт	28 Ni 58,71 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> Никель					
Se 34 78,96 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Селен	Br 35 79,904 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Бром							Kr 36 83,80 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Криптон	
42 Mo 95,94 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup> Молибден	43 Tc [99] 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> Технеций	44 Ru 101,07 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup> Рутений	45 Rh 102,905 4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup> Родий	46 Pd 106,4 4d <sup>10</sup> 5s <sup>0</sup> Палладий					
Te 52 127,60 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> Теллур	I 53 126,9044 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> Иод							Xe 54 131,30 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Ксенон	
74 W 183,85 4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> Вольфрам	75 Re 186,2 4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> Рений	76 Os 190,2 4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> Осмий	77 Ir 192,2 4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> Иридий	78 Pt 195,09 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup> Платина					
Po 84 [210] 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup> Полоний	At 85 210 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup> Астат							Rn 86 [222] 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup> Радон	
106 Sg [263] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> Сиборгий	107 Bh [262] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup> Борий	108 Hs [265] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup> Хассий	109 Mt [266] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> Мейтнерий	110 Ds [271] 6d <sup>9</sup> 7s <sup>1</sup> Дармштадтий					
Lv 116 [293] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>4</sup> Ливерморий	Ts 117 [294] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>5</sup> Теннессин							Og 118 [294] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>6</sup> Оганесон	
RO <sub>3</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		RO <sub>4</sub>					
H <sub>2</sub> R		HR							

65 Tb 158,924 4f <sup>9</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Тербий	66 Dy 162,50 4f <sup>10</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Диспрозий	67 Ho 164,930 4f <sup>11</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Гольмий	68 Er 167,26 4f <sup>12</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Эрбий	69 Tm 168,934 4f <sup>13</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Тулий	70 Yb 173,04 4f <sup>14</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Иттербий	71 Lu 174,97 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Лютеций
---	--	---	--	---	---	--

97 Bk [247] 5f <sup>9</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Берклий	98 Cf [249] 5f <sup>10</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Калифорний	99 Es [254] 5f <sup>11</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Эйнштейний	100 Fm [253] 5f <sup>12</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Фермий	101 Md [256] 5f <sup>13</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Менделевий	102 No [255] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Нобелий	103 Lr [257] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Лоуренсий
--	--	--	---	---	--	--

## **Интернет-ресурсы**

<http://gotourl.ru/8075>

<http://gotourl.ru/8076>

<http://gotourl.ru/8077>

<http://gotourl.ru/8078>

<http://gotourl.ru/8079>

# Оглавление

## ВВЕДЕНИЕ

### Глава 1

#### Физика в познании вещества, поля, пространства и времени

§ 1. Что изучает физика . . . . .	3
§ 2. Эксперимент. Закон. Теория . . . . .	6
§ 3. Идея атомизма . . . . .	8
§ 4. Фундаментальные взаимодействия . . . . .	10
<i>Основные положения</i> . . . . .	13

## МЕХАНИКА

### Глава 2

#### Кинематика материальной точки

§ 5. Траектория. Закон движения . . . . .	14
§ 6. Перемещение . . . . .	17
§ 7. Скорость . . . . .	20
§ 8. Равномерное прямолинейное движение. . . . .	25
§ 9. Ускорение. . . . .	27
§ 10. Прямолинейное движение с постоянным ускорением . . . . .	30
§ 11. Свободное падение тел. . . . .	35
§ 12. Кинематика периодического движения. . . . .	38
<i>Основные положения</i> . . . . .	46

### Глава 3

#### Динамика материальной точки

§ 13. Принцип относительности Галилея . . . . .	48
§ 14. Первый закон Ньютона . . . . .	52
§ 15. Второй закон Ньютона . . . . .	54



§ 16. Третий закон Ньютона . . . . .	59
§ 17. Гравитационная сила. Закон всемирного тяготения . . . . .	61
§ 18. Сила тяжести . . . . .	64
§ 19. Сила упругости. Вес тела . . . . .	66
§ 20. Сила трения . . . . .	71
§ 21. Применение законов Ньютона . . . . .	75
<i>Основные положения</i> . . . . .	80

#### Глава 4

##### Законы сохранения

§ 22. Импульс тела . . . . .	83
§ 23. Закон сохранения импульса . . . . .	86
§ 24. Работа силы . . . . .	89
§ 25. Мощность . . . . .	93
§ 26. Потенциальная энергия . . . . .	96
§ 27. Кинетическая энергия . . . . .	100
§ 28. Закон сохранения механической энергии . . . . .	103
§ 29. Абсолютно неупругое и абсолютно упругое столкновения . . . . .	106
<i>Основные положения</i> . . . . .	109

