



О. Ф. Кабардин

ФИЗИКА

9 класс

Учебник
для общеобразовательных
организаций

Рекомендовано Министерством образования
и науки Российской Федерации

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
К12

На учебник получены **положительные заключения** по результатам **научной** (заключение РАН № 10106-5215/12 от 29.09.2011 г.), **педагогической** (заключения РАО № 01-5/7д-392 от 17.10.2011 г. и № 319 от 29.01.14 г.) и **общественной** (заключение РКС № 300 от 07.02.2014 г.) экспертиз.

Кабардин О. Ф.

К12 **Физика. 9 класс** : учеб. для общеобразоват. организаций / О. Ф. Кабардин. — М. : Просвещение, 2014. — 176 с. : ил. — ISBN 978-5-09-034177-6.

Предлагаемый учебник — один из основных элементов предметной линии УМК «Архимед» по физике. Он способствует достижению образовательных результатов (личностных, метапредметных и предметных) по физике в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования.

Учебник имеет фиксированный формат. Материал учебника предполагает изучение всех тем курса физики на уровне ознакомления с физическими явлениями, формирования основных физических понятий, определения физических величин, приобретения умения измерять физические величины, применения полученных знаний на практике.

Материал учебника распределён по рубрикам в соответствии с видами учебной деятельности («Экспериментальное задание», «Прочитайте», «Найдите», «Дискуссия», «Темы сообщений» и др.)

В нём содержатся тестовые задания для эффективной подготовки к итоговой аттестации.

Учебник предназначен для учащихся 9 класса основной школы.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я.72

ISBN 978-5-09-034177-6

© Издательство «Просвещение», 2014
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2014
Все права защищены

В этом учебнике рассматриваются методы научного познания, основные законы механического движения тел, законы сохранения, квантовые явления, строение Вселенной.

Обсуждение методов научного познания включено в содержание учебника физики не в качестве дополнительного материала для изучения, а для ознакомления с современными представлениями о процессе познания человеком мира. Понимание общих закономерностей процесса познания необходимо для развития самостоятельности мышления и критичного отношения к получаемой информации. На примерах из истории развития физики как науки можно понять взаимосвязи научных фактов, гипотез, моделей и законов природы, соотношения между теоретическими выводами и экспериментами.

Законы механики необходимо знать каждому водителю автомобиля и пешеходу, строителю дома и пилоту самолёта. Законам механики подчиняется не только движение любых тел в окружающей человека повседневной жизни, но и движение космических ракет, планет, звёзд и галактик. На основе применения законов механики рассчитываются и траектории движения электронов в кинескопе телевизора.

Изучение квантовых явлений даёт возможность познакомиться с современными научными представлениями о свойствах атомов и элементарных частиц, из которых построены все тела во Вселенной. Открытие основных законов квантовой физики сделало возможным создание ламп дневного света, лазеров, транзисторов, микрокалькуляторов, современных компьютеров, ядерных реакторов.

Физика является фундаментальной наукой, изучающей наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, законы её движения. Она даёт человеку возможность понять, как устроен окружающий мир, каким законам он подчиняется. Знание законов физики необходимо для понимания содержания курсов химии, биологии, астрономии, использование законов физики на практике лежит в основе всей современной техники.

В 9 классе заканчивается изучение физики как обязательного для всех учебного предмета. Далее каждому из вас нужно выбрать профиль своего дальнейшего обучения и решить, хотите ли вы продолжить изучение физики в качестве одного из профильных предметов. При этом выборе важно понять, что изучение физики направлено на формирование системы представлений о мире как познаваемой объективной реальности, управляемой устойчивыми, воспроизводимыми законами. Человек, познавший объективные законы окружающего мира, способен более уверенно планировать свою деятельность в нём для достижения желаемых результатов.

В современном мире для достижения успеха при выборе любой профессии человек должен постоянно овладевать новыми знаниями и умениями, понимать поставленные перед ним задачи и находить эффективные способы их решения, понимать новые возникающие проблемы. При нахождении собственных способов решения возникающих проблем нужно уметь объяснить своё решение, доказать его правильность и эффективность. При этом важно уметь выслушать мнение других людей, понять смысл их доводов, при несогласии опровергнуть эти доводы. Процесс овладения такими умениями происходит быстрее и успешнее у тех людей, которые уже имеют опыт решения проблем. Физика является одним из средств развития индивидуальных способностей человека. Решение различных физических проблем и задач служит средством приобретения общих умений понимать другие проблемы, выбирать способы их решения, проверять правильность полученных результатов.

Данный учебник построен так, чтобы им было удобно пользоваться как учащимся, у которых физика — один из любимых предметов, так и учащимся, интересующимся другими учебными предметами. Для этого материал каждого параграфа разделён на две части — имеет два разворота. На первом развороте (две страницы) приведён материал, которым должен овладеть каждый ученик. Материал второго разворота (следующие две страницы) предназначен для учащихся, проявляющих повышенный интерес к физике и желающих расширить и углубить свои знания. Однако всем учащимся рекомендуется хотя бы бегло ознакомиться с этим материалом, потому что он может оказаться интересным и полезным каждому. Для приобретения умений применять полученные знания на практике в учебнике даются задачи и приводятся примеры решения типовых задач. Для самопроверки усвоения полученных знаний и умений в конце тем даны тесты из простых задач, для решения которых не требуются сложные вычисления. Для подготовки к тестовому контролю нужно просмотреть весь материал темы по учебнику, подготовить ответы на контрольные вопросы к изученным параграфам, решить предложенные задачи. После выполнения заданий тематического теста нужно проверить решение по кодам правильных ответов в конце учебника. Обнаружив пробелы в своих знаниях, изучите соответствующий материал в учебнике.

Физика и физические методы изучения природы

1 Методы научного познания

6

различные расстояния от Земли. Так, например, в 1927 году Эдвин Хаббл обнаружил, что галактики удаляются от нас с постоянной скоростью. Это открытие стало основой для теории Большого взрыва. В настоящее время физики продолжают изучать природу, используя различные методы, такие как эксперимент, наблюдение и теоретическое моделирование. Физика помогает нам понять законы природы и использовать их в повседневной жизни. Например, физика лежит в основе работы многих современных технологий, таких как компьютеры, самолеты и космические корабли. Таким образом, физика является одной из самых важных наук, которая помогает нам познать природу и использовать ее на благо человечества.



руками человека — это техника. Впервые техника появилась в виде простейших орудий труда. В дальнейшем техника развивалась, и появились различные виды техники, такие как механическая, электрическая, электронная и др.

Дальнейшее развитие техники

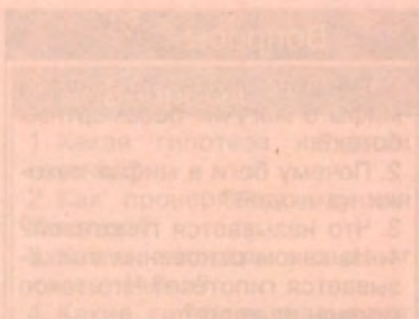




Рис. 1.1



Рис. 1.2

Мифическая картина мира. Первые попытки людей понять причины происходящих в природе явлений привели к созданию мифов. Человек видел плоскую поверхность Земли и голубой купол неба над ней, где-то далеко сходящийся с землёй. На основе таких наблюдений была создана модель мира, в которой плоская Земля накрыта хрустальным куполом неба с прикрепленными к нему звёздами (рис. 1.1). Солнце и Луна движутся по небу. Так как способностью самостоятельно двигаться обладают только живые существа, люди сделали вывод, что Солнце и Луна — это живые существа с необычными способностями. Они не падают на землю, излучают свет и тепло, но не сгорают. Поколения людей рождаются и умирают, а Небо, Солнце, Луна, Земля неизменны. Эти необычайно могучие и бессмертные существа были названы *богами*.

В мифах древних египтян богиня неба располагается над богиней земли, а бог солнца переправляется по небу на ладье (рис. 1.2).

Мифы о богах Древней Греции очень просто объясняли все явления на Небе и Земле. Отчего бывают молния и гром? Это бог Зевс поражает молниями тех, кто нарушает его законы. Отчего буря на море? Это бог моря Посейдон на кого-то разгневался. Отчего умер этот человек? Это богиня судьбы человека Атропа перерезала нить его жизни, которую пряла богиня Клото.

Понять поступки богов человеку легко, так как в мифах боги похожи на придумавших их людей. Они любят и ревнуют, способны на зависть и обман, борются между собой за власть. Чтобы добиться от богов милости, нужно приносить им подарки — жертвы. Нужно знать, с какой просьбой к какому богу следует обращаться.

Мифы о могущественных богах давали ответ и на вопрос о происхождении Земли, гор и морей, растений, животных и человека. Всё это было создано могучими бессмертными богами.

Наблюдения, гипотезы, модели. Уже в VI в. до н. э. некоторые философы перестали верить в мифы и стали искать научные ответы на вопросы об окружающем мире.

Первым шагом в познании мира являются **наблюдения** природных явлений. Опираясь на чувства, человек может высказать гипотезу — предположительное объяснение явления. Выдвижение гипотезы является творческим процессом, в котором человек придумывает упрощённую модель наблюдаемого явления, делающую его понятным для человека. Так, в атомной модели строения вещества предполагается, что всё в мире состоит из непрерывно движущихся неделимых атомов. Эта модель объяснила явления испарения и конденсации вещества, способность газов к расширению и другие свойства предметов окружающего мира.

Эксперимент как критерий проверки гипотезы. Для объяснения любого явления могут быть предложены различные гипотезы и модели. Как проверить, какая из нескольких возможных гипотез правильная? Ответ на этот

? Вопросы

1. Почему люди создавали мифы о могучих бессмертных богах?
2. Почему боги в мифах похожи на людей?
3. Что называется гипотезой?
4. На каком основании высказывается гипотеза? Что такое модель явления?
5. Как узнать, какая гипотеза правильная?
6. Существуют ли атомы в действительности или никаких атомов вовсе нет?
7. Может ли атом быть разделён на части или он неделим?

вопрос дал итальянский учёный Галилео Галилей (1564—1642). Он одним из первых начал использовать математику для количественного описания физических явлений и пришёл к выводу, что для проверки научных гипотез нужно выполнять физические эксперименты. **Научными гипотезами** называют такие предположения, которые не противоречат известным научным фактам, объясняют известные необъяснённые явления и предсказывают такие ранее неизвестные явления, которые можно проверить при выполнении **физических экспериментов**.

Например, научной гипотезой было предположение Исаака Ньютона о существовании сил всемирного тяготения, убывающих обратно пропорционально квадрату расстояния от небесного тела. Эту гипотезу можно было экспериментально проверить, измерив силу притяжения на различных расстояниях от Земли.

Не всякое предположение может быть признано научной гипотезой. Например, каждый слышал гипотезу о посещении Земли пришельцами из космоса. Эта гипотеза не объясняет никаких фактов, ранее не объяснённых наукой, и не предсказывает явлений, которые можно было бы экспериментально обнаружить. Так что гипотеза о пришельцах скорее фантастическая, чем научная.

Существует очень много лженаучных, или псевдонаучных, гипотез. Так называют гипотезы, которые ссылаются на будто бы установленные наукой факты, тогда как в действительности таких научных фактов нет. Примером лженаучной гипотезы является утверждение астрологов о влиянии расположения планет и Солнца среди звёзд на небе в момент рождения человека на всю его судьбу.

Гипотезы, отрицающие установленные наукой факты, называют антинаучными гипотезами. Такой является гипотеза, отрицающая закон сохранения энергии. На основании этой гипотезы уже много столетий продолжают попытки создания вечного двигателя. Имеет ли право кто-то высказать антинаучную гипотезу? Конечно, имеет. Но этот человек должен понимать, что высказывает гипотезу, противоречащую установленным на сегодня фактам, и, скорее всего, его гипотеза ошибочна.

Предположения многих людей о том, что можно узнать что-то о своём будущем по приметам и предзнаменованиям, по линиям на ладони, путём гадания на картах или на кофейной гуще, также не имеют под собой никакой научной основы. Это суеверия, используемые мошенниками.

Метафизическая гипотеза. Есть одна особенная гипотеза — гипотеза о существовании у человека бессмертной души и её вечной жизни в другом мире после смерти человека. Эта гипотеза не может быть ни подтверждена, ни опровергнута методами науки, поскольку свойства души и потустороннего мира согласно этой гипотезе недоступны научному исследованию, лежат за пределами возможностей человека. Гипотезу, которую невозможно проверить методами науки, называют **метафизической гипотезой**. Принятие или отвержение такой гипотезы является делом веры человека в её истинность или неверия в неё.



Галилео Галилей

Я пришёл к выводу о невозможности нахождения непрерывного движения, а также вечного колеса. Поиск конструкции вечного колеса — источника вечного движения — можно назвать одним из наиболее бессмысленных заблуждений человека.

Леонардо да Винчи



Вопросы

1. Какая гипотеза является научной?
2. Как проверяется научная гипотеза?
3. Какие гипотезы называют лженаучными?
4. Какие гипотезы называют антинаучными?
5. Приведите примеры человеческих суеверий.
6. Какие гипотезы называют метафизическими?
7. Приведите пример метафизической гипотезы.

Язык науки. Для того чтобы приступить к изучению какой-то науки, необходимо овладеть системой её основных понятий и методами исследования. Эта задача подобна задаче овладения иностранным языком. Представьте себе, что в Россию к любителям поэзии приехал самый знаменитый поэт не с какой-то другой планеты, а из соседней Японии. И читает свои стихи на своём родном японском языке. Смогут ли его понять слушатели, не владеющие японским языком?

В повседневной жизни для взаимопонимания собеседникам необходимо владеть каким-то общим языком. И в физике есть свой особый язык, без овладения которым нельзя понять содержание науки физики и её законы, невозможно сделать новое открытие. Первым необходимым шагом на пути изучения **языка науки физики** является овладение системой **физических понятий**.

Условия и результаты эксперимента в физике описываются количественно на основе *измерений физических величин*, характеризующих предметы и физические процессы.

Физические величины являются теоретическими понятиями. Поэтому любые экспериментальные исследования или открытия в физике, планирование эксперимента и объяснение его результатов требуют использования **физической теории**.

Совокупность взаимосвязанных теоретических понятий физики образует теоретический мир физики. Только освоившись в этом теоретическом мире, можно понять основные законы физики, которыми описываются свойства материального мира.

Особенность физики в том, что каждое новое теоретическое понятие в ней вводится по необходимости, при обнаружении таких явлений в материальном мире, которые нельзя объяснить с использованием ранее известных понятий. Нужно придумать новое теоретическое понятие, использование которого даёт возможность объяснить себе и другим людям, как и почему происходит новое наблюдаемое природное явление.

Если с помощью теории удаётся правильно предсказать результаты опыта с реальными физическими объектами, проектировать, строить и успешно использовать разнообразные машины, то это означает, что в абстрактной физической модели реального мира выделены существенные свойства реального мира. Теория необходима для нахождения путей практического использования человеком природных явлений и процессов.

Границы применимости физических теорий. При всей важности физических теорий в процессе познания мира и использования открытых законов природы для удовлетворения практических потребностей людей нельзя забывать о существовании определённых границ применимости любой физической теории и следующих из неё законов. Границы применимости теории определяются прежде всего условием применимости физической модели, использованной при создании теории. Экспериментально установленные законы применимы лишь в тех условиях, в которых они установлены. Например, если в физической теории использована модель строения вещества, в которой атомы рассматриваются как твёрдые упругие шарики определённых размеров, то выводы и законы этой теории применимы к реальным телам лишь в тех случаях, в которых свойства атомов приближаются к свойствам таких шариков.

Основательное изучение физики необходимо любому инженеру, конструктору, изобретателю, любому человеку, имеющему склонность к работе с машинами и современными техническими устройствами.

Что такое научное открытие. Что называется научным открытием? Можно ли научиться делать открытия?

Научным открытием в физике может быть обнаружение неизвестного ранее физического явления, нового физического свойства какого-то объекта или нового физического закона.

Для открытия нового физического явления нужно знать, что такое физическое явление и какие явления уже открыты. Новое физическое явление или фи-

зическое свойство может быть открыто путём наблюдения или при выполнении опыта. Результатом наблюдения или эксперимента является установление **научного факта**.

Научным фактом в физике называется такой факт, который может быть проверен и подтверждён при независимой экспериментальной проверке в тех же условиях. Это значит, что научным признаётся только такой факт, который подтверждается в наблюдениях или опытах других людей.

Просто ли выполнить наблюдение интересного явления или воспроизводимый опыт? Это совсем нетрудно. Можно, например, наблюдать явление радуги на небе и получить в опыте искусственную радугу, разбрызгивая струю воды из шланга. Но радугу и на небе, и в брызгах струи воды уже наблюдали миллиарды людей. Это не открытие.

Трудности открытий. Задача обнаружения никем до сих пор не исследованного природного объекта, процесса, явления, свойства или закономерности может показаться совершенно неразрешимой. Возможных объектов исследования в природе бесконечное множество, и обладают они различными свойствами. А изучить результаты всех уже выполненных исследований одному человеку за одну жизнь совершенно невозможно.

Как узнать, что задуманный тобой опыт ещё никто никогда не делал? Только в «Дневнике» Фарадея последний проделанный им опыт записан под номером 16 041! Даже сам Фарадей в последние годы жизни с огорчением много раз замечал, что опять выполнил опыт, который уже делал несколько лет тому назад.

В настоящее время в мире ежемесячно выходят тысячи научных журналов, содержащих десятки или сотни тысяч статей. Даже только прочитать всё написанное учёными, изучающими физические явления, одному человеку просто невозможно за всю его жизнь. Почему же до сих пор не остановилось развитие науки? Как учёные могут делать новые открытия, не узнав всего, что сделано другими исследователями?

Возможность приступить к самостоятельным научным исследованиям в физике не после 20—30 лет непрерывного изучения чужих открытий, а всего после нескольких лет изучения основ этой науки обусловлена следующими её особенностями.

На каждом этапе своего развития физика как наука представляет собой не набор отдельных самостоятельных фактов и явлений, а систему знаний о мире, опирающуюся на небольшое число экспериментально установленных основных фактов и несколько теорий, объясняющих эти факты. Эта система физических знаний и представлений обычно почти не изменяется на протяжении жизни одного поколения людей. К числу основных экспериментальных фактов относятся, например, законы механики Ньютона, закон всемирного тяготения, законы сохранения импульса и энергии, закон сохранения электрического заряда, закон Кулона, закон Ампера, закон электромагнитной индукции.

? Вопросы

1. Что называется научным фактом?
2. Что называется научным открытием?
3. Что нужно знать и уметь для того, чтобы сделать научное открытие?
4. Как создаётся физическая теория?
5. Почему может произойти смена одной физической теории другой теорией?
6. Почему любая физическая теория имеет определённые границы применимости?
7. Может ли один человек освоить всю современную науку физику и сделать новое открытие?

Изучив основные законы физики и методы проведения физических экспериментов, можно приступить к более глубокому изучению одного из разделов науки, выбрать интересную тему для самостоятельных исследований. Как же разобраться в современном состоянии науки физики и «встроиться» в ряды исследователей природы?

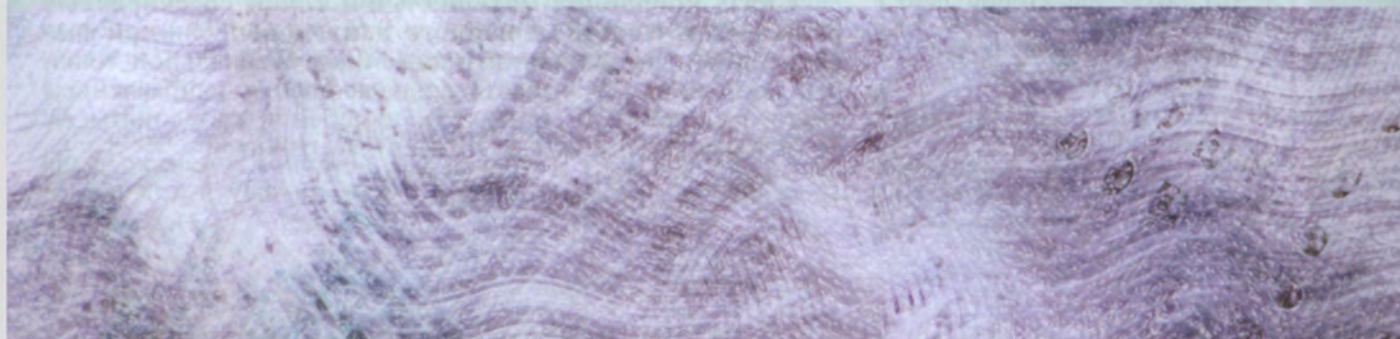
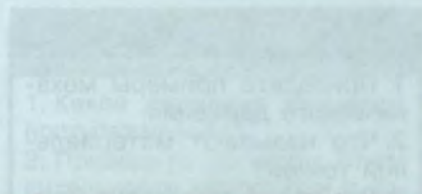
Можно представить себе науку физику как дерево с мощными корнями, стволом, многочисленными ветвями и еще более многочисленными тонкими веточками. Корни этого дерева — экспериментально установленные основные законы физики. Ствол дерева — общие методы экспериментального и теоретического исследования природных явлений. Ветви дерева — разделы физики, объединённые общей теорией, каждая тонкая веточка выделяет всё более узкий круг изучаемых явлений. В каждый период времени на дереве науки существуют наиболее быстро развивающиеся ветви и веточки. Например, такими ветвями в XX столетии были атомная и ядерная физика, физика элементарных частиц.

Как узнать, какие загадки природы пытаются разгадать сегодня физики, решения каких проблем ждёт человеческое общество от учёных? Можно начать с чтения научно-популярных журналов и книг, путешествий по сайтам науки в Интернете. Особенно полезными могут быть посещения научных центров, исследовательских лабораторий, где можно сделать предварительную «примерку»: хотелось бы вам работать в подобной лаборатории? Интересно ли вам то, чем занимаются учёные?

Чтобы понять, интересно ли тебе заниматься физикой, есть ли у тебя способности к таким занятиям, нет другого пути, как попробовать... заняться физикой. И сделать это ещё в школьные годы для правильного выбора профессии после окончания школы. Выбрав однажды науку, не жалеют впоследствии о своём выборе те, для кого научное исследование является самым интересным, самым привлекательным из возможных занятий, работой и увлечением одновременно. Кто имеет интерес и способности к физике, могут не отказывать себе в удовольствии заниматься ею в молодые годы.

Законы механического движения

2	Система отсчёта и координаты точки	12	8	Второй закон Ньютона	38
3	Мгновенная скорость. Ускорение	16	9	Сложение сил	42
4	Путь при равноускоренном движении	20	10	Третий закон Ньютона	46
5	Равномерное движение по окружности	24	11	Закон всемирного тяготения	50
6	Относительность механического движения	28	12	Движение тел под действием силы тяжести	54
7	Первый закон Ньютона	34			



§ 2. Система отсчёта и координаты точки

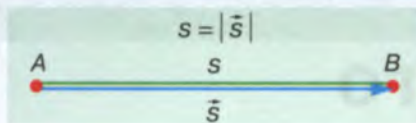


Рис. 2.1

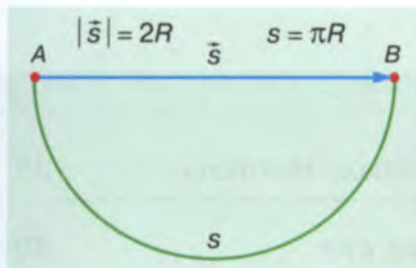


Рис. 2.2

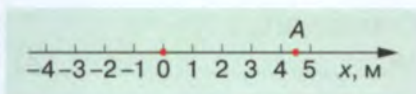


Рис. 2.3

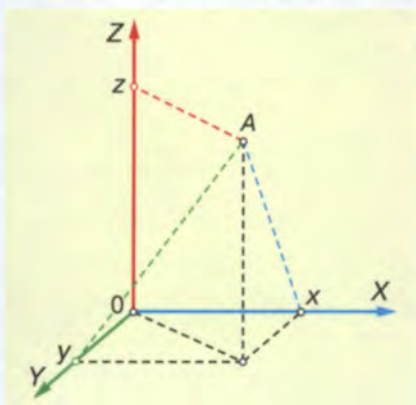


Рис. 2.4

? Вопросы

1. Приведите примеры механического движения.
2. Что называют материальной точкой?
3. Что такое траектория движения точки?
4. Что такое путь материальной точки?
5. Что такое перемещение материальной точки?
6. Что называется системой отсчёта?

Механическое движение. Любые изменения в мире и взаимодействия тел называют *движением*. **Механическим движением** называют изменения положения тела относительно других тел или изменения взаимного расположения частей одного тела. Раздел физики, изучающий законы механического движения тел, называется **механикой**. Раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин движения, называется **кинематикой**.

Траектория движения и путь. Когда размеры тела пренебрежимо малы по сравнению с пройденным расстоянием, движение тела можно описывать как движение точки. Тело в таких случаях называют **материальной точкой**. Линия, по которой движется материальная точка, называется **траекторией** движения. **Путь** s — это длина траектории от начальной точки движения до конечной точки.

Перемещение. Вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории движения материальной точки, называется **перемещением**. Вектор перемещения может обозначаться символами s или \vec{s} . При прямолинейном движении в одном направлении путь s равен модулю перемещения $|\vec{s}|$ точки (рис. 2.1).

При движении точки по кривой линии модуль перемещения не равен пройденному пути. Например, при движении материальной точки по окружности из точки A в точку B (рис. 2.2) пройденный путь s равен половине длины окружности: $s = \pi R$, а модуль перемещения точки равен диаметру окружности: $|\vec{s}| = 2R$.

Система отсчёта. Положение точки в пространстве задаётся числами, которые называют **координатами** точки. Для определения положения точки в пространстве выбирают **тело отсчёта** и связанную с ним **систему координат**. Тело отсчёта, система координат и часы для измерения времени образуют **систему отсчёта**.

Для определения положения точки A на прямой (рис. 2.3) можно выбрать начало отсчёта в точке 0 на этой прямой, называемой координатной осью. Одно направление вдоль прямой считается положительным, противоположное направление считается отрицательным.

Положение точки в пространстве может быть задано тремя координатами. В системе координат, образуемой тремя взаимно перпендикулярными прямыми $0X$, $0Y$ и $0Z$, координаты x , y и z точки A отсчитываются от начала координат 0 (точка пересечения осей $0X$, $0Y$ и $0Z$) до точек пересечения с координатными осями перпендикуляров Ax , Ay , Az из точки A на координатные оси (рис. 2.4).

Связь координат материальной точки со скоростью равномерного прямолинейного движения. Если при равномерном прямолинейном движении материальной точки ось координат $0X$ выбрать совпадающей с направлением вектора скорости \vec{v} (рис. 2.5), изменение координаты Δx за интервал времени t в этом случае равно:

$$\Delta x = vt,$$

а координата x материальной точки в любой момент времени t определяется уравнением

$$x = x_0 + \Delta x = x_0 + vt,$$

где x_0 — координата точки в начальный момент времени.

При направлении вектора скорости \vec{v} , противоположном направлению оси OX (рис. 2.6), координата x точки в момент времени t определяется уравнением

$$x = x_0 - vt.$$

На любой криволинейной траектории положение материальной точки определяется также одной координатой. Например, автомобилист сообщает о своём местонахождении, указав номер автомобильной дороги и расстояние по этой дороге от ближайшего города.

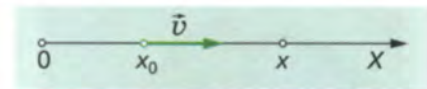


Рис. 2.5



Рис. 2.6

Проекция вектора скорости на координатную ось.

Изменение координаты точки при равномерном прямолинейном движении под некоторым углом α к оси OX (рис. 2.7) можно найти, используя проекцию вектора скорости \vec{v} на координатную ось. **Проекцией v_x вектора скорости \vec{v} на координатную ось OX** называется отношение изменения координаты Δx точки ко времени t , за которое произошло это изменение:

$$v_x = \frac{\Delta x}{t} = \frac{x_2 - x_1}{t}.$$

Зависимость координаты x от времени t и проекции v_x вектора скорости \vec{v} на координатную ось OX выражается уравнением

$$x = x_0 + \Delta x = x_0 + v_x t.$$

Если за время t значение координаты x увеличилось, $\Delta x > 0$, то проекция v_x скорости \vec{v} на координатную ось OX имеет положительное значение. Если значение координаты x уменьшилось, $\Delta x < 0$, то проекция v_x скорости \vec{v} на координатную ось OX имеет отрицательное значение.

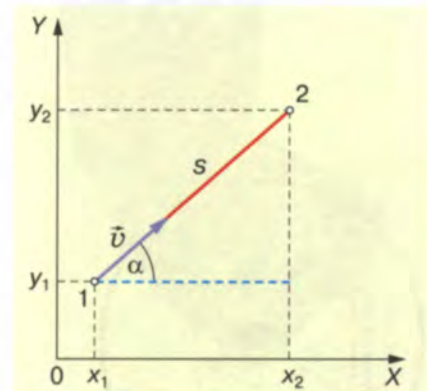


Рис. 2.7

Поступательное движение. Движение одной точки тела может характеризовать движение всех остальных точек тела в том случае, если перемещения всех точек тела одинаковы. Такое движение тел называется **поступательным движением**.

Относительность движения. Траектория движения, пройденный путь и перемещение зависят от выбора системы отсчёта. Это свойство механического движения называется **относительностью движения**.

Задача 2.1. Докажите, что при равномерном прямолинейном движении точки в плоскости XOY под углом α к координатной оси OX (см. рис. 2.7) со скоростью v проекции вектора скорости на оси OX и OY равны соответственно $v_x = v \cos \alpha$, $v_y = v \sin \alpha$.

Задача 2.2. Материальная точка движется равномерно и прямолинейно в плоскости XOY под углом 53° к оси OX со скоростью 20 м/с. Найдите путь s точки и изменения её координат Δx и Δy за 5 с.

Вопросы

1. Какое движение называют поступательным?
2. Приведите примеры относительности траектории и пути механического движения.
3. Как определяются координаты фигур на шахматной доске?
4. Как определяются координаты места проживания жильцов в многоэтажном доме?



Рис. 2.8

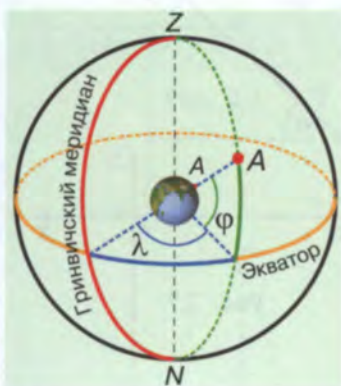


Рис. 2.9

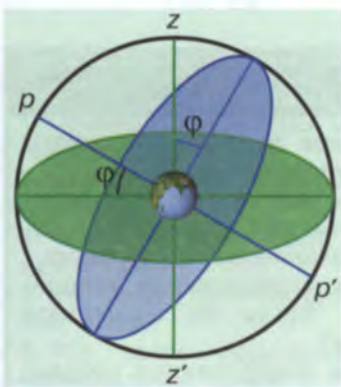


Рис. 2.10

Определение географических координат на Земле.

Географические координаты точки A на поверхности Земли определяются её **широтой** — дугой φ географического меридиана в градусах от земного экватора до точки A и **долготой** — дугой λ земного экватора от Гринвичского меридиана до географического меридиана точки A (рис. 2.8). Координаты точек на поверхности Земли удобно демонстрировать дугами меридианов и экватора на глобусе. Для практического определения географических координат необходимы астрономические наблюдения и измерения.

Представим себе мысленно Землю как прозрачный глобус с маленькой электрической лампой в центре. Если поставить такой глобус в центр сферического экрана, как в планетарии, то все точки поверхности глобуса спроецируются на поверхность экрана планетария. Для определения широты точки A нужно измерить угол φ между радиусом сферы, проходящим через точку A , и плоскостью земного экватора. Для определения долготы точки A нужно измерить угол λ между плоскостью меридиана, проходящего через точку A , и плоскостью Гринвичского меридиана (рис. 2.9).

Хотя Земля не прозрачна и нет вокруг неё сферического экрана, для астрономов картина звёздного неба выглядит примерно так, как в мысленном эксперименте с прозрачным глобусом. Из-за вращения Земли вокруг своей оси все звёзды, планеты, Луна и Солнце кажутся вращающимися вокруг Земли с периодом в одни сутки. Ось pp' , вокруг которой происходит кажущееся вращение звёздного неба, в астрономии называется **осью мира** (рис. 2.10). Ось мира совпадает с осью суточного вращения Земли. Плоскость, перпендикулярная оси мира, называется **плоскостью небесного экватора** (голубой цвет). Линия пересечения плоскости небесного экватора с видимой сферой звёздного неба называется **небесным экватором**. Это и есть проекция земного экватора на небесную сферу. Угол φ между вертикальной линией zz' и плоскостью экватора равен широте места наблюдения. Легко доказать, что этот угол равен углу между осью мира pp' (осью вращения Земли) и горизонтальной плоскостью (зелёный цвет).

Около точки p на небесной сфере находится Полярная звезда. Поэтому для определения широты места наблюдения можно измерить угол φ между прямой, направленной на Полярную звезду, и горизонтальной плоскостью. На практике для определения широты места используются наблюдения и за другими небесными светилами, в том числе за Солнцем и Луной. Для этого измеряют угол между горизонтальной плоскостью и направлением на светило с помощью прибора, называемого секстантом (рис. 2.11).

Для определения долготы места наблюдения нужно уметь определять местное время по Солнцу и иметь точные часы, показывающие солнечное время на Гринвичском меридиане. Такие часы называются хронометрами. Проще всего по Солнцу определяется полдень, когда центр диска Солнца пересекает плоскость меридиана. В этот момент нужно заметить показания часов, показыва-

ющих время на Гринвичском меридиане. Если время $t_{гр}$ на Гринвичском меридиане на Δt меньше 12 ч, то это значит, что Земля должна ещё вращаться в течение времени Δt до наступления полудня на Гринвичском меридиане. Следовательно, место наблюдения находится к востоку от Гринвичского меридиана.

Земля совершает один оборот вокруг оси за сутки, за 1 ч поворачивается на 15° ($360^\circ/24 = 15^\circ$). За интервал времени Δt в часах угол λ поворота Земли равен $\lambda = 15^\circ \cdot \Delta t$.

Если время $t_{гр}$ на Гринвичском меридиане на Δt больше 12 ч, то это значит, что Земля вращалась в течение времени Δt после наступления полудня на Гринвичском меридиане. Место наблюдения находится на долготе $\lambda = 15^\circ \cdot \Delta t$ к западу от Гринвичского меридиана.

Координаты небесных тел. При определении географической долготы ошибка в измерении времени на 1 минуту в экваториальной зоне ведёт к ошибке в определении положения наблюдателя на Земле по долготе на 28 километров! Поэтому точное измерение времени является очень важной практической задачей для любого путешественника. Для решения этой задачи нужно иметь очень точные часы. Такие часы — морской хронометр — были созданы в XVIII в., их погрешность не превышала 0,2 секунды в день (рис. 2.12).

Сегодня время измеряется с точностью в миллионные доли секунды. Это позволяет очень точно определять координаты на Земле. Путешественнику достаточно иметь специальный прибор-навигатор, в котором имеется радиопередатчик, радиоприёмник и компьютер. Внутренние часы прибора с помощью приёмника проверяются по точным атомным часам на спутниках. Это позволяет определять координаты места на Земле с точностью до нескольких десятков метров.

Для определения положения небесного тела в пространстве можно выбрать телом отсчёта Землю, а за точку отсчёта принять глаз наблюдателя. Измерив расстояние от Земли до Солнца, находим одну его координату R , равную 150 млн км. Для определения направления на Солнце нужно выбрать две плоскости. Первой может быть горизонтальная плоскость в месте наблюдения, второй — вертикальная плоскость, проходящая через точку юга на горизонте (плоскость меридиана) (рис. 2.13). Соединяем прямой OC точку наблюдения с центром Солнца. Через прямую OC и отвесную линию ZN проводим вертикальную плоскость. Измеряем угол h между прямой OC и горизонтальной плоскостью. Этот угол называют **высотой** светила. Затем измеряем угол A между плоскостью меридиана и вертикальной плоскостью, проходящей через точку O начала отсчёта и Солнце. Этот угол называют **азимутом** светила (см. рис. 2.13). Теперь известно положение Солнца в пространстве: оно находится на расстоянии $R = 150\,000\,000$ км от точки O наблюдения, высота Солнца h , его азимут A .

Высота и азимут называются горизонтальными координатами светила. Горизонтальные координаты удобны для нахождения светила на небосводе.



Рис. 2.11



Рис. 2.12

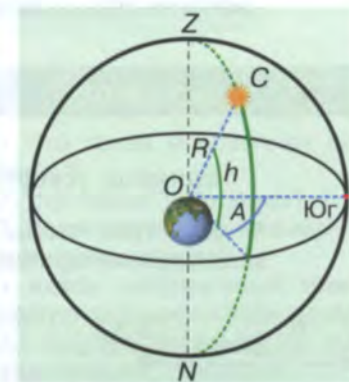


Рис. 2.13

@ Найдите
http://www.brandwatch.ru/watcharticles/insidewatch/sea_chrono/
 (Морской хронометр.)
<http://www.gps-forum.ru/content/view/20/35/>
 (GPS-Forum.)