#### Глава 5

##### Динамика периодического движения

§ 30. Законы механики и движение небесных тел . . . . .	112
§ 31. Динамика свободных колебаний . . . . .	117
§ 32. Колебательная система под действием внешних сил. Резонанс . . . . .	121
<i>Основные положения</i> . . . . .	126

#### Глава 6

##### Статика

§ 33. Условие равновесия для поступательного движения . . . . .	127
§ 34. Условие равновесия для вращательного движения . . . . .	130
<i>Основные положения</i> . . . . .	133

#### Глава 7

##### Релятивистская механика

§ 35. Постулаты специальной теории относительности . . . . .	134
§ 36. Относительность времени . . . . .	138

§ 37. Релятивистский закон сложения скоростей . . . . .	141
§ 38. Взаимосвязь энергии и массы . . . . .	143
<i>Основные положения</i> . . . . .	147

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

### Глава 8

#### Молекулярная структура вещества

§ 39. Масса атомов. Молярная масса . . . . .	148
§ 40. Агрегатные состояния вещества . . . . .	153
<i>Основные положения</i> . . . . .	160

### Глава 9

#### Молекулярно-кинетическая теория идеального газа

§ 41. Статистическое описание идеального газа . . . . .	162
§ 42. Распределение молекул газа по скоростям . . . . .	166
§ 43. Температура . . . . .	168
§ 44. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории . . . . .	171
§ 45. Уравнение Клапейрона—Менделеева . . . . .	174
§ 46. Изопроцессы . . . . .	176
<i>Основные положения</i> . . . . .	183

### Глава 10

#### Термодинамика

§ 47. Внутренняя энергия . . . . .	186
§ 48. Работа газа при изопроцессах . . . . .	189
§ 49. Первый закон термодинамики . . . . .	192
§ 50. Тепловые двигатели . . . . .	195
§ 51. Второй закон термодинамики . . . . .	198
<i>Основные положения</i> . . . . .	202

### Глава 11

#### Механические волны. Акустика

§ 52. Распространение волн в упругой среде . . . . .	204
§ 53. Периодические волны . . . . .	209
§ 54. Звуковые волны . . . . .	212
§ 55. Эффект Доплера . . . . .	216
<i>Основные положения</i> . . . . .	220

## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Глава 12

#### Силы электромагнитного взаимодействия неподвижных зарядов

§ 56. Электрический заряд. Квантование заряда . . . . .	222
§ 57. Электризация тел. Закон сохранения электрического заряда . . .	225
§ 58. Закон Кулона . . . . .	230
§ 59. Напряжённость электростатического поля . . . . .	234
§ 60. Линии напряжённости электростатического поля . . . . .	236
§ 61. Электрическое поле в веществе. . . . .	239
§ 62. Диэлектрики в электростатическом поле . . . . .	241
§ 63. Проводники в электростатическом поле . . . . .	244
<i>Основные положения</i> . . . . .	248

### Глава 13

#### Энергия электромагнитного взаимодействия неподвижных зарядов

§ 64. Потенциал электростатического поля . . . . .	250
§ 65. Разность потенциалов . . . . .	255
§ 66. Электроёмкость уединённого проводника . . . . .	257
§ 67. Электроёмкость конденсатора . . . . .	259
§ 68. Энергия электростатического поля . . . . .	265
<i>Основные положения</i> . . . . .	269

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Абсолютная и относительная погрешности . . . . .	271
1. Исследование скольжения шайбы по наклонной плоскости . . . . .	274
2. Измерение коэффициента трения скольжения . . . . .	276
3. Исследование динамики движения бруска по наклонной плоскости . . . . .	278
4. Исследование закона сохранения энергии при действии силы упругости и силы тяжести . . . . .	281
5. Изучение процесса установления теплового равновесия между горячей и холодной водой при теплообмене . . . . .	283
6. Энергия заряженного конденсатора . . . . .	285



---

Ответы к задачам .....	286
Предметно-именной указатель .....	288
Приложения .....	293
Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева ...	294
Интернет-ресурсы .....	296

# ЕДИНИЦЫ

ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

## ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

### ОСНОВНЫЕ

наименование	обозначение	наименование	обозначение
Длина	$l$	метр	м
Время	$t$	секунда	с
Масса	$m$	килограмм	кг
Количество вещества	$\nu$	моль	моль
Термодинамическая температура	$T$	кельвин	К
Сила электрического тока	$I$	ампер	А
Сила света	$I_e$	кандела	кд

## ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

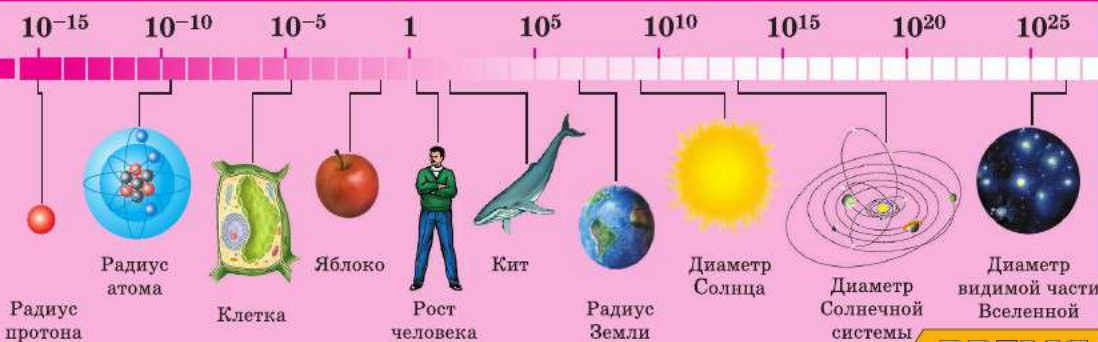
## ЕДИНИЦА

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ

наименование	обозначение	наименование	обозначение
Плоский угол	$\alpha$	радиан	рад
Телесный угол	$\Omega$	стерадиан	ср

# ДЛИНА

метр



# ВРЕМЯ

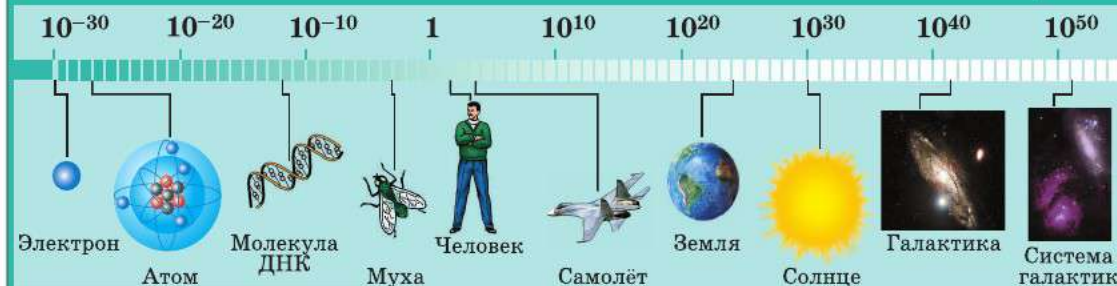
секунда



# МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

# МАССА

килограмм



# ТЕМПЕРАТУРА

кельвин



# ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ, кг/м³

Плотности газов приведены при нормальных условиях:  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па,  $t = 0$  °С

Водород	0,09	Дёготь	$1,02 \cdot 10^3$	Алмаз	$(3,0 \div 3,5) \cdot 10^3$
Воздух	1,29	Морская вода	$1,025 \cdot 10^3$	Железо	$7,9 \cdot 10^3$
Пенопласт	30	Кровь	$1,05 \cdot 10^3$	Никель	$8,8 \cdot 10^3$
Бальзовое дерево	$0,12 \cdot 10^3$	Резина	$1,2 \cdot 10^3$	Медь	$8,9 \cdot 10^3$
Пробка	$(0,2 \div 0,3) \cdot 10^3$	Кирпич	$(1,4 \div 2,2) \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Сосна	$(0,4 \div 0,6) \cdot 10^3$	Сахар	$1,6 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Дуб	$(0,6 \div 0,9) \cdot 10^3$	Магний	$1,7 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$
Эфир	$0,74 \cdot 10^3$	Кость	$(1,5 \div 2,0) \cdot 10^3$	Уран	$18,7 \cdot 10^3$
Этиловый спирт	$0,79 \cdot 10^3$	Слоновая кость	$(1,8 \div 1,9) \cdot 10^3$	Золото	$19,3 \cdot 10^3$
Бензин	$0,7 \cdot 10^3$	Глина	$(1,8 \div 2,6) \cdot 10^3$	Вольфрам	$19,3 \cdot 10^3$
Масло	$0,9 \cdot 10^3$	Стекло	$(2,4 \div 2,8) \cdot 10^3$	Платина	$21,5 \cdot 10^3$
Лёд	$0,92 \cdot 10^3$	Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$	Осмиум	$22,5 \cdot 10^3$
Вода (3,98 °С)	$1,00 \cdot 10^3$	Цемент	$(2,7 \div 3,0) \cdot 10^3$		