§ 3. Мгновенная скорость. Ускорение

Равномерное и неравномерное движение. При **равномерном** движении тело за любые одинаковые интервалы времени проходит одинаковые пути. Отношение пройденного пути s к времени движения t называется **скоростью** v равномерного движения: $v = \frac{s}{t}$. Движение, при котором за равные промежутки времени тело проходит различные пути, называется **неравномерным движением**.

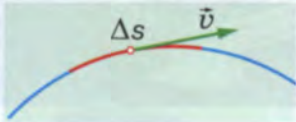


Рис. 3.1

Мгновенная скорость. Движение материальной точки по любой траектории в любой момент времени t можно характеризовать её **мгновенной скоростью**. Для нахождения мгновенной скорости материальной точки в момент времени t нужно выделить очень малый интервал времени Δt около этого момента и определить пройденный за этот интервал времени путь Δs (рис. 3.1).

Модуль мгновенной скорости v в момент времени t равен отношению пройденного пути Δs к интервалу времени движения Δt при условии, что этот интервал времени стремится к нулю:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \Delta t \rightarrow 0.$$

Вектор мгновенной скорости \vec{v} материальной точки направлен по касательной к траектории движения.

Вектор скорости обозначают символом v или \vec{v} , модуль вектора скорости может иметь обозначения $|\vec{v}|$, $|v|$ или v .

Ускорение. Для описания движения тел с изменяющейся скоростью необходима физическая величина, характеризующая процесс изменения скорости с течением времени. Такой величиной является **ускорение**.

Ускорением \vec{a} называется векторная физическая величина, равная отношению изменения вектора скорости $\Delta \vec{v}$ к интервалу времени Δt , за которое произошло это изменение, при условии, что этот интервал времени стремится к нулю:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}, \Delta t \rightarrow 0.$$

Единица ускорения в Международной системе единиц равна $\frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}^2$.

Для того чтобы найти вектор изменения мгновенной скорости $\Delta \vec{v}$ при перемещении материальной точки из точки 1 траектории движения в точку 2, нужно вычесть из вектора мгновенной скорости \vec{v}_2 в конечной точке вектор мгновенной скорости \vec{v}_1 в начальной точке: $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$.

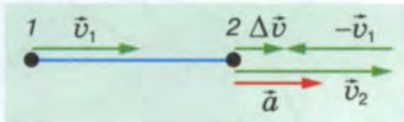


Рис. 3.2

Разность векторов \vec{v}_2 и \vec{v}_1 равна сумме векторов \vec{v}_2 и $-\vec{v}_1$. Для сложения векторов \vec{v}_2 и $-\vec{v}_1$ совместим начало вектора $-\vec{v}_1$ с концом вектора \vec{v}_2 (рис. 3.2). Вектор $\Delta \vec{v}$ соединяет начало вектора \vec{v}_2 с концом вектора $-\vec{v}_1$.

При прямолинейном движении с убывающей скоростью вектор изменения скорости $\Delta \vec{v}$ направлен противоположно векторам скорости \vec{v}_2 и \vec{v}_1 (рис. 3.3).

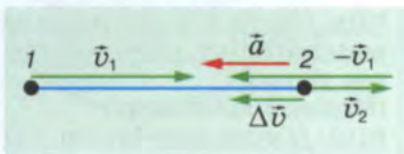


Рис. 3.3

Таким образом, при прямолинейном движении с возрастающей скоростью вектор ускорения \vec{a} совпадает по направлению с вектором скорости \vec{v} , при движении с убывающей скоростью вектор \vec{a} направлен противоположно вектору скорости \vec{v} .

Равноускоренное прямолинейное движение. Движение тела с постоянным по модулю и направлению ускорением называется **равноускоренным движением**. При равноускоренном прямолинейном движении ускорение \vec{a} движущегося тела равно отношению изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени Δt при любом значении интервала времени:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Отсюда изменение скорости $\Delta\vec{v}$ за интервал времени Δt равно произведению ускорения \vec{a} на интервал времени Δt :

$$\Delta\vec{v} = \vec{a}\Delta t \quad (3.2)$$

Если в начальный момент времени $t = 0$ начальная скорость равна \vec{v}_0 , то при равноускоренном движении с ускорением \vec{a} через интервал времени $\Delta t = t$ скорость станет равной

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \Delta\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \quad (3.3)$$

При равноускоренном прямолинейном движении с возрастающей скоростью векторы скорости \vec{v} и изменения скорости $\Delta\vec{v}$ имеют одинаковое направление. В этом случае модуль суммы векторов равен сумме их модулей:

$$v = v_0 + \Delta v, \quad v = v_0 + at \quad (3.4)$$

При равноускоренном прямолинейном движении с убывающей скоростью векторы скорости \vec{v} и изменения скорости $\Delta\vec{v}$ направлены противоположно. В этом случае модуль суммы векторов равен разности их модулей:

$$v = v_0 - \Delta v, \quad v = v_0 - at \quad (3.5)$$

Формула (3.5) применима для вычисления модуля скорости до того момента времени, пока вектор скорости не станет равным нулю или не изменит своё направление на противоположное.

Если начальная скорость v_0 равна нулю, то модуль скорости равноускоренного прямолинейного движения определяется формулой

$$v = at \quad (3.6)$$

Свободное падение тел. Примером равноускоренного движения является свободное падение тел. Опыты показали, что любые тела под действием только силы тяжести вблизи поверхности Земли падают с постоянным и одинаковым ускорением $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Пример решения задачи

Задача. Автомобиль начал равноускоренное прямолинейное движение из состояния покоя. Через 10 с его скорость стала равной 40 м/с. С каким ускорением двигался автомобиль?

<p>Дано:</p> <p>$v_0 = 0$ $t = 10 \text{ с}$ $v = 40 \text{ м/с}$</p> <hr/> <p>$a = ?$</p>	<p>Решение</p> <p>$v = at, a = \frac{v}{t}, a = \frac{40 \text{ м/с}}{10 \text{ с}} = 4 \text{ м/с}^2$.</p> <p>Ответ: $a = 4 \text{ м/с}^2$.</p>
--	--

Задача 3.1. По графику (рис. 3.4) определите вид движения и напишите формулу, выражающую зависимость модуля скорости от времени.

Задача 3.2. При равноускоренном прямолинейном движении скорость поезда за 1 мин 40 с увеличилась от 36 до 72 км/ч. Найдите ускорение поезда.

Задача 3.3. С какой скоростью падал бы парашютист через 20 с после прыжка с воздушного шара при отсутствии сил сопротивления воздуха?

Вопросы

1. Что такое мгновенная скорость?
2. Что такое ускорение?
3. Какое движение называется равноускоренным?
4. Какое направление имеет вектор ускорения при прямолинейном движении с возрастающей скоростью? с убывающей скоростью?

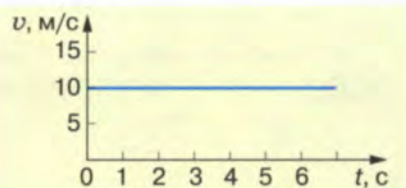


Рис. 3.4

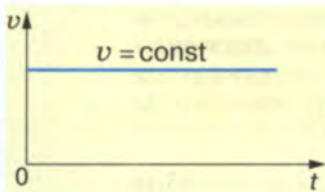


Рис. 3.5

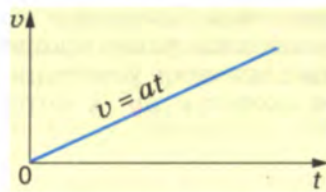


Рис. 3.6

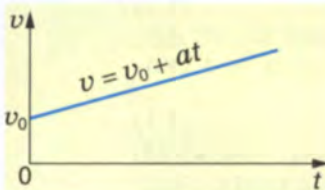


Рис. 3.7

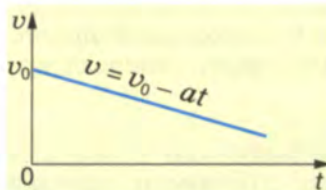


Рис. 3.8

График скорости равноускоренного прямолинейного движения. Движение с ускорением, равным нулю, является равномерным прямолинейным движением. Зависимость модуля скорости v равномерного прямолинейного движения от времени выражается формулой $v = \text{const}$.

Графиком зависимости модуля скорости v равномерного движения от времени является прямая, параллельная оси, по которой отсчитывается время t (рис. 3.5).

Зависимость модуля скорости v равноускоренного прямолинейного движения от времени при начальной скорости, равной нулю, выражается формулой $v = at$. Графиком зависимости модуля скорости v такого движения от времени t является наклонная прямая,

проходящая через начало координат (рис. 3.6).

Зависимость модуля скорости v равноускоренного прямолинейного движения от времени t при начальной скорости v_0 и одинаковом направлении векторов скорости $\Delta \vec{v}$ и ускорения \vec{a} выражается формулой

$$v = v_0 + at.$$

График зависимости модуля скорости v такого движения от времени t представлен на рисунке 3.7.

Зависимость модуля скорости v равноускоренного прямолинейного движения от времени t при начальной скорости v_0 и противоположных направлениях векторов скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} выражается формулой

$$v = v_0 - at.$$

График зависимости модуля скорости v такого движения от времени t представлен на рисунке 3.8.

Пример решения задачи

Задача. По графику (рис. 3.9) определите вид движения и напишите формулу, выражающую зависимость модуля скорости от времени.

Решение

Графиком зависимости модуля скорости от времени, представленным на рисунке 3.9, является прямая, проходящая через начало координат. Отсюда следует, что в момент времени $t = 0$ модуль скорости был равен нулю. Это график равноускоренного движения с начальной скоростью, равной нулю: $v_0 = 0$. Формула зависимости модуля скорости от времени для такого движения имеет вид

$$v = at.$$

По графику видно, что в момент времени $t = 5$ с модуль скорости равен $v = 10$ м/с. По этим данным вычисляем ускорение движения:

$$a = \frac{v}{t} = \frac{10 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2.$$

Формула зависимости модуля скорости равноускоренного движения с таким ускорением имеет вид $v = 2t$.

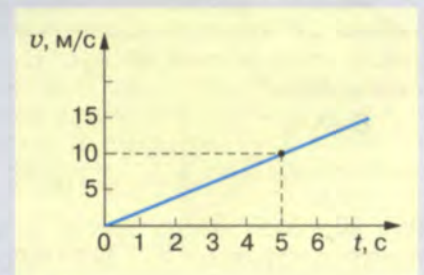


Рис. 3.9

Задача 3.4. При торможении перед светофором автомобиль двигался равноускоренно и прямолинейно с ускорением 3 м/с^2 . Сколько времени прошло от момента начала торможения до остановки автомобиля, если скорость автомобиля в момент начала торможения была равна 108 км/ч ? С какой скоростью двигался автомобиль через 5 с после начала торможения?

Задача 3.5. По графику (рис. 3.10) определите вид движения и напишите формулу, выражающую зависимость модуля скорости от времени.

Задача 3.6. По графику (рис. 3.11) определите вид движения и напишите формулу, выражающую зависимость модуля скорости от времени.

Задача 3.7. Постройте график зависимости модуля скорости автомобиля от времени, если он из состояния покоя движется равноускоренно и прямолинейно и через 10 с его скорость становится равной 40 м/с .

Задача 3.8. По условию задачи 3.2 постройте график зависимости модуля скорости поезда от времени.

Задача 3.9. При торможении перед светофором автомобиль двигался равноускоренно и прямолинейно с ускорением 4 м/с^2 . С какой скоростью двигался автомобиль через 10 с после момента начала торможения, если скорость автомобиля в момент начала торможения была равна 72 км/ч ?

Как измеряет скорость автомобиля автоинспектор. Вы, конечно, видели прибор, который автоинспектор направляет на движущийся автомобиль для измерения скорости его движения (рис. 3.12). Как же этот прибор измеряет скорость автомобиля?

Этот прибор является мини-радиолокатором. В нём имеется радиопередатчик высокой частоты и радиоприёмник. Излучённые передатчиком радиоволны направляются на автомобиль и отражаются от него. Приёмник улавливает отражённые волны и сравнивает их частоту с частотой отправленных волн. Если автомобиль неподвижен, частоты отправленного и отражённого сигналов совпадают. Если автомобиль удаляется, то частота отражённых волн меньше частоты отправленного сигнала. Когда автомобиль приближается, частота отражённых волн больше частоты отправленного сигнала. Это физическое явление называется эффектом Доплера.

По измеренному изменению частоты сигнала прибор вычисляет скорость движения автомобиля и выдаёт результат на дисплее прибора.

Попробуйте доказать, что при отражении от автомобиля, удаляющегося от наблюдателя со скоростью v , частота ν сигнала изменяется на величину $\Delta\nu$, вычисляемую по формуле $\Delta\nu = \frac{v\nu}{c}$, где c — скорость радиоволн.

Подсказкой может служить рисунок 3.13, на котором условно изображены первичные и отражённые волны для случаев удаления и приближения автомобиля.

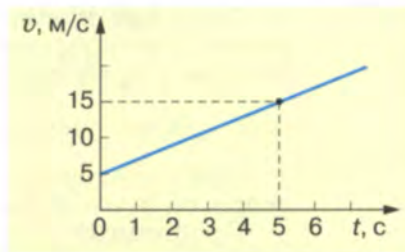


Рис. 3.10

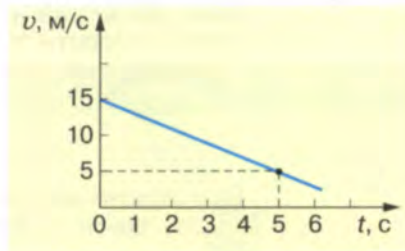


Рис. 3.11



Рис. 3.12

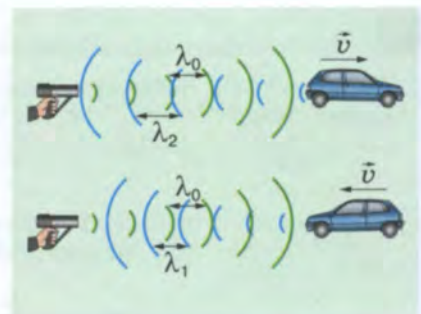


Рис. 3.13

§ 4. Путь при равноускоренном движении

Путь при прямолинейном равноускоренном движении. При прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью v_0 и скоростью v в момент времени t пройденный за время t путь s оказывается равным произведению среднего арифметического значения скорости на время движения t : $s = \frac{v_0 + v}{2} t$.

При движении с начальной скоростью v_0 и одинаковым направлением векторов скорости и ускорения скорость в момент времени t равна $v = v_0 + at$.

Пройденный за время t путь равен:

$$s = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} t, \quad s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (4.1)$$

При движении с начальной скоростью v_0 и противоположном направлении векторов скорости и ускорения скорость в момент времени t равна $v = v_0 - at$.

Пройденный за время t путь равен:

$$s = \frac{v_0 + v_0 - at}{2} t, \quad s = v_0 t - \frac{at^2}{2}. \quad (4.2)$$

При прямолинейном равноускоренном движении при условии $v_0 = 0$ скорость в момент времени t равна:

$$v = at, \quad (4.3)$$

пройденный за время t путь равен:

$$s = \frac{at^2}{2}. \quad (4.4)$$

В этом случае из формул (4.3) и (4.4) следует:

$$s = \frac{v^2}{2a} \quad (4.5), \quad v = \sqrt{2as} \quad (4.6), \quad a = \frac{v^2}{2s} \quad (4.7),$$

$$a = \frac{2s}{t^2} \quad (4.8), \quad t = \sqrt{\frac{2s}{a}} \quad (4.9).$$

? Вопрос

Какие параметры равноускоренного прямолинейного движения необходимо знать для вычисления пройденного пути?

Путь при криволинейном равноускоренном движении. Равноускоренное движение необязательно бывает прямолинейным. Вид траектории равноускоренного движения зависит от выбора системы отсчёта. Брошенный под углом к горизонту камень относительно Земли движется по криволинейной траектории с ускорением \vec{g} , постоянным по модулю и направлению. Это равноускоренное движение. Однако все формулы (4.1) — (4.9), полученные для равноускоренного прямолинейного движения, неприменимы для равноускоренного криволинейного движения.

Пример решения задачи

Задача. На прямолинейном участке шоссе за 20 с движения с постоянным ускорением скорость автобуса увеличилась от 5 до 15 м/с. Определите ускорение движения автобуса и пройденный за это время путь.

Дано:

$$t = 20 \text{ с}$$

$$v_1 = 5 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 15 \text{ м/с}$$

$$a = ? \text{ с}^{-2} \quad s = ?$$

Решение

Ускорение при равноускоренном прямолинейном движении равно частному от деления изменения скорости Δv на время t этого изменения:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t}.$$

Вычисляем значение модуля ускорения: $a = \frac{15 \text{ м/с} - 5 \text{ м/с}}{20 \text{ с}} = 0,5 \text{ м/с}^2$.

Пройденный путь s находим, используя формулу (4.1):

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = 5 \text{ м/с} \cdot 20 \text{ с} + \frac{0,5 \text{ м/с}^2 \cdot 400 \text{ с}^2}{2} = 200 \text{ м}.$$

Тот же результат можно получить, умножив среднее арифметическое значение скорости на время движения: $s = \frac{v_1 + v_2}{2} t = \frac{5 \text{ м/с} + 15 \text{ м/с}}{2} 20 \text{ с} = 200 \text{ м}.$

Ответ: $a = 0,5 \text{ м/с}^2$, $s = 200 \text{ м}.$

Экспериментальное задание 4.1

Работаем в группе

Измерение ускорения свободного падения

Оборудование: комплект «Лаборатория L-микро» по механике.

Измерьте ускорение свободного падения.

Содержание работы

Для проведения опытов используйте направляющую плоскость 1, каретку 2, датчики 3, электронный секундомер 4, пластиковый коврик 5 (рис. 4.1). Ускорение свободного падения можно определить, измерив пройденный путь и время движения из состояния покоя.

Для точного измерения времени падения используется электронный секундомер 4 с магнитными датчиками 3. Запуск и остановка электронного секундомера могут осуществляться либо нажатием кнопки «Пуск/Стоп», либо с помощью магнитоуправляемых контактов — герконов — в выносных датчиках 3. Геркон (герметический контакт) состоит из двух близко расположенных упругих металлических контактов, которые при внесении в магнитное поле или при приближении магнита намагничиваются и притягиваются друг к другу. В результате замыкается участок электрической цепи, соединённый с выводами геркона. Схема электронного секундомера устроена так, что при первом замыкании электрических контактов на его входе происходит запуск секундомера, при следующем замыкании секундомер останавливается. Управление герконами осуществляется небольшим постоянным магнитом, укреплённым в середине внешней боковой стороны каретки 2.

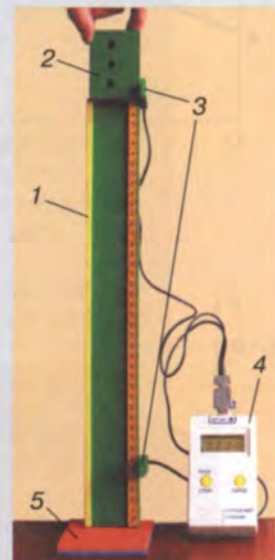


Рис. 4.1

Порядок выполнения задания

1. Установите направляющую плоскость почти вертикально для уменьшения влияния силы трения. С помощью магнитных держателей прикрепите датчики к направляющей плоскости, один у её верхнего края, другой у нижнего края.

2. Нажатием на кнопку «Сброс» установите нуль на шкале электронного секундомера. Проверьте работоспособность секундомера поочерёдным поднесением магнита каретки сначала к первому датчику, затем ко второму датчику. Секундомер должен начать измерение времени при поднесении магнита к верхнему датчику и завершить измерение при поднесении магнита к нижнему датчику. Цифры на шкале до точки показывают целые секунды, цифры после точки — десятые и сотые доли секунды.

3. Измерьте расстояние s между датчиками. Отпустите каретку и измерьте время t её свободного падения. Повторите измерения 5 раз и найдите среднее арифметическое значение времени движения.

4. Вычислите ускорение свободного падения:

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

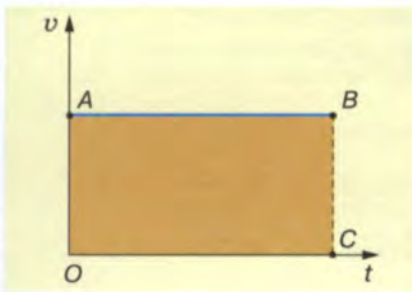


Рис. 4.2

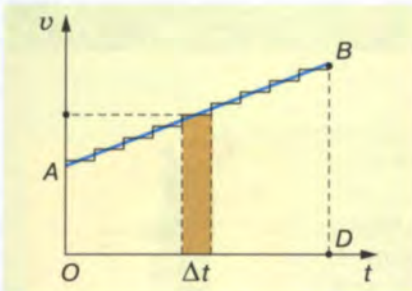


Рис. 4.3

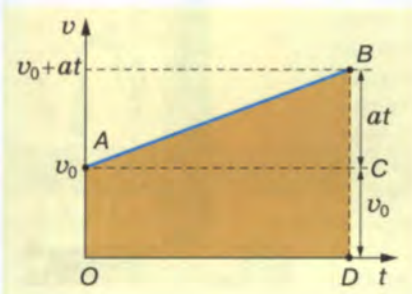


Рис. 4.4

Геометрический вывод формулы пути равноускоренного движения. При равномерном движении со скоростью v пройденный за время t путь s определяется уравнением $s = vt$. Прямая AB графика зависимости модуля скорости v от времени t при этом параллельна оси абсцисс (рис. 4.2).

Если площадь прямоугольника $OACB$ на графике выразить в единицах произведения скорости v на время t , то она оказывается равной пройденному пути s :

$$OA \cdot OC = vt = s.$$

При равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью \vec{v}_0 , сонаправленной с вектором ускорения \vec{a} , графиком зависимости модуля скорости v от времени t является прямая AB (рис. 4.3). На том же рисунке ломаной линией представлена последовательность равномерных движений, модуль скорости которых совпадает со значением мгновенной скорости равноускоренного движения в середине интервала времени. Путь, пройденный за каждый интервал времени Δt при равномерном движении, равен площади соответствующего прямоугольника на графике зависимости скорости от времени. Сумма площадей всех прямоугольников на графике равна площади трапеции $OABD$. При неограниченном уменьшении интервалов времени Δt последовательность кратковременных равномерных движений со скоростями, равными средним значениям мгновенной скорости равноускоренного движения в этом интервале времени, становится неотличимой от равноускоренного движения. Путь равноускоренного прямолинейного движения (в единицах произведения vt) оказывается равным площади под графиком скорости равноускоренного движения.

Площадь трапеции $OABD$ равна сумме площадей прямоугольника $OACD$ и треугольника ABC (рис. 4.4):

$$S_{OABD} = |OA| \cdot |OD| + \frac{1}{2} |BC| \cdot |AC|.$$

Подставляя значения отрезков OA , OD , BC и AC в соответствии с графиком (см. рис. 4.4), получаем, что путь s , пройденный за время t , определяется уравнением

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

Подобным способом можно получить формулу (4.2) для пути прямолинейного равноускоренного движения с противоположно направленными векторами скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} .

Задача 4.1. Поезд отправился от станции и двигался прямолинейно с постоянным ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. Какой путь был пройден поездом при таком движении за 2 мин?

Задача 4.2. Автомобиль движется со скоростью 108 км/ч по прямому шоссе. На каком минимальном расстоянии от перекрёстка необходимо начать торможение для остановки автомобиля, если максимально возможное значение ускорения при торможении равно 3 м/с^2 ?

Задача 4.3. Запущенный вертикально вверх мяч упал на Землю через 4 с. Найдите начальную скорость мяча и пройденный за 4 с путь. Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с^2 , влияние воздуха считайте пренебрежимо малым.

Задача 4.4. Автомобиль, движущийся со скоростью 72 км/ч, начал торможение перед светофором, и за 2 с равноускоренного прямолинейного движения его скорость уменьшилась до 36 км/ч. Определите путь, пройденный автомобилем при таком движении от момента начала торможения до остановки.

Задача 4.5. При свободном падении с высоты h камень за последнюю секунду падения прошёл путь $0,75h$. Найдите высоту h и время падения камня. Примите ускорение свободного падения равным 10 м/с^2 , влияние воздуха на движение камня считайте пренебрежимо малым.

Экспериментальное задание 4.2

Работаем в группе

Исследование равноускоренного движения

Оборудование: комплект «Лаборатория L-микро» по механике.

Исследуйте зависимость пути от времени при свободном падении.

Проверьте вывод Галилея о том, что при свободном падении тел пройденный путь пропорционален квадрату времени движения. Если утверждение Галилея верно, то при увеличении высоты свободного падения в 4 раза время падения должно возрасти в 2 раза.

Порядок выполнения задания

1. Направляющую плоскость (см. рис. 4.1) установите почти вертикально для уменьшения влияния силы трения. Датчики с помощью магнитных держателей прикрепите к направляющей плоскости, один на расстоянии 5 см от её верхнего края, другой на расстоянии 9 см от первого датчика. Нажатием на кнопку «Сброс» установите нуль на шкале секундомера.

2. Выполните измерения времени t_1 прохождения расстояния 9 см при начальной скорости, равной нулю. Для этого установите начальное положение каретки перед отпуском как можно ближе к первому датчику.

3. Установите второй датчик на расстоянии 36 см от первого датчика. Выполните измерения времени t_2 прохождения расстояния 36 см.

Вычислите отношение измеренных интервалов времени и сделайте вывод, прав ли Галилей.

Пример решения задачи

Задача. Найдите отношения путей, пройденных при равноускоренном прямолинейном движении из состояния покоя за один, два, три любых одинаковых интервала времени и т. д.

Решение

Обозначим произвольный интервал времени Δt . Пути, пройденные при равноускоренном прямолинейном движении с ускорением a из состояния покоя за один, два, три и т. д. таких интервала времени Δt , определяются выражениями

$$s_1 = \frac{a\Delta t^2}{2}, s_2 = \frac{a(2\Delta t)^2}{2}, s_3 = \frac{a(3\Delta t)^2}{2}, \dots, s_n = \frac{a(n\Delta t)^2}{2}.$$

Отношения пройденных путей равны:

$$s_1 : s_2 : s_3 : \dots : s_n = 1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots : n^2 = 1 : 4 : 9 : \dots : n^2.$$

Мы получили, что пути, пройденные при равноускоренном прямолинейном движении из состояния покоя за один, два, три и т. д. любых одинаковых интервала времени, относятся как квадраты натурального ряда чисел.

§ 5. Равномерное движение по окружности

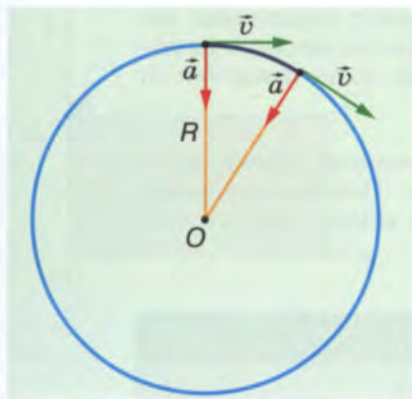


Рис. 5.1

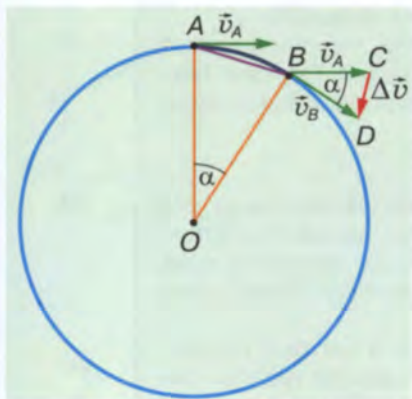


Рис. 5.2

Центростремительное ускорение. В природе и технике часто наблюдается движение тел по окружности с постоянной по модулю скоростью. Примерно так движется Луна вокруг Земли и Земля вокруг Солнца.

При равномерном движении материальной точки по окружности модуль вектора скорости \vec{v} не изменяется, но изменяется направление вектора. Поэтому равномерное движение по окружности является ускоренным движением. Неизменность модуля скорости означает, что нет составляющей вектора ускорения вдоль направления вектора скорости. В результате в любой момент времени вектор ускорения перпендикулярен вектору скорости и направлен к центру окружности (рис. 5.1). Поэтому ускорение при равномерном движении по окружности называют **центростремительным ускорением**.

Для определения модуля вектора центростремительного ускорения \vec{a} материальной точки при равномерном движении со скоростью \vec{v} по окружности радиусом R найдём изменение вектора её скорости при перемещении из точки A в точку B за малый интервал времени Δt . Для этого перенесём вектор скорости \vec{v}_A из точки A в точку B . Соединив конец вектора \vec{v}_A с концом вектора \vec{v}_B , находим разность этих векторов $\Delta \vec{v}$. Ускорение \vec{a} точки равно отношению изменения вектора скорости $\Delta \vec{v}$ к интервалу времени Δt , за который произошло это изменение (рис. 5.2).

Угол α между векторами скорости \vec{v}_A и \vec{v}_B в точках A и B окружности равен углу между радиусами окружности OA и OB (как углы с взаимно перпендикулярными сторонами). Поэтому равнобедренные треугольники OAB и BCD подобны. Для сторон этих подобных треугольников выполняется равенство отношений

$$\frac{CD}{BC} = \frac{AB}{OA}. \quad (5.1)$$

При очень малых значениях интервала времени Δt очень мал и угол α , поэтому длина хорды AB приблизительно равна длине s дуги AB : $AB \approx s = v\Delta t$.

Так как $CD = \Delta v$, $BC = v$, $OA = R$, из равенства 5.1 следует:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{v \cdot \Delta t}{R}, \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v \cdot v}{R}, \quad \boxed{a = \frac{v^2}{R}}. \quad (5.2)$$

Модуль центростремительного ускорения при равномерном движении по окружности прямо пропорционален квадрату скорости и обратно пропорционален радиусу окружности.

При равномерном движении по окружности радиусом R со скоростью v период обращения $T = \frac{2\pi R}{v}$.

? Вопросы

1. Является ли равномерное движение по окружности ускоренным движением?
2. Является ли равномерное движение по окружности равноускоренным движением?
3. Докажите, что при равномерном движении по окружности вектор ускорения направлен к центру окружности.

● Экспериментальное задание 5.1

Работаем в паре

Определение центростремительного ускорения

Оборудование: нить, шар с отверстием, линейка измерительная, лист бумаги, секундомер.

Определите ускорение шара, равномерно движущегося по окружности.

Порядок выполнения задания

1. На листе бумаги начертите окружность радиусом $R = 15$ см. Положите этот лист на стол. Пропустите нить через шар и отметьте на нити длину $l = 30$ см, начиная отсчёт от центра шара.

2. Возьмите нить за место отметки, расположите шар над центром начерченной окружности. Постепенно раскручивая шар, добейтесь его равномерного вращения по окружности радиусом $R = 15$ см (рис. 5.3).

Измерьте время t , за которое шар делает $n = 20$ оборотов по окружности радиусом $R = 15$ см.

3. Вычислите центростремительное ускорение:

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad v = \frac{2\pi Rn}{t}, \quad a = \frac{4\pi^2 R^2 n^2}{Rt^2} = \frac{4\pi^2 Rn^2}{t^2}.$$

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

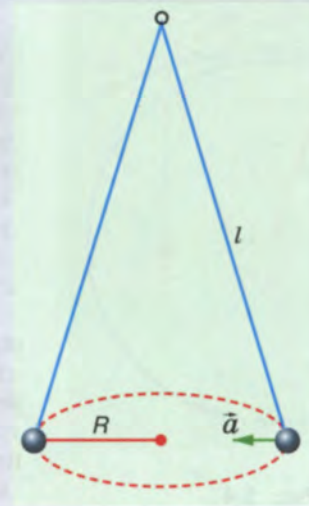


Рис. 5.3

Таблица 5.1

R , м	l , м	n	a , м/с ²

Пример решения задачи

Задача. Человек находится на экваторе Земли. Вычислите скорость и центростремительное ускорение равномерного кругового движения человека в результате суточного вращения Земли. Экваториальный радиус Земли равен 6378 км.

Решение

Скорость v равномерного движения поверхности Земли на экваторе равна:

$$v = \frac{s}{T} = \frac{2\pi R}{T}, \quad v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6\,378\,000 \text{ м}}{24 \cdot 3600 \text{ с}} \approx 464 \text{ м/с} \approx 1670 \text{ км/ч}.$$

Центростремительное ускорение равно:

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad a \approx \frac{(464)^2}{6\,378\,000} \text{ м/с}^2 \approx 0,034 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $v \approx 1670$ км/ч, $a \approx 0,034$ м/с².

Задача 5.1. Луна движется почти равномерно по окружности радиусом 384 000 км, совершая один оборот вокруг Земли за 27,3 сут. Вычислите скорость и центростремительное ускорение Луны.

Задача 5.2. Земля движется почти равномерно по окружности радиусом 150 000 000 км, совершая один оборот вокруг Солнца за 365,25 сут. Вычислите скорость движения Земли и её центростремительное ускорение при годовом движении вокруг Солнца.

Задача 5.3. При какой скорости равномерного движения автомобиля по поверхности Земли вдоль экватора радиусом 6400 км центростремительное ускорение его движения будет равно ускорению свободного падения тел на Землю?

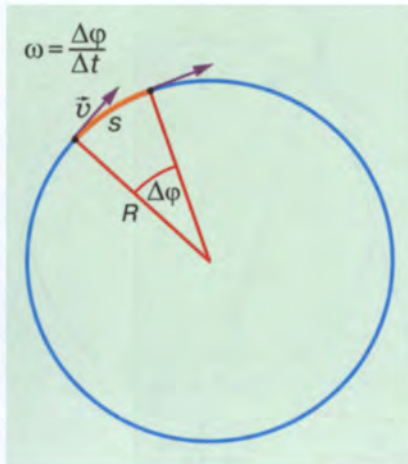


Рис. 5.4

Угловая скорость.

Угловой скоростью ω движения точки по окружности радиусом R называется отношение угла $\Delta\varphi$ поворота радиуса, соединяющего материальную точку с центром окружности, к интервалу времени Δt , за который произошёл этот поворот:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Угол поворота $\Delta\varphi$ измеряется в *радианах*, угловая скорость ω измеряется в *радианах в секунду*.

Так как длина s дуги окружности равна произведению радиуса R окружности на центральный угол $\Delta\varphi$ (рис. 5.4): $s = R\Delta\varphi$, то получаем соотношение между угловой и линейной скоростью

$$v = \frac{s}{\Delta t} = \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = \omega R, \quad v = \omega R.$$

Угловая скорость ω с периодом обращения T связана выражением $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Центростремительное ускорение связано с угловой скоростью выражением

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R, \quad a = \omega^2 R.$$

Мгновенное ускорение криволинейного движения.

Ускорение криволинейного движения в любой момент времени t равно отношению изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени Δt , за которое произошло это изменение, при условии, что этот интервал времени стремится к нулю:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}, \quad \Delta t \rightarrow 0.$$

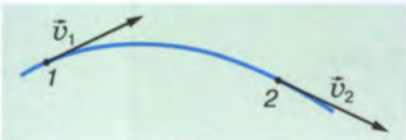


Рис. 5.5

Для того чтобы найти вектор изменения мгновенной скорости $\Delta\vec{v}$ при перемещении материальной точки из точки 1 траектории движения в точку 2 (рис. 5.5), нужно вычесть из вектора мгновенной скорости \vec{v}_2 в конечной точке вектор мгновенной скорости \vec{v}_1 в начальной точке:

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

Разность векторов \vec{v}_2 и \vec{v}_1 равна сумме векторов \vec{v}_2 и $-\vec{v}_1$. Для сложения векторов \vec{v}_2 и $-\vec{v}_1$ перенесём параллельно самому себе вектор \vec{v}_1 так, чтобы точка его начала совпадала с точкой начала вектора \vec{v}_2 . Из этой общей точки векторов \vec{v}_2 и $-\vec{v}_1$ построим вектор $-\vec{v}_1$ и найдём сумму векторов \vec{v}_2 и $-\vec{v}_1$ по правилу параллелограмма (рис. 5.6).

Из рисунка 5.6 видно, что разность векторов \vec{v}_2 и \vec{v}_1 можно найти и другим способом: соединить начала векторов \vec{v}_2 и \vec{v}_1 , затем получить их разность как вектор $\Delta\vec{v}$, соединяющий конец вектора \vec{v}_1 с концом вектора \vec{v}_2 . Направление вектора ускорения совпадает с направлением

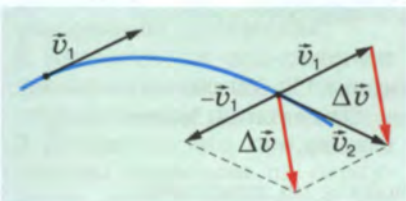


Рис. 5.6

вектора изменения скорости $\Delta \vec{v}$ при условии неограниченного приближения к нулю интервала изменения времени: $\Delta t \rightarrow 0$.

При криволинейном движении материальной точки вектор ускорения может быть направлен под любым углом к траектории движения и вектору скорости. Для анализа движения точки бывает удобно представлять произвольно ориентированный вектор ускорения \vec{a} как результат сложения двух векторов ускорения, из которых один вектор \vec{a}_1 направлен по касательной к траектории движения, т. е. вдоль вектора скорости, а другой вектор \vec{a}_2 направлен перпендикулярно вектору скорости (рис. 5.7).