# МЕХАНИКА

# ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ

# ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Длина	$l$	метр	$м$	$м$
Площадь	$S$	квадратный метр	$м^2$	$м^2$
Объём	$V$	кубический метр	$м^3$	$м^3$
Время	$t$	секунда	$с$	$с$
Скорость	$v$	метр в секунду	$м/с$	$м/с$
Ускорение	$a$	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$	$м/с^2$
Частота	$\nu$	герц	Гц	$1/с$
Угловая скорость	$\omega$	радиан в секунду	рад/с	рад/с
Масса	$m$	килограмм	кг	кг
Плотность	$\rho$	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	$кг/м^3$
Сила	$F$	ньютон	$Н$	$кг \cdot м/с^2$
Импульс	$p$	килограмм-метр в секунду	$кг \cdot м/с$	$кг \cdot м/с$
Давление	$p$	паскаль	Па	$кг/(м \cdot с^2)$
Работа	$A$	джоуль	Дж	$кг \cdot м^2/с^2$
Мощность	$P$	ватт	Вт	$кг \cdot м^2/с^3$
Момент силы	$M$	ньютон-метр	$Н \cdot м$	$кг \cdot м^2/с^2$

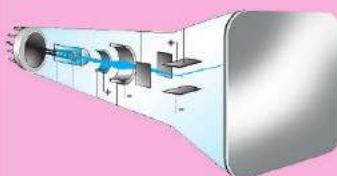
константа	обозначение	значение
Гравитационная постоянная	$G$	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Масса электрона	$m_e$	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса протона	$m_p$	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса нейтрона	$m_n$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$



## ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Электрический заряд	$Q$	кулон	Кл	$А \cdot с$
Поверхностная плотность заряда	$\sigma$	кулон на квадратный метр	$Кл/м^2$	$А \cdot с/м^2$
Объёмная плотность заряда	$\rho$	кулон на кубический метр	$Кл/м^3$	$А \cdot с/м^3$
Напряжённость электростатического поля	$E$	ньютон на кулон	$Н/Кл$	$кг \cdot м/(А \cdot с^3)$
Потенциал	$\phi$	вольт на метр	$В/м$	
Электрическая ёмкость	$C$	вольт	$В$	$кг \cdot м^2/(А \cdot с^3)$
Объёмная плотность энергии электростатического поля	$w$	фарад	$\Phi$	$А^2 \cdot с^4/(кг \cdot м^2)$
		джоуль на кубический метр	$Дж/м^3$	$кг/(м \cdot с^2)$



константа	обозначение	значение
Заряд электрона	$e$	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(Н \cdot м^2)$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Вб/(А} \cdot \text{м)}$

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА

## ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Электрическое сопротивление	$R$	ом	Ом	$кг \cdot м^2/(А^2 \cdot с^3)$
Удельное сопротивление	$\rho$	ом-метр	$Ом \cdot м$	$кг \cdot м^3/(А^2 \cdot с^3)$
Плотность электрического тока	$j$	ампер на квадратный метр	$А/м^2$	$А/м^2$
Магнитная индукция	$B$	тесла	Тл	$кг/(А \cdot с^2)$
Магнитный поток	$\Phi$	вебер	Вб	$кг \cdot м^2/(А \cdot с^2)$
Индуктивность	$L$	генри	Гн	$кг \cdot м^2/(А^2 \cdot с^2)$
Взаимная индуктивность	$M$	генри	Гн	$кг \cdot м^2/(А^2 \cdot с^2)$
Оптическая сила	$D$	диоптрия	дптр	$м^{-1}$

константа	обозначение	значение
Скорость света в вакууме	$c$	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$



# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Количество теплоты	$Q$	джоуль	Дж	$кг \cdot м^2/с^2$
Внутренняя энергия	$U$	джоуль	Дж	$кг \cdot м^2/с^2$
Удельная теплоёмкость	$c$	джоуль на килограмм-кельвин	$Дж/(кг \cdot К)$	$м^2/(с^2 \cdot К)$
Удельная теплота плавления	$\lambda$	джоуль на килограмм	Дж/кг	$м^2/с^2$
Удельная теплота парообразования	$r$	джоуль на килограмм	Дж/кг	$м^2/с^2$
Поверхностное натяжение	$\sigma$	ньютон на метр	Н/м	$кг/с^2$

константа	обозначение	значение
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$