Перпендикулярная вектору скорости составляющая ускорения \vec{a}_2 изменяет направление вектора скорости без изменения его модуля. Составляющая вектора ускорения \vec{a}_1 , направленная вдоль вектора скорости, изменяет модуль вектора скорости без изменения его направления при совпадении направлений векторов скорости и ускорения. Примером такого движения может быть свободное падение тела с вектором скорости, направленным вертикально вниз.

Та же составляющая вектора ускорения \vec{a}_1 , направленная вдоль вектора скорости, может изменять не только модуль вектора скорости, но и его направление при противоположных направлениях векторов скорости и ускорения. Примером такого движения может быть движение тела с вектором скорости, направленным вертикально вверх, с ускорением свободного падения, направленным вертикально вниз. До достижения верхней точки траектории движения изменяется только модуль скорости тела, но не изменяется направление вектора скорости, в верхней точке траектории направление вектора скорости изменяется на противоположное.

Задача 5.4. Космический корабль вращается на высоте 250 км над поверхностью Земли и имеет период обращения 1,49 ч. Определите скорость космического корабля и его центростремительное ускорение.

Задача 5.5. Траектория движения мотоциклиста по мосту через реку имеет вид дуги окружности. При скорости движения 20 м/с центростремительное ускорение было равным ускорению свободного падения 10 м/с². Чему равен радиус дуги окружности траектории?

Задача 5.6. На рисунке 5.8 показаны траектория движения материальной точки, направления векторов скорости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 в точках 1 и 2, направления вектора ускорения в этих точках и составляющие векторов ускорения, направленные вдоль векторов скорости и перпендикулярно им. Определите: увеличивается или уменьшается модуль вектора скорости в точке 1? Увеличивается или уменьшается модуль вектора скорости в точке 2?

Задача 5.7. Найдите зависимость центростремительного ускорения точек земной поверхности в результате суточного вращения Земли от широты местности. Рассчитайте эти величины для экватора и Москвы. При расчётах примите, что Земля имеет форму шара радиусом 6400 км. Широта Москвы 56°.

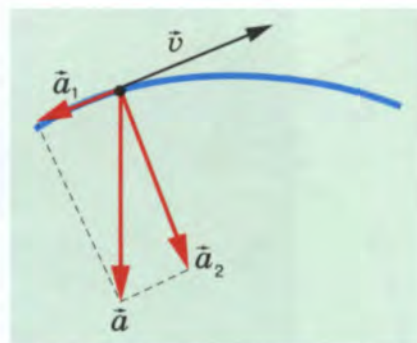


Рис. 5.7

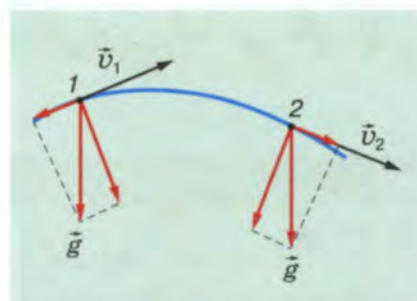


Рис. 5.8

§ 6. Относительность механического движения

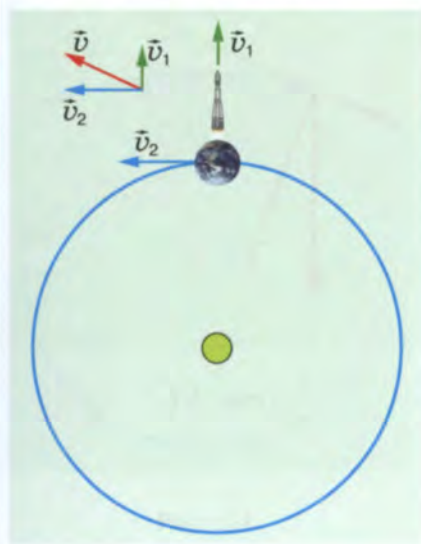


Рис. 6.1

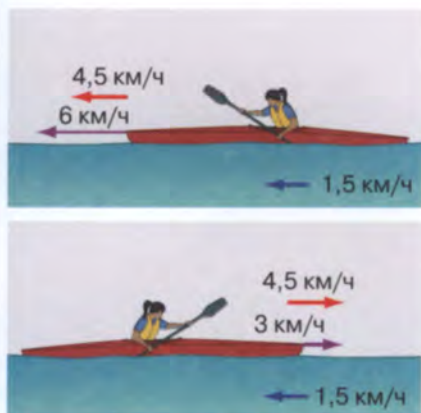


Рис. 6.2

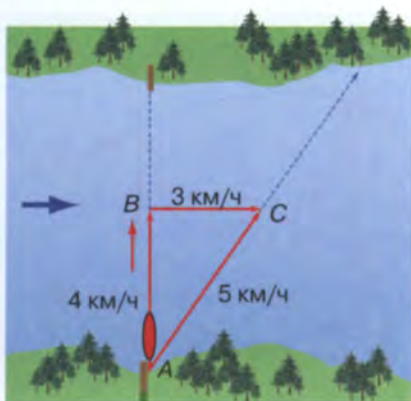


Рис. 6.3

Сложение скоростей. Траектория, путь, скорость и ускорение движения тела являются **относительными величинами**, зависящими от выбора системы отсчёта. Для решения многих практических задач нужно знать, как связаны между собой значения скоростей одного и того же тела в различных системах отсчёта.

Экспериментально установлено, что при движении тела со скоростью \vec{v}_1 в одной системе отсчёта его скорость \vec{v} во второй системе отсчёта, относительно которой первая движется со скоростью \vec{v}_2 , равна сумме векторов \vec{v}_1 и \vec{v}_2 :

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

Эта формула выражает **классический закон сложения скоростей**.

Например, если в системе отсчёта, связанной с Землёй, космическая ракета движется со скоростью \vec{v}_1 , а сама Земля движется относительно Солнца со скоростью \vec{v}_2 , то скорость \vec{v} ракеты относительно Солнца равна сумме векторов \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 6.1).

При одинаковом направлении векторов \vec{v}_1 и \vec{v}_2 модуль суммы векторов равен сумме их модулей:

$$v = v_1 + v_2,$$

при противоположных направлениях векторов \vec{v}_1 и \vec{v}_2 модуль суммы векторов равен разности их модулей:

$$v = v_1 - v_2.$$

Например, при движении лодки со скоростью 4,5 км/ч относительно воды в реке и скорости течения воды 1,5 км/ч скорость лодки относительно берега оказывается равной 6 км/ч при направлении движения лодки относительно воды по течению и равной 3 км/ч при направлении движения лодки относительно воды против течения (рис. 6.2).

Сравнительно просто решается задача о нахождении вектора скорости \vec{v} при взаимно перпендикулярном расположении векторов скоростей \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . Например, при движении лодки со скоростью 4 км/ч относительно воды в реке и скорости течения воды 3 км/ч скорость лодки относительно берега находится по правилу сложения векторов AB и BC (рис. 6.3). По теореме Пифагора

$$(AC)^2 = (AB)^2 + (BC)^2, \quad AC = \sqrt{(AB)^2 + (BC)^2},$$

$$v = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ (км/ч)}.$$

Из-за различия скоростей движения одного и того же тела в разных системах отсчёта, движущихся равномерно друг относительно друга, различными оказываются и траектории движения тела в них.

Рассмотрим такой пример. На некоторой высоте над земной поверхностью находится воздушный шар, неподвижный относительно Земли. Мимо воздушного шара пролетает самолёт со скоростью \vec{v} , вектор скорости самолёта параллелен горизонтальной поверхности.

Из воздушного шара и самолёта одновременно начинают падение на Землю два тела. Траектория движения тела, падающего с воздушного шара, в системе отсчёта, связанной с Землёй, — вертикальная прямая.



Рис. 6.4



Рис. 6.5

Траектория движения тела, падающего с самолёта, в той же системе отсчёта — кривая линия, называемая параболой (рис. 6.4).

Для наблюдателя, находящегося в самолёте, самолёт неподвижен, а воздушный шар и Земля кажутся движущимися со скоростью $-\vec{v}$. Поэтому траектория тела, падающего с самолёта, в этой системе отсчёта — вертикальная прямая, а траектория движения тела, падающего с воздушного шара, — парабола (рис. 6.5).

Ускорение движения тела одинаково в любых системах отсчёта, движущихся относительно друг друга с постоянной скоростью. Поэтому и изменение скорости любого тела, равное

$$\Delta \vec{v} = \vec{a} \Delta t,$$

в таких системах отсчёта оказывается одинаковым.

Но в системах отсчёта, движущихся с ускорением одна относительно другой, ускорение тела оказывается различным. Например, при пикировании самолёта вниз с ускорением свободного падения \vec{g} пилот движется относительно Земли с тем же ускорением \vec{g} . Но относительно самолёта ускорение пилота равно нулю.

Задача 6.1. Два гребца хотят переправиться на другой берег реки как можно быстрее. Один решает плыть по воде перпендикулярно вектору скорости течения воды, и траекторией его движения оказалась прямая AE (рис. 6.6). Другой выбрал такое направление вектора скорости относительно воды, что его лодка двигалась по самой короткой траектории AD . Какой из гребцов быстрее достиг противоположного берега? Сколько времени затратил каждый из гребцов на переправу? Скорости лодок относительно воды одинаковы и равны 5 км/ч, скорость течения воды в реке 3 км/ч, ширина реки 400 м.

Задача 6.2. Два пловца находились на расстоянии 600 м друг от друга у одного берега реки. Они вошли в реку и поплыли навстречу друг другу по прямой: один по течению реки, другой против течения реки. Скорость движения каждого из них относительно воды равна 0,5 м/с, скорость течения реки 1 м/с. Через сколько времени после начала движения пловцы встретятся?

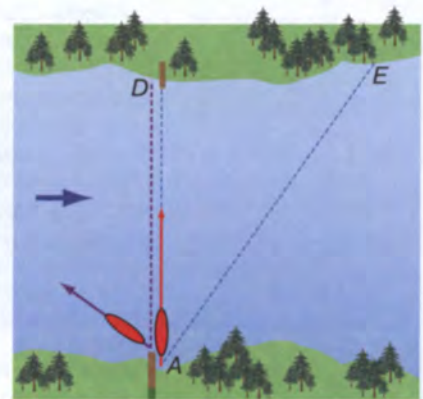


Рис. 6.6

? Вопросы

1. Зависят ли траектория движения тела, его скорость и ускорение от выбора системы отсчёта?
2. Как изменяется скорость движения тела при переходе из одной системы отсчёта в другую?

Границы применимости классического закона сложения скоростей. Классический закон сложения скоростей был установлен в опытах при скоростях движения тел, значительно меньших скорости света c в вакууме.

Когда стали возможными опыты по наблюдению за движением тел со скоростями, близкими к скорости света в вакууме, то было обнаружено, что классический закон сложения скоростей при этих условиях не выполняется. Например, если скорость движения тела относительно первой системы равна \vec{v}_1 , а сама эта система отсчёта движется со скоростью \vec{v}_2 относительно второй системы отсчёта, то при скоростях \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , близких к скорости света в вакууме, при одинаковой направленности векторов \vec{v}_1 и \vec{v}_2 модуль скорости \vec{v} тела во второй системе отсчёта определяется по формуле

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

Этот закон называют релятивистским законом сложения скоростей. Из этого закона следует, что не существует систем отсчёта, в которых скорость движения тела может превысить значение скорости света в вакууме. Классический закон сложения скоростей получается как частный случай из релятивистского закона сложения скоростей при условии $v_1 \ll c$ и $v_2 \ll c$.

Примеры решения задач

Задача 1. Камень брошен под углом 60° к горизонту с начальной скоростью 25 м/с. Определите скорость камня через 1,5 с после начала движения. (Спротивление воздуха пренебрежимо мало, ускорение свободного падения равно 10 м/с^2 .)

Дано:

$$\begin{aligned} \alpha &= 60^\circ \\ v_0 &= 25 \text{ м/с} \\ t &= 1,5 \text{ с} \\ g &= 10 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

v — ?

Решение

Начало отсчёта системы координат помещаем в точку, из которой камень начал двигаться. Ось OY направляем вертикально вверх, а ось OX располагаем горизонтально так, чтобы вектор скорости лежал в плоскости HOY . Систему отсчёта связываем с землёй. Движение камня происходит в плоскости HOY .

Для определения положения камня на этой плоскости в момент времени t нужно знать его координаты x и y . Движение камня равноускоренное с ускорением свободного падения g .

За начало отсчёта времени примем момент броска камня. Запишем начальные условия:

$$\begin{aligned} x_0 &= 0, y_0 = 0, v_{0x} = v_0 \cos \alpha, v_{0y} = v_0 \sin \alpha, \\ a_x &= 0, a_y = -g. \end{aligned}$$

Проекции скорости камня на оси координат равны (рис. 6.7) $v_x = v_{0x} + a_x t$, $v_y = v_{0y} + a_y t$.

С использованием начальных условий получаем

$$v_x = v_0 \cos \alpha, v_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

Отсюда модуль скорости в любой момент времени t равен:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0 \sin \alpha - gt)^2}.$$

Направление вектора скорости камня в момент времени t определяется углом β наклона вектора скорости тела к горизонтальной плоскости в момент t :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

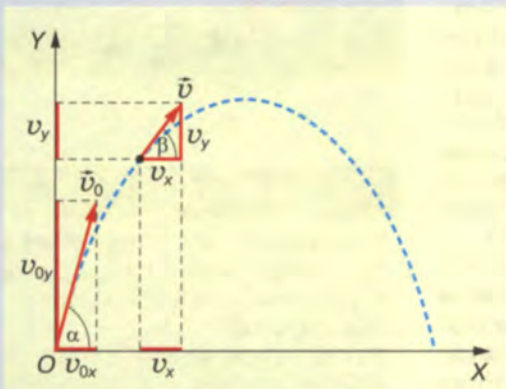


Рис. 6.7

Подставив числовые данные, получаем

$$v = \sqrt{625 \cdot 0,25 + (25 \cdot 0,866 - 10 \cdot 1,5)^2} \text{ м/с} \approx 14,2 \text{ м/с},$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{25 \cdot 0,866 - 15}{25 \cdot 0,5} \approx 0,532. \quad \beta = 28^\circ.$$

Ответ: $v \approx 14,2 \text{ м/с}$.

Задача на определение координат тела, брошенного с некоторой начальной скоростью под углом к горизонту, является важной практической задачей. Её должны уметь решать артиллеристы для попадания снарядом в нужную цель. Конечно, на практике эта задача значительно сложнее, так как необходимо учитывать влияние сопротивления воздуха, действие ветра, кривизну земной поверхности.

Задача 2. Под каким углом к горизонту нужно бросить камень для того, чтобы он улетел как можно дальше?

Решение

Используя решение задачи 1, найдём дальность полёта камня при условии, что начальная точка броска и конечная точка траектории полёта камня находятся на одной горизонтальной поверхности, т. е. выполняются начальные условия $y_n = y_k = 0$.

При любом значении угла наклона α вектора скорости к горизонту дальность полёта s равна координате x_k камня в момент времени t_k его соприкосновения с горизонтальной поверхностью:

$$s = x_k = v_0 \cos \alpha \cdot t_k.$$

Время полёта камня t_k определяется по условию равенства нулю координаты y в момент достижения поверхности Земли:

$$y_k = v_{0y} t_k - \frac{gt_k^2}{2} = v_0 \sin \alpha \cdot t_k - \frac{gt_k^2}{2} = 0, \quad t_k = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Подставив полученное выражение для конечного времени движения t_k в формулу для вычисления дальности полёта, получаем

$$s = x_k = v_0 \cos \alpha \cdot t_k = \frac{v_0 \cos \alpha \cdot 2v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Полученное выражение показывает, что при одинаковом значении модуля начальной скорости v_0 камня дальность полёта будет максимальной при максимальном значении $\sin 2\alpha$. Максимально возможное значение синуса угла достигается при значении угла 90° , $2\alpha = 90^\circ$. Следовательно, дальность полёта будет максимальной при значении угла $\alpha = 45^\circ$.

Задача 6.3. Одному телу, находящемуся на большой высоте h над землёй, сообщена скорость 6 м/с , направленная вертикально вверх, другому телу — скорость 4 м/с , направленная вертикально вниз. Через какое время расстояние между телами станет равным $l = 20 \text{ м}$? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Задача 6.4. Два велосипедиста одновременно начинают равномерное прямолинейное движение из одного места по прямым горизонтальным дорогам, расположенным под углом 90° одна к другой. Скорость первого велосипедиста 3 м/с , второго — 4 м/с относительно земли. Найдите расстояние между велосипедистами через 10 мин и скорость их удаления друг от друга.

Задача 6.5. Теннисный мяч после удара ракеткой полетел под углом 53° к горизонту со скоростью 144 км/ч . Начальная точка траектории полёта мяча находилась у самой поверхности земли. Определите дальность полёта мяча до падения на поверхность земли. Сопротивлением воздуха пренебречь. Ускорение свободного падения считать равным 10 м/с^2 , $\sin 53^\circ \approx 0,8$, $\cos 53^\circ \approx 0,6$.

Тест 1

Тест предназначен для самоконтроля результатов изучения тем «Методы научного познания. Система отсчёта и координаты точки. Мгновенная скорость. Ускорение. Путь при равноускоренном движении. Равномерное движение по окружности. Относительность механического движения».

Тест рассчитан на решение всех заданий и оформление ответов за один урок, т. е. за 45 мин.

- Запишите время начала работы над тестом и закончите решение через 45 мин.
- Откройте таблицу правильных ответов на с. 169 и отметьте все свои ошибочные ответы.
- В тех случаях когда понять ошибку не удаётся, откройте соответствующий параграф учебника, внимательно изучите материал, относящийся к данному заданию, и попробуйте ещё раз найти правильное решение.
- Если и теперь не удаётся получить правильное решение, обратитесь за помощью к одному из своих одноклассников или к учителю.

Таким образом, с помощью теста вы узнаете, какими знаниями и умениями не овладели.

Часть 1

A1. Научными гипотезами в физике называют такие гипотезы, которые

- 1) выдвигаются учёными-физиками
- 2) не противоречат известным научным фактам, объясняют ранее не объяснённые факты и предсказывают факты, доступные экспериментальной проверке
- 3) опровергают известные научные факты и объясняют ранее не объяснённые факты, недоступные экспериментальной проверке
- 4) объясняют ранее не объяснённые факты и предсказывают явления, недоступные экспериментальной проверке

A2. Какие из приведённых ниже утверждений являются научными фактами?

А. Все свободные тела в одном месте над Землёй падают с одинаковым ускорением.

Б. Землю посещали пришельцы из космоса.

В. У каждого человека есть бессмертная душа.

Г. Число 13 является для большинства людей несчастливым числом.

- 1) А, Б, В и Г
- 2) А, Б и В
- 3) А и В
- 4) только А

A3. Человек сначала прошёл расстояние 100 м по прямой в направлении на юг, затем прошёл расстояние 50 м на север. Чему равны пройденный путь и перемещение человека?

- 1) пройденный путь 150 м, перемещение 150 м
- 2) пройденный путь 150 м, перемещение 50 м

3) пройденный путь 50 м, перемещение 150 м

4) пройденный путь 50 м, перемещение 50 м

A4. При равноускоренном прямолинейном движении скорость тела за 2 с уменьшилась от 8 до 3 м/с. Чему был равен модуль ускорения тела?

- 1) 22 м/с²
- 2) 10 м/с²
- 3) 5,5 м/с²
- 4) 2,5 м/с²

A5. График зависимости модуля скорости прямолинейного движения тела от времени представлен на рисунке Т1.1. Ускорение тела в интервале времени от момента времени $t = 2$ с до момента времени $t = 4$ с равно

- 1) 4 м/с²
- 2) 3 м/с²
- 3) 2 м/с²
- 4) 1,5 м/с²

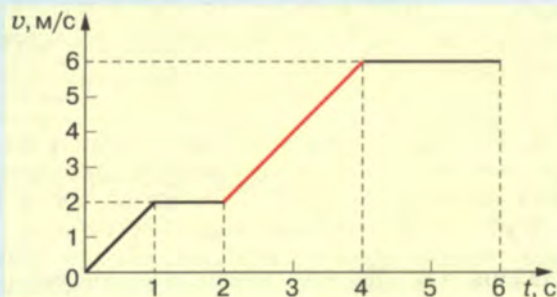


Рис. Т1.1

A6. По графику (рис. Т1.1) определите путь, пройденный телом от момента времени $t = 2$ с до момента времени $t = 4$ с.

- 1) 24 м
- 2) 16 м
- 3) 12 м
- 4) 8 м
- 5) 4 м

A7. При прямолинейном движении пройденный телом путь s изменяется со временем t по закону $s = t + 2t^2$ (м). Скорость тела через 3 с после начала отсчёта времени при таком движении равна

- 1) 6 м/с 3) 12 м/с 5) 19 м/с
2) 7 м/с 4) 13 м/с

A8. При прямолинейном движении скорость тела изменяется со временем t по закону $v = 1 + 4t$ (м/с). Пройденный телом путь s через 3 с после начала отсчёта времени при таком движении равен

- 1) 13 м 3) 21 м 5) 42 м
2) 19,5 м 4) 39 м

A9. При равноускоренном прямолинейном движении скорость автомобиля за 5 с уменьшилась с 25 до 5 м/с. За это время автомобилем пройден путь

- 1) 150 м 3) 75 м
2) 100 м 4) 37,5 м

A10. При движении велосипедиста по окружности радиусом 40 м с постоянной по модулю скоростью 10 м/с ускорение его движения равно

- 1) 0 3) $2,5 \text{ м/с}^2$
2) $0,25 \text{ м/с}^2$ 4) 4 м/с^2
5) 160 м/с^2

A11. Шар, подвешенный на нити, движется с постоянной по модулю скоростью по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости, вектор скорости направлен по касательной к этой окружности (стрелка 3 на рисунке Т1.2). Стрелка 1 направлена вертикально вниз. Какой стрелкой указано направление вектора ускорения шара?

- 1) 1 3) 3
2) 2 4) 4
5) ускорение равно нулю

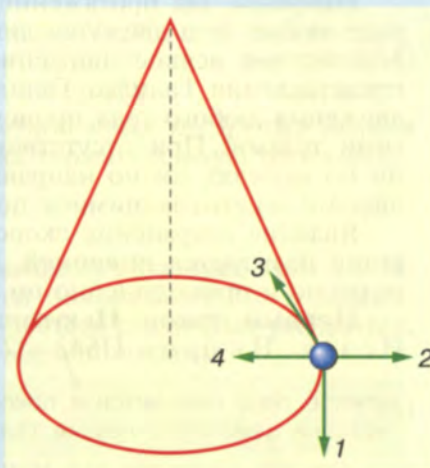


Рис. Т1.2

Часть 2

Выполните задания В1—В3 и запишите полученные ответы на поставленные вопросы без записи хода решения.

В1. При торможении перед светофором автомобиль движется равноускоренно и прямолинейно и за 4 с проходит путь 56 м. С каким ускорением двигался автомобиль, если его скорость в начале торможения была равна 24 м/с?

В2. Спутник движется вокруг планеты по круговой орбите с постоянной по модулю скоростью 1 км/с, центростремительное ускорение спутника $0,0025 \text{ м/с}^2$. Вычислите радиус орбиты спутника.

В3. Сани начинают равноускоренное прямолинейное движение по склону горы из состояния покоя и за первую секунду движения проходят расстояние 1 м. Какое расстояние при таком движении они пройдут за вторую секунду движения?

§ 7. Первый закон Ньютона

Инерция. На протяжении тысячелетий люди считали очевидным, что в природе любые тела движутся лишь под действием на них других тел, а без внешнего воздействия всякое движение само собой прекращается. Первым отверг такие представления Галилео Галилей. Галилей предположил, что изменения скорости движения любого тела происходят только в результате его взаимодействий с другими телами. При отсутствии действия других тел скорость тела не изменяется ни по модулю, ни по направлению. Это предположение он обосновал опытами с шарами, скатывающимися по наклонной плоскости.

Явление сохранения скорости движения тела при отсутствии внешних воздействий называется **инерцией**. После прекращения воздействий тело движется равномерно и прямолинейно по касательной к первоначальной траектории движения.

Первый закон Ньютона. На основе вывода Галилея английский учёный Исаак Ньютон (1643—1727) сформулировал **закон инерции**:

всякое тело находится в покое или движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют другие тела или их действия компенсируют друг друга.

Закон инерции называют **первым законом Ньютона** или **первым законом механики**.



Рис. 7.1

Инертность тел. Свойство тел сохранять своё состояние покоя или движения с постоянной скоростью называется **инертностью**. Свойством инертности обладает не только любое тело, но и любые части тела. Когда быстро движущийся автомобиль сталкивается с прочным препятствием, передняя часть автомобиля под действием препятствия испытывает ускорение и останавливается. Остальные части автомобиля по инерции продолжают движение с прежней скоростью и нагибаются на переднюю часть, разрушая её (рис. 7.1).

Масса. Физическая величина, являющаяся мерой инертности тел, названа **массой** тела. За единицу массы в СИ выбрана масса эталонной гири, хранящейся в Международном бюро мер и весов (Франция). Масса этого эталона называется **килограмм** (1 кг).

Способы измерения массы. Из двух взаимодействующих тел более инертным называют то тело, у которого при взаимодействии возникает меньшее ускорение. Во сколько раз масса m_1 первого тела больше массы m_2 второго тела, во столько раз ускорение a_1 первого тела при взаимодействии этих двух тел меньше ускорения a_2 второго тела:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}. \quad (7.1)$$

Сравнение масс двух тел можно выполнить, например, в таком эксперименте (рис. 7.2). Укрепим горизонтально пластину над столом. Сожмём стальную линейку, наденем на неё нитяную петлю и подвесим над пластиной. Вплотную к концам линейки поставим два шара. Затем перережем нить. Распрямляющаяся линейка отбрасывает шары в противоположные стороны. При малой массе линейки можно считать, что шары взаимодействуют друг с другом. Скорости шаров v_1 и v_2 , приобретённые за малый интервал времени Δt , равны произведениям их ускорений a_1 и a_2 на интервал времени Δt их взаимодействия:

$$v_1 = a_1 \Delta t, \quad v_2 = a_2 \Delta t. \quad (7.2)$$

Влияние воздуха на движение шаров пренебрежимо мало, поэтому проекции векторов скоростей шаров на горизонтальную плоскость можно считать неизменными в течение времени t полёта до поверхности. Проекция перемещений шаров s_1 и s_2 на горизонтальную плоскость равны:

$$s_1 = v_1 t, \quad s_2 = v_2 t. \quad (7.3)$$

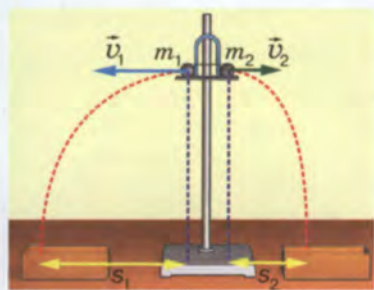


Рис. 7.2

Из равенств (7.3) и (7.2) следует:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1 \Delta t}{a_2 \Delta t} = \frac{a_1}{a_2}. \quad (7.4)$$

Массу m_2 одного шара можно определить по известной массе m_1 другого шара и измеренным проекциям перемещений шаров s_1 и s_2 на горизонтальную плоскость:

$$m_2 = \frac{m_1 a_1}{a_2} = \frac{m_1 s_1}{s_2}. \quad (7.5)$$

Постоянство отношения ускорений двух взаимодействующих тел. Измерения ускорений двух любых взаимодействующих тел показывают, что в различных опытах два взаимодействующих тела могут приобретать различные ускорения, но отношение их ускорений в любых опытах остаётся одинаковым:

$$\frac{a_2}{a_1} = \text{const}. \quad (7.6)$$

Этот экспериментальный факт является основанием для введения физической величины, обратно пропорциональной ускорению тела при взаимодействии с другим телом и называемой массой тела. Из равенств (7.1) и (7.6) следует, что отношение масс двух тел является постоянной величиной, одинаковой при любых взаимодействиях этих тел.

Пример решения задачи

Задача. В опыте (рис. 7.2) использовался один шар массой $m_1 = 10$ г, масса m_2 другого шара неизвестна. Первый шар упал на стол на расстоянии $s_1 = 45$ см от вертикали, проходящей через шар в начальном положении, второй шар упал на стол на расстоянии $s_2 = 15$ см от вертикали его начального положения. Определите массу второго шара.

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг} \\ s_1 &= 45 \text{ см} = 0,45 \text{ м} \\ s_2 &= 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м} \end{aligned}$$

m_2 — ?

Решение

Используем равенство (7.5):

$$m_2 = \frac{m_1 a_1}{a_2} = \frac{m_1 s_1}{s_2}, \quad m_2 = \frac{0,01 \text{ кг} \cdot 0,45 \text{ м}}{0,15 \text{ м}} = 0,03 \text{ кг}.$$

Ответ: $m_2 = 0,03$ кг.

Взаимосвязь инертных и гравитационных свойств тел. Сравнить массы тел путём измерений ускорений тел при взаимодействиях довольно сложно. На практике для измерений масс тел обычно используется свойство пропорциональности инертности тела и его способности к гравитационному притяжению к Земле. Это свойство позволяет измерять массы тел с помощью весов с набором гирь. На одну чашу равноплечих весов помещается тело, а на другую чашу помещают такой набор гирь, при котором весы находятся в равновесии из-за одинаковости притяжения тела и набора гирь к Земле. Масса тела равна сумме масс гирь, уравновешивающих весы.

Задача 7.1. Если бы Луна вдруг остановилась, то под действием силы тяжести она начала бы падать на Землю с ускорением $a_1 = 0,27$ см/с². С каким ускорением стала бы при этом двигаться Земля к Луне? Система отсчёта связана с Солнцем. Масса Земли равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, масса Луны равна $7,35 \cdot 10^{22}$ кг.

Задача 7.2. Две лодки на воде озера были неподвижны относительно воды и соединены верёвкой. Когда человек на первой лодке потянул верёвку, вторая лодка стала двигаться относительно воды с ускорением $0,2$ м/с². Каким было при этом ускорение движения второй лодки относительно первой лодки? Масса первой лодки 200 кг, масса второй лодки 100 кг.

? Вопросы

1. Сформулируйте закон инерции.
2. Почему быстро движущееся тело при столкновении с препятствием разрушается?
3. Что называется массой тела?
4. Как можно экспериментально сравнить массы двух тел?
5. Какими приборами и как измеряют массы тел?

Пример решения задачи

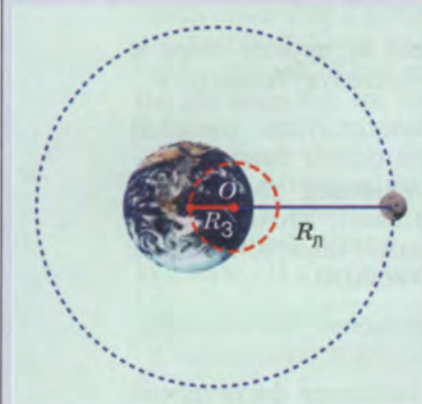


Рис. 7.3

Задача. В астрономии массу Луны измерили на основе сравнения центростремительных ускорений Земли и Луны при обращении под действием сил гравитационного притяжения с одинаковым периодом обращения T вокруг общего центра масс Земли и Луны в точке O (рис. 7.3). Траектории движения центров Луны и Земли можно приблизительно считать окружностями радиусами $R_{\text{л}} = 377\,753$ км и $R_3 = 4635$ км. Сравнив ускорения Луны и Земли, определите, во сколько раз масса Луны меньше массы Земли.

Решение

Отношение масс Земли и Луны равно обратному отношению их ускорений. Выразим центростремительные ускорения Земли и Луны через их скорости движения, радиусы окружностей и периоды обращения:

$$\frac{m_3}{m_{\text{л}}} = \frac{a_{\text{л}}}{a_3} = \frac{v_{\text{л}}^2 \cdot R_3}{v_3^2 \cdot R_{\text{л}}} = \frac{\left(\frac{2\pi R_{\text{л}}}{T}\right)^2 \cdot R_3}{\left(\frac{2\pi R_3}{T}\right)^2 \cdot R_{\text{л}}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_3}, \quad \frac{m_3}{m_{\text{л}}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_3} \approx \frac{377\,753}{4635} \approx 81,5.$$



Рис. 7.4

Связь между инертностью тел и их тяжестью. Каждый знает, что более тяжёлое тело труднее привести в движение и труднее остановить. Этот факт легко объяснить. Если один атом обладает некоторой инертностью, то почти очевидно, что тело из двух одинаковых атомов будет в 2 раза инертнее, из трёх атомов — в 3 раза и т. д. Точно так же почти очевидно, что два одинаковых атома в 2 раза тяжелее одного атома, три атома — в 3 раза и т. д. Так что чем тяжелее тело, тем оно инертнее.

Но возможно, природа устроена так, что прямая пропорциональность инертности тел и их тяжести наблюдается только для тел из одинакового вещества. Может быть, существуют такие атомы разных веществ, которые одинаково притягиваются к Земле, но обладают разной инертностью? Тогда два тела из разных атомов могут обладать одинаковыми массами при измерении на равноплечих весах, но различными массами при измерении ускорений тел при их взаимодействии. Для проверки этой гипотезы Ньютон придумал и осуществил такой эксперимент.

В кадочки, подвешенные как маятники, он помещал грузы одинакового веса из разных веществ, например из золота и дерева. При отклонении кадочки от положения равновесия притяжение Земли заставляет её двигаться к положению равновесия. После достижения положения равновесия кадочка по инерции продолжает движение, а притяжение Земли тормозит это движение до остановки, и таким образом продолжают периодические колебания (рис. 7.4). На кадочки

одинакового веса с грузами из разных веществ Земля действует одинаково. Поэтому в случае одинаковой инертности грузов кадочки должны двигаться в любой момент времени одинаково. Если же инертность одной из кадочек больше, чем другой, то эта кадочка должна двигаться медленнее и постепенно отставать от менее инертной кадочки.

В опытах Ньютона было установлено, что кадочки одинакового веса с разными веществами колеблются одинаково. Этим была доказана пропорциональность силы притяжения тела к Земле и свойства инертности тела.

Инерциальные системы отсчёта. Одно и то же тело может находиться в состоянии покоя в одной системе отсчёта и двигаться с ускорением в другой системе отсчёта. Например, в самолёте, пикирующем вниз с ускорением свободного падения, пилот находится в состоянии покоя в системе отсчёта, связанной с самолётом. В системе отсчёта, связанной с Землёй, этот пилот движется с ускорением свободного падения. В каких же системах отсчёта наблюдается явление инерции и существуют ли такие системы отсчёта?

Ответ на этот вопрос даёт один из основных законов механики, который называется **первым законом Ньютона** или **законом инерции**. Первый закон Ньютона можно сформулировать таким образом: **существуют такие системы отсчёта, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела.**

Системы отсчёта, относительно которых тело при отсутствии внешних воздействий движется прямолинейно и равномерно, называют инерциальными системами отсчёта.

? Вопросы

1. Какими опытами Ньютон доказал пропорциональность инертных и гравитационных свойств тел?
2. Какие системы отсчёта называются инерциальными системами?
3. Является ли инерциальной система отсчёта, связанная с Землёй?

Экспериментальное задание 7.1

Работаем в паре

Исследование зависимости ускорения свободного падения тел от их массы

Оборудование: комплект «Лаборатория L-микро» по механике.

Исследуйте, зависит ли ускорение свободного падения тел от их массы.

Порядок выполнения задания

1. Подготовьте приборы, как при выполнении задания 4.1 (рис. 7.5). При проведении опытов установите направляющую плоскость почти вертикально, чтобы каретка двигалась без трения как свободно падающее тело.

Для исследования зависимости ускорения свободного падения тел от их массы нужно измерить время падения тел разной массы с одинаковой высоты и вычислить их ускорения. В первом опыте измерьте время падения каретки без груза. Измерения повторите 5 раз, найдите среднее арифметическое значение. Вычислите ускорение.

2. Во втором опыте на каретку поставьте груз массой 100 г и повторите измерения и вычисления.

По мнению Аристотеля, при одинаковой начальной высоте время свободного падения тела большей массы должно быть меньше времени падения тела меньшей массы.

Галилей утверждал, что все тела падают с одинаковой высоты за одинаковое время независимо от их массы.

А что получилось в вашем эксперименте?



Рис. 7.5

§ 8. Второй закон Ньютона

Мера взаимодействия тел. Наблюдения и опыты показывают, что скорость движения любого тела изменяется только в результате его взаимодействия с другими телами. Поэтому изменение скорости тела в единицу времени, т. е. ускорение движения тела, выбрано в физике в качестве одной из основных характеристик взаимодействия тел. Чем большее ускорение приобретает тело в результате взаимодействия, тем большей была сила взаимодействия.

Но только по ускорению движения тела нельзя получить полное представление о взаимодействии тел. При столкновении двух тел тело меньшей массы приобретает



Рис. 8.1

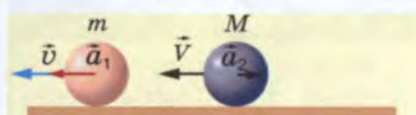


Рис. 8.2

большее ускорение, чем тело большей массы. Так, при встречном движении с одинаковыми скоростями относительно стола лёгкого пластмассового шара и тяжёлого стального шара (рис. 8.1) после столкновения (обозначено пунктиром) значительно большее ускорение приобретает пластмассовый шар меньшей массы. Направление вектора скорости шара меньшей массы изменяется на противоположное, а вектор скорости шара большей массы лишь немного уменьшается по модулю (рис. 8.2).

Сила. Для полной характеристики взаимодействия тел в физике используется понятие **сила**. Сила есть причина изменения скорости. В формулах сила обозначается латинской буквой F .

Силой F называется физическая величина, равная произведению массы m тела на ускорение a его движения:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (8.1)$$

Сила — векторная величина, направление вектора силы \vec{F} совпадает с направлением вектора ускорения \vec{a} тела.

Сила, под действием которой тело массой 1 кг движется с ускорением 1 м/с², в Международной системе единиц принимается за единицу силы и называется **ньютон** (1 Н). Из формулы (8.1) следует: 1 Н = 1 кг · 1 м/с² = 1 (кг · м)/с².

Второй закон Ньютона. Из определения силы (8.1) следует, что

при взаимодействии тела с другими телами ускорение \vec{a} его движения прямо пропорционально действующей силе \vec{F} и обратно пропорционально массе m тела.

Это утверждение называется **вторым законом Ньютона** или **вторым законом механики**:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (8.2)$$

Если на тело действуют одновременно несколько сил, **ускорение \vec{a} его движения прямо пропорционально равнодействующей силе \vec{F} всех сил и обратно пропорционально массе m тела.**

Второй закон механики выполняется только в инерциальных системах отсчёта. Система отсчёта называется **инерциальной**, если в ней выполняется первый закон Ньютона.

Измерение сил. Для измерения сил используются динамометры (греч. dynamis — сила и metreo — измеряю, что переводится как «силомер»). При сжатии, растяжении или изгибе твёрдого тела возникают силы упругости, препятствующие изменению формы тела — деформации тела. При небольшом растяжении тела сила упругости $\vec{F}_{\text{уп}}$ прямо пропорциональна его удлинению x :

$$F_{\text{уп}} = -kx. \quad (8.3)$$

Зависимость силы упругости от деформации была открыта экспериментально английским учёным Робертом Гуком и называется **законом Гука**.

Коэффициент k в формуле этого закона называется **коэффициентом упругости** или **жёсткостью** и выражается в *ньютон на метр* (1 Н/м). Знак «минус» в законе Гука указывает, что сила упругости направлена противоположно деформации тела. В динамометрах для измерения сил используются стальные пружины.

Экспериментальное задание 8.1

Работаем в паре

Расчёт и измерение ускорения

Оборудование: комплект «Лаборатория L-микро» по механике.

Рассчитайте ускорение движения тела по наклонной плоскости. Измерьте ускорение движения тела по наклонной плоскости и сравните расчётное и экспериментальное значения ускорения.

Порядок выполнения задания

1. Для проведения опытов используйте направляющую плоскость, каретку, груз, датчики, электронный секундомер, пластиковый коврик. Укрепите наклонную плоскость примерно под углом 60° к горизонтальной плоскости. Поставьте на каретку груз массой 100 г, положите каретку на наклонную плоскость. Расположите динамометр параллельно наклонной плоскости и измерьте силу F , вызывающую скольжение каретки вниз по наклонной плоскости (равнодействующую сил тяжести, нормального давления и трения) (рис. 8.3).

2. Измерьте массу m каретки с грузом и вычислите ускорение a движения каретки по второму закону Ньютона: $a = \frac{F}{m}$.

3. Установите датчики около отметок шкалы 3 и 43 см. Подключите датчики к секундомеру и нажав кнопки «Сброс» установите показания секундомера на нуль.

4. Положите каретку на наклонную плоскость и отпустите. Снимите показания секундомера. По измеренным значениям пройденного пути s и времени движения t вычислите ускорение равноускоренного движения каретки по формуле $a = \frac{2s}{t^2}$.

Сравните результаты расчёта и измерения ускорения.



Рис. 8.3

Задача 8.1. Пуля массой 8 г движется в стволе автомата с ускорением $600\,000\text{ м/с}^2$. С какой силой действуют пороховые газы на пулю?

Задача 8.2. Какое максимальное ускорение может сообщить автомобилю сила трения на горизонтальном участке дороги при коэффициенте трения 0,5?

Задача 8.3. Под действием силы упругости пружины 10 Н гири движется с ускорением 2 м/с^2 . Чему равна масса гири?

Задача 8.4. Человек толкает гирю массой 5 кг силой 100 Н, вектор силы направлен вертикально вверх. С каким ускорением движется гиря во время этого толчка?

Задача 8.5. Человек толкает гирю массой 5 кг силой 100 Н, вектор силы направлен вертикально вниз. С каким ускорением движется гиря во время этого толчка?

Задача 8.6. При силе тяги реактивного двигателя 2500 Н ракета стартует вертикально вверх с ускорением 40 м/с^2 . Чему равна масса ракеты? Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с^2 .

Задача 8.7. Катер тянет человека на водных лыжах с помощью троса. Определите ускорение движения человека при силе натяжения троса 900 Н и силе сопротивления воды 500 Н. Масса человека с лыжами 100 кг.

? Вопросы

1. Что называется силой?
2. Как определяется единица силы в Международной системе единиц?
3. Сформулируйте второй закон Ньютона.
4. Как измеряют силы?
5. В каких системах отсчёта выполняется второй закон Ньютона?
6. Какие системы отсчёта называются инерциальными системами отсчёта?



Рис. 8.4



Рис. 8.5

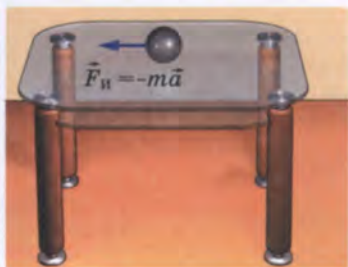


Рис. 8.6

Силы инерции. В инерциальных системах отсчёта любое тело движется с ускорением только при взаимодействии с другими телами в результате действия на него каких-либо сил.

Системы отсчёта, движущиеся ускоренно, называются **неинерциальными системами**. В неинерциальных системах отсчёта тела могут двигаться с ускорениями при отсутствии каких-либо взаимодействий с другими телами. Законы Ньютона в таких системах отсчёта не выполняются.

Можно ли рассчитывать пройденные пути, скорости и ускорения тел в неинерциальных системах отсчёта? Хотя законы Ньютона в этих системах отсчёта не выполняются, существует простой формальный способ для решения различных задач о движении тел в неинерциальных системах отсчёта.

Рассмотрим такой пример. В вагоне поезда на совершенно гладком горизонтальном столе лежит шар, трение между столом и шаром отсутствует. В начале движения вагона вправо с ускорением \vec{a} шар не изменяет своего положения относительно Земли, так как на него не действует никакая сила в горизонтальной плоскости (рис. 8.4).

Относительно вагона шар движется влево с ускорением $-\vec{a}$, равным по модулю ускорению вагона относительно Земли, но направленным противоположно (рис. 8.5). С точки зрения пассажира вагона, ускорение шара возникло при отсутствии действия на него каких-либо сил. Поэтому второй закон Ньютона не выполняется.

Однако это явление можно объяснить иначе. Пассажир видит, что шар массой m движется с ускорением $-\vec{a}$. Применяя второй закон Ньютона, он может сделать вывод, что на шар подействовала сила $\vec{F}_и$, равная

$$\vec{F}_и = -m\vec{a}.$$

Эту кажущуюся, а не реальную силу, действие которой будто бы наблюдается в неинерциальной системе отсчёта, движущейся с ускорением \vec{a} , называют **силой инерции** (рис. 8.6).

Введение несуществующих сил инерции даёт формальную возможность не отказываться от законов Ньютона и в неинерциальных системах отсчёта. Для этого при нахождении равнодействующей всех сил нужно к реально существующим силам взаимодействия тел добавлять силы инерции.

Используя понятие «сила инерции», легко объяснить, почему при торможении автобуса все пассажиры наклоняются вперёд и стараются удержаться за поручни, — на них действует сила инерции. Ощущение увеличения силы тяжести испытывает человек, находящийся в лифте, движущемся ускоренно вверх. Значительные перегрузки испытывают лётчики при выполнении фигур высшего пилотажа, космонавты во время ускоренного движения космической ракеты.



Вопросы

1. В каких системах отсчёта не выполняется второй закон Ньютона?
2. Какие системы называются неинерциальными системами отсчёта?
3. Какие явления наблюдаются в неинерциальных системах отсчёта?
4. Приведите примеры неинерциальных систем отсчёта.
5. Что такое силы инерции?
6. Чем отличаются силы инерции от гравитационных и электромагнитных сил?
7. Для чего вводится понятие о силах инерции?

Экспериментальное задание 8.2

Работаем в группе

Изучение движения системы связанных тел

Оборудование: штатив, блок, два набора грузов, нить, рулетка, секундомер.

Рассчитайте ускорение движения системы двух тел разной массы, связанных нитью, перекинутой через неподвижный блок. Измерьте ускорение движения тел и сравните результаты расчёта и эксперимента.

Содержание работы

Два груза массами M и $M + m$ соединены нерастяжимой нитью, перекинутой через блоки (рис. 8.7). При отсутствии сил трения и влияния блока под действием силы тяжести Mg и силы упругости T нити груз массой M движется с некоторым ускорением \vec{a}_1 вверх, груз массой $M + m$ с равным по модулю ускорением \vec{a}_2 движется вниз. На основании второго закона Ньютона для первого груза справедливо уравнение $M\vec{a}_1 = M\vec{g} + \vec{T}$. В скалярном виде, учитывая, что ускорение a_1 направлено вверх, запишем

$$Ma = T - Mg, \tag{1}$$

для второго груза справедливо уравнение $(M + m)\vec{a}_2 = (M + m)\vec{g} + \vec{T}$. В скалярном виде, учитывая, что ускорение a_2 направлено вниз, запишем

$$(M + m)a = (M + m)g - T, \tag{2}$$

где M — масса груза; m — масса дополнительной гири; T — сила натяжения нити; g — ускорение свободного падения, $a_1 = a_2 = a$.

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$(2M + m)a = mg, \tag{3}$$

$$a = \frac{mg}{2M + m}. \tag{4}$$

Ускорение a движения грузов можно найти экспериментально, измерив время t , за которое груз из состояния покоя проходит расстояние h :

$$a = \frac{2h}{t^2}. \tag{5}$$

Порядок выполнения задания

1. Укрепите неподвижный блок на высоте 1,5 м от пола. Соедините два груза массой M по 0,5 кг нитью, перекиньте нить через блок. Одну гирю поставьте на пол, другая должна находиться у самого блока (см. рис. 8.7).
2. Налагая на верхний груз добавочные грузы по 10 г, добейтесь компенсации силы трения. После лёгкого толчка верхний груз должен равномерно двигаться вниз, а нижний груз равномерно подниматься вверх.
3. Рассчитайте по формуле (4) ускорение a_1 , с каким должны двигаться грузы при наложении на верхний груз дополнительного груза 50 г.
4. Положите на верхний груз дополнительный груз массой 50 г и одновременно запустите секундомер. При достижении верхним грузом пола остановите секундомер и запишите его показания t . Повторите опыт 3 раза и найдите среднее значение времени движения груза.

Таблица 8.1

M , кг	m , кг	a_1 , м/с ²	h , м	t , с	a_2 , м/с ²

5. Вычислите по формуле (5) ускорение a_2 движения системы связанных тел. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

6. Сравните полученное из расчёта значение ускорения a_1 с полученным из опыта a_2 . Сделайте выводы.



Рис. 8.7

§ 9. Сложение сил

Нахождение равнодействующей сил, приложенных к одной точке тела.

Сила \vec{F} , оказывающая на тело такое же действие, как две одновременно действующие на это тело силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , называется равнодействующей сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 .

Для полного ответа на вопрос о результате действия многих сил с различными направлениями векторов, приложенных к одной точке тела, нужно уметь находить равнодействующую двух произвольно направленных сил. Найдя равнодействующую двух сил, можно затем найти результат её сложения с третьей силой и продолжать так до нахождения равнодействующей всех сил.

Найдём из опыта ответ на вопрос о результате действия двух сил, приложенных к одной точке тела, при любых направлениях векторов сил.

Экспериментальное задание 9.1

Работаем самостоятельно

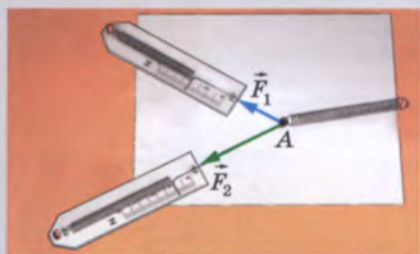


Рис. 9.1

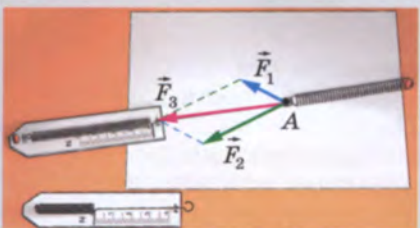


Рис. 9.2

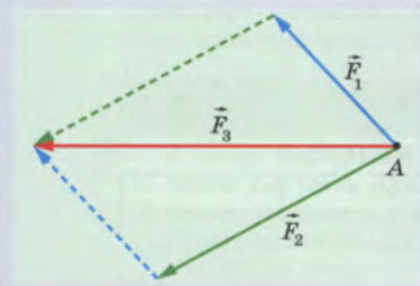


Рис. 9.3

Сложение сил, направленных под углом

Оборудование: два динамометра, пружина, бумага, карандаш, линейка.

Найдите равнодействующую двух сил, направленных под углом.

Порядок выполнения задания

1. Положите на стол лист бумаги. Закрепите один конец пружины у края стола, на другой конец пружины наденьте крючки двух динамометров.

2. Расположите динамометры под углом друг к другу и растяните пружину. Отметьте на листе бумаги точкой A положение конца пружины. Проведите на бумаге прямые, на которых лежат векторы сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , действующих на пружину со стороны динамометров (рис. 9.1).

3. Измерьте силы упругости F_1 и F_2 , постройте на прямых от точки A отрезки, пропорциональные силам \vec{F}_1 и \vec{F}_2 .

4. Снимите крючок одного динамометра с пружины и с помощью другого динамометра растяните пружину до точки A. В этом случае сила \vec{F}_3 со стороны динамометра является равнодействующей сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . Измерьте силу упругости F_3 и постройте вектор \vec{F}_3 равнодействующей сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 9.2).

5. Постройте вектор, равный вектору силы \vec{F}_1 , от конца вектора \vec{F}_2 , а вектор, равный вектору силы \vec{F}_2 , от конца вектора \vec{F}_1 (рис. 9.3).

Проверьте, выполняется ли для векторов сил \vec{F}_1 , \vec{F}_2 и \vec{F}_3 правило параллелограмма: **вектор \vec{F}_3 равнодействующей двух сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , приложенных к одной точке, есть диагональ параллелограмма, сторонами которого являются эти силы, и приложен к той же точке:**

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

Задача 9.1. На рисунке 9.4 представлены три вектора сил. Какой из этих векторов является равнодействующей двух других векторов?

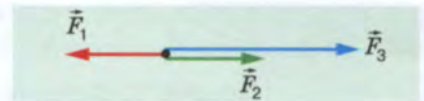


Рис. 9.4

Задача 9.2. Объясните, почему при небольшом наклоне доски положенный на её поверхность кирпич не движется под действием силы тяжести вниз, а при увеличении угла наклона скользит вниз, хотя на кирпич действует такая же сила тяжести.

Равновесие тела на наклонной плоскости. Выясним условия покоя или равномерного прямолинейного движения тела на наклонной плоскости. На наклонной плоскости на тело действуют сила тяжести \vec{F}_T , сила трения $\vec{F}_{тр}$ и сила нормального давления \vec{N} со стороны наклонной плоскости, перпендикулярная поверхности соприкосновения. Если можно принять, что все три силы приложены к одной точке, то при покое или равномерном прямолинейном движении тела на наклонной плоскости равнодействующая этих трёх векторов равна нулю (рис. 9.5). Из этого условия найдём связь между модулями этих сил.

Так как равнодействующая трёх сил равна нулю, то равнодействующая \vec{F} силы трения $\vec{F}_{тр}$ и силы нормального давления \vec{N} равна по модулю и направлена противоположно силе тяжести \vec{F}_T : $\vec{F} = -\vec{F}_T$.

Зная направление и модуль равнодействующей \vec{F} и угол наклона α плоскости, можно найти модули силы трения $F_{тр}$ и силы нормального давления N .

По рисунку 9.5 можно видеть, что модули силы трения $F_{тр}$ и силы нормального давления N равны соответственно:

$$F_{тр} = F \sin \alpha = F_T \sin \alpha = mg \sin \alpha,$$

$$N = F \cos \alpha = F_T \cos \alpha = mg \cos \alpha.$$

Задача 9.3. По горизонтальной дороге сани массой 30 кг движутся под действием силы упругости 100 Н со стороны верёвки, направленной под углом 60° к плоскости дороги. Коэффициент трения $\mu = 0,12$. Определите ускорение санок и путь, пройденный санями за 5 с. В начальный момент времени скорость саней была равна нулю.

Задача 9.4. По наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° , снизу вверх начинает скользить брусок с некоторой начальной скоростью. Найдите отношение времени t_1 движения бруска вверх до остановки к времени t_2 движения вниз до исходной точки, если коэффициент трения бруска по наклонной плоскости 0,35.

Задача 9.5. Шар массой 50 г, подвешенный на нити длиной 30 см, равномерно вращается в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 18 см (рис. 9.6). Найдите равнодействующую \vec{F} силы упругости $\vec{F}_{упр}$ и силы тяжести \vec{F}_T . Ускорение силы тяжести считайте равным 10 м/с^2 .

Вопросы

1. Что называется равнодействующей двух сил?
2. Как находится равнодействующая сил?
3. Сформулируйте правило сложения векторов сил.
4. Какими опытами установлено правило сложения векторов сил?

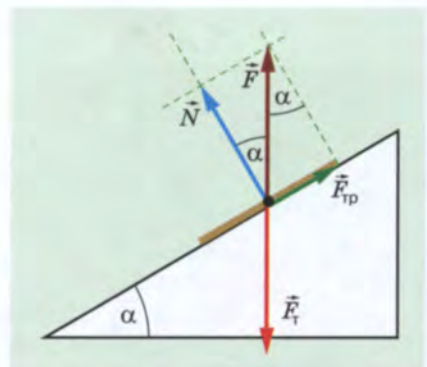


Рис. 9.5

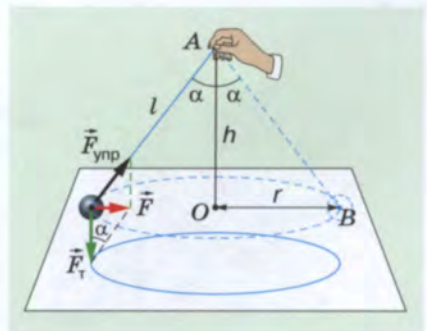


Рис. 9.6

Примеры решения задач

Задача 1. Вверх по наклонной плоскости, расположенной под углом $\alpha = 53^\circ$ к горизонту, брусок толкнули вверх со скоростью 6,6 м/с. Найдите путь, пройденный бруском за 1,2 с, если коэффициент трения бруска о плоскость равен 0,5. Ускорение свободного падения примите приблизительно равным 10 м/с².

Дано:
 $\alpha = 53^\circ$
 $v_0 = 6,6 \text{ м/с}$
 $t = 1,2 \text{ с}$
 $\mu = 0,5$
 $g = 10 \text{ м/с}^2$
 $s = ?$

Решение
 При движении бруска вверх по наклонной плоскости (рис. 9.7) модуль ускорения определяется по второму закону Ньютона делением модуля F равнодействующей силы тяжести $m\vec{g}$, силы нормального давления \vec{N} и силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ на массу m : $a_1 = \frac{F}{m}$.

Представим вектор силы тяжести $m\vec{g}$ как равнодействующую двух векторов, из которых один (\vec{F}_1) параллелен наклонной плоскости, а другой (\vec{F}_2) перпендикулярен ей (см. рис. 9.7). Модули этих векторов равны соответственно: $F_1 = mgsin\alpha$, $F_2 = mgcos\alpha$.

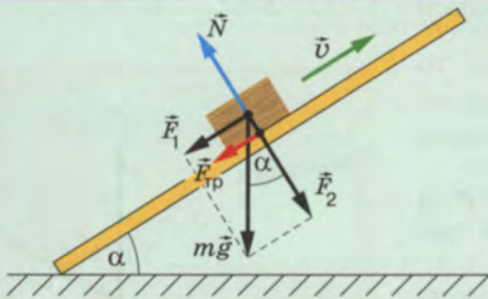


Рис. 9.7

Так как в направлении, перпендикулярном наклонной плоскости, ускорение бруска равно нулю, действия силы нормального давления \vec{N} и силы \vec{F}_2 взаимно компенсируют друг друга, эти силы равны по модулю и противоположны по направлению. Следовательно, равнодействующая \vec{F} всех сил равна сумме силы \vec{F}_1 и силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Векторы этих сил параллельны, поэтому модуль равнодействующей равен сумме модулей сил \vec{F}_1 и $\vec{F}_{\text{тр}}$: $F = F_1 + F_{\text{тр}}$. Модуль силы трения равен $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mgcos\alpha$, поэтому модуль ускорения бруска при движении вверх равен:

$$a_1 = \frac{F}{m} = \frac{mgsin\alpha + \mu mgcos\alpha}{m} = g(sin\alpha + \mu cos\alpha).$$

$$t_1 = \frac{v_0}{a_1}, \quad t_1 = \frac{6,6 \text{ м/с}}{11 \text{ м/с}^2} = 0,6 \text{ с}.$$

Подставляя числовые данные, получим $a_1 = 10 \text{ м/с}^2$ ($0,8 + 0,6 \cdot 0,5$) = 11 м/с².
 Время движения бруска вверх до остановки равно:

$$s_1 = v_0 t_1 - \frac{a_1 t_1^2}{2}, \quad s_1 = 6,6 \text{ м/с} \cdot 0,6 \text{ с} - \frac{11 \text{ м/с}^2 \cdot 0,36 \text{ с}^2}{2} = 1,98 \text{ м}.$$

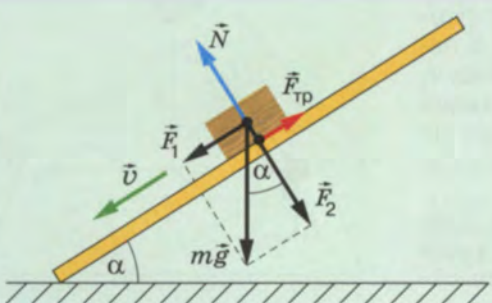


Рис. 9.8

При движении бруска вниз по наклонной плоскости (рис. 9.8) векторы сил \vec{F}_1 и $\vec{F}_{\text{тр}}$ направлены противоположно, поэтому модуль равнодействующей равен разности модулей сил \vec{F}_1 и $\vec{F}_{\text{тр}}$: $F = F_1 - F_{\text{тр}}$, модуль ускорения бруска при движении вниз равен:

$$a_2 = \frac{F}{m} = \frac{mgsin\alpha - \mu mgcos\alpha}{m}, \quad a_2 = g(sin\alpha - \mu cos\alpha),$$

$$a_2 = 10 \text{ м/с}^2 (0,8 - 0,6 \cdot 0,5) = 5 \text{ м/с}^2.$$

Время движения бруска должно быть:

$$t_2 = t - t_1 = 1,2 \text{ с} - 0,6 \text{ с} = 0,6 \text{ с}.$$

Определим путь s_2 , пройденный бруском при движении вниз:

$$s_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2} = \frac{5 \text{ м/с}^2 \cdot 0,36 \text{ с}^2}{2} = 0,9 \text{ м}.$$

Общий путь, пройденный бруском за 1,2 с, будет равен:

$$s = s_1 + s_2 = 1,98 \text{ м} + 0,9 \text{ м} = 2,88 \text{ м}.$$

Ответ: $s = 2,88 \text{ м}$.

Задача 2. Велосипедист массой 70 кг движется равномерно в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 50 м, угол наклона плоскости велосипедиста к горизонтальной плоскости 70° . Определите равнодействующую сил тяжести и упругости, действующих на велосипедиста. Найдите скорость велосипедиста.

Дано:

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$R = 50 \text{ м}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$F = ?$ $v = ?$

Решение

На велосипедиста действуют сила тяжести \vec{F}_T , направленная вертикально вниз, и сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, лежащая на прямой пересечения плоскости велосипедиста с вертикальной плоскостью, проходящей через прямую, соединяющую велосипедиста с центром окружности. По условию задачи велосипедист движется по окружности в горизонтальной плоскости равномерно, поэтому вектор ускорения \vec{a} направлен к центру этой окружности. Направление вектора равнодействующей \vec{F} сил

тяжести \vec{F}_T и упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ совпадает с направлением вектора центростремительного ускорения \vec{a} (рис. 9.9).

Представим вектор силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ как результат сложения двух векторов сил, из которых один ($\vec{F}_{\text{упр}1}$) лежит на одной прямой с вектором силы тяжести \vec{F}_T , а другой ($\vec{F}_{\text{упр}2}$) совпадает по направлению с вектором ускорения \vec{a} (рис. 9.10).

Так как велосипедист не имеет ускорения в вертикальном направлении, составляющая вектора силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}1}$ равна по модулю противоположно направленному вектору силы тяжести \vec{F}_T , а их сумма равна нулю. Следовательно, равнодействующая \vec{F} сил тяжести \vec{F}_T и силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ равна составляющей силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}2}$:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{упр}2}.$$

Так как векторы $\vec{F}_{\text{упр}1}$ и $\vec{F}_{\text{упр}2}$ взаимно перпендикулярны, то получаем:

$$\frac{F_{\text{упр}2}}{F_{\text{упр}1}} = \text{ctg}\alpha, \quad F = F_{\text{упр}2} = F_{\text{упр}1} \text{ctg}\alpha = F_T \text{ctg}\alpha = mg \text{ctg}\alpha.$$

Вычисляем модуль равнодействующей:

$$F = 70 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 0,364 \approx 250 \text{ Н}.$$

По вычисленному значению равнодействующей находим центростремительное ускорение:

$$a = \frac{F}{m} = g \text{ctg}\alpha \approx 3,57 \text{ м/с}^2.$$

По найденному значению центростремительного ускорения и известному значению радиуса траектории находим скорость равномерного движения велосипедиста по окружности:

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad v = \sqrt{aR}, \quad v = \sqrt{3,57 \text{ м/с}^2 \cdot 50 \text{ м}} \approx 13,4 \text{ м/с} \approx 48 \text{ км/ч}.$$

Ответ: $F \approx 250 \text{ Н}$, $v \approx 48 \text{ км/ч}$.



Рис. 9.9

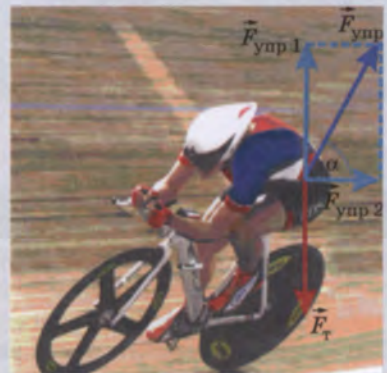


Рис. 9.10

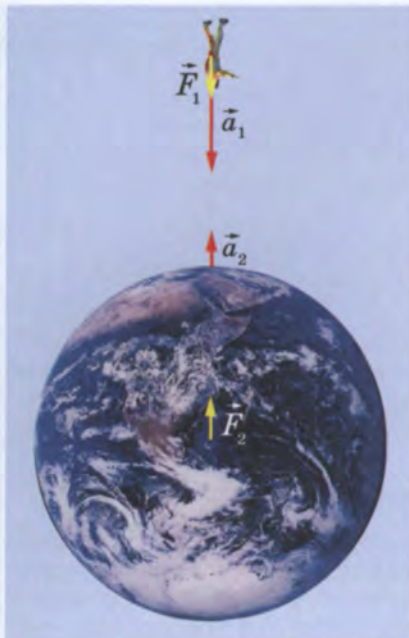


Рис. 10.1

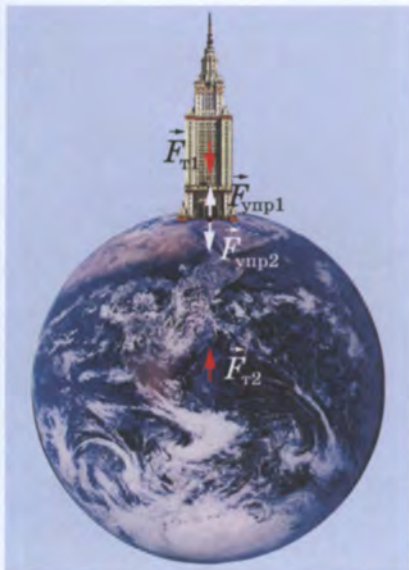


Рис. 10.2

Третий закон механики. Опыты и наблюдения показывают, что никогда не происходит только действие одного тела на другое. Всегда происходит взаимодействие тел. Когда парашютист выпрыгивает из самолёта и падает с ускорением свободного падения \vec{a}_1 под действием силы притяжения Земли, то и Земля под действием силы притяжения со стороны парашютиста приобретает ускорение \vec{a}_2 , направленное противоположно ускорению \vec{a}_1 (рис. 10.1). Ускорения \vec{a}_1 и \vec{a}_2 тел массами m_1 и m_2 при взаимодействии всегда оказываются такими, что выполняется равенство

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2. \quad (10.1)$$

Так как по второму закону Ньютона

$$m_1 \vec{a}_1 = \vec{F}_1, \quad m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_2,$$

то из равенства (10.1) следует

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (10.2)$$

Равенство (10.2) называют **третьим законом Ньютона** или **третьим законом механики**. Третий закон Ньютона утверждает, что

тела действуют друг на друга силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению.

На парашютиста и Землю действуют одинаковые по модулю силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . Так как масса Земли очень велика по сравнению с массой парашютиста, Земля приобретает под действием такой же силы ничтожно малое ускорение.

Действия сил, возникающих по третьему закону Ньютона, не могут уравновешивать друг друга, так как эти силы приложены к разным телам. Но они всегда имеют одну физическую природу.

Третий закон Ньютона, как и второй закон, выполняется только в инерциальных системах отсчёта.

Третий закон Ньютона при отсутствии движения тел. Третий закон Ньютона выполняется и в случае таких взаимодействий тел, при которых не возникают ускорения движения тел. Например, Земля и стоящее на Земле здание притягиваются друг к другу гравитационными силами, но остаются неподвижными в результате возникновения ещё одного взаимодействия — взаимодействия сил упругости. Здание стоит неподвижно на Земле не потому, что действия сил тяготения $\vec{F}_{т1}$ со стороны Земли и $\vec{F}_{т2}$ со стороны здания уравновесили друг друга, а потому, что равные по модулю и противоположно направленные силы упругости $\vec{F}_{упр1}$ и $\vec{F}_{упр2}$, действующие на здание и на Землю, уравновесили действие сил гравитационного притяжения (рис. 10.2):

$$\vec{F}_{т1} + \vec{F}_{упр1} = 0,$$

$$\vec{F}_{т2} + \vec{F}_{упр2} = 0.$$

? Вопросы

1. Сформулируйте третий закон Ньютона.
2. Одинакова ли физическая природа сил, возникающих по третьему закону Ньютона при взаимодействии тел?
3. В каких системах отсчёта выполняется третий закон Ньютона?
4. Почему не могут уравновешивать друг друга действия сил, возникающих по третьему закону Ньютона?

Экспериментальное задание 10.1

Работаем в группе

Измерение сил взаимодействия двух тел

Оборудование: две книги, два карандаша кругового сечения (круглые карандаши), нить, два динамометра.

Проверьте, выполняется ли третий закон механики для сил трения покоя и сил трения скольжения.



Рис. 10.3

Порядок выполнения задания

1. Обвяжите каждую книгу нитью. Положите первую книгу на два параллельно расположенных на столе карандаша, вторую книгу положите на первую книгу. Зацепите крючок одного динамометра за нить, которой обвязана нижняя книга, крючок другого динамометра за нить, которой обвязана верхняя книга (рис. 10.3).

2. Удерживая один динамометр, потяните другой динамометр в горизонтальной плоскости так, чтобы показания динамометра достигли максимального значения при условии отсутствия движения верхней книги по поверхности нижней книги. Так как верхняя книга неподвижна, действие на неё силы упругости $\vec{F}_{упр1}$ со стороны динамометра уравнивается действием противоположно направленной силы трения покоя $\vec{F}_{тр1}$ со стороны нижней книги: $\vec{F}_{упр1} = -\vec{F}_{тр1}$.

Так как нижняя книга неподвижна, действие на неё силы упругости $\vec{F}_{упр2}$ со стороны второго динамометра уравнивается действием противоположно направленной силы трения покоя $\vec{F}_{тр2}$ со стороны верхней книги: $\vec{F}_{упр2} = -\vec{F}_{тр2}$. Влияние силы трения со стороны свободно катающихся по столу карандашей пренебрежимо мало.

Измеряя силы упругости $\vec{F}_{упр1}$ и $\vec{F}_{упр2}$ динамометрами, можно определить силы трения покоя $\vec{F}_{тр2}$ и $\vec{F}_{тр1}$.

По результатам измерений сделайте вывод, одинаковы ли по модулю силы трения покоя $\vec{F}_{тр2}$ и $\vec{F}_{тр1}$.

3. Удерживая один динамометр, потяните другой динамометр в горизонтальной плоскости так, чтобы верхняя книга равномерно двигалась по поверхности нижней книги. При равномерном движении книги действие на неё силы упругости $\vec{F}_{упр1}$ со стороны динамометра уравнивается действием противоположно направленной силы трения скольжения $\vec{F}_{тр1}$ со стороны нижней книги: $\vec{F}_{упр1} = -\vec{F}_{тр1}$. Измерьте силы упругости $\vec{F}_{упр1}$ и $\vec{F}_{упр2}$ во время движения и сделайте вывод, одинаковы ли по модулю силы трения скольжения $\vec{F}_{тр2}$ и $\vec{F}_{тр1}$.

Задача 10.1. Мяч лежит на полу. На мяч действует сила гравитационного притяжения со стороны Земли, вектор этой силы направлен вертикально вниз. К какому телу приложена вторая сила, возникающая по третьему закону Ньютона? Какое направление имеет вектор этой силы?

Задача 10.2. Какой силой уравнивается действие силы тяжести на человека, стоящего на земле?

Задача 10.3. Земля действует на Луну силой гравитационного притяжения. Уравнивается ли действие этой силы действием какой-то другой силы?

Задача 10.4. При торможении автомобиль под действием силы трения движется равноускоренно до остановки. Действует ли при этом по третьему закону Ньютона сила трения со стороны автомобиля на землю? Если действует, в чём проявляется результат её действия?

Задача 10.5. На совершенно гладком столе расположены два шара, соединённые стальной пружиной. Масса первого шара 100 г, масса второго шара 200 г. Масса пружины пренебрежимо мала по сравнению с массами шаров. Шары потянули в противоположные стороны и отпустили. Под действием силы упругости растянутой пружины первый шар начал движение с ускорением 1 м/с². С каким ускорением начал движение второй шар?

Силы трения и третий закон Ньютона. При взаимодействии тел силами трения возможны два варианта проявления действия третьего закона Ньютона. Первый вариант наблюдается в том случае, если при попытке перемещения первого тела по поверхности второго тела первое тело остаётся неподвижным относительно второго тела. В этом случае силу $\vec{F}_{тр}$, возникающую на границе соприкосновения тел и препятствующую их относительному перемещению, называют **силой трения покоя**.



Рис. 10.4

По третьему закону Ньютона при взаимодействии возникают две равные и противоположно направленные силы трения покоя, приложенные к этим телам. Например, если человек пытается сдвинуть книгу по столу, но она остаётся неподвижной, то это значит, что возникающая сила трения покоя $\vec{F}_{тр.п1}$, действующая со стороны стола, уравновесила действие приложенной человеком силы упругости $\vec{F}_{упр}$. При этом по третьему закону Ньютона книга действует на стол равной по модулю и противоположно направленной силой трения покоя $\vec{F}_{тр.п2}$ (рис. 10.4).

При движении одного тела по поверхности другого тела возникает сила трения скольжения $\vec{F}_{тр.ск}$, направленная противоположно вектору относительной скорости \vec{v} тел. Модуль силы трения скольжения $F_{тр.ск}$ прямо пропорционален модулю силы реакции опоры N , являющейся силой упругости и направленной перпендикулярно поверхности соприкосновения тел: $F_{тр.ск} = \mu N$.

Отношение модуля силы трения скольжения $F_{тр.ск}$ к модулю силы реакции опоры \vec{N} называется **коэффициентом трения**.

По третьему закону Ньютона при скольжении одного тела по поверхности другого тела возникают две равные и противоположно направленные силы трения скольжения, приложенные к этим телам.

Может ли сила трения увеличивать скорость движения тела. Так как сила трения скольжения направлена противоположно направлению вектора скорости движения тела относительно поверхности соприкосновения тел, можно подумать, что она способна лишь уменьшать скорость движения тел. Но не следует забывать об относительности механического движения.

Рассмотрим такой пример. Два автомобиля движутся равномерно и прямолинейно с одинаковыми скоростями относительно Земли по одной дороге. Затем синий автомобиль начал торможение, а красный продолжал движение с постоянной скоростью относительно Земли. В системе отсчёта, связанной с Землёй, сила трения вызвала уменьшение скорости синего автомобиля (рис. 10.5).

В системе отсчёта, связанной с красным автомобилем, тот же случай выглядит иначе. До начала торможения синий автомобиль был неподвижен, а земная по-



Рис. 10.5

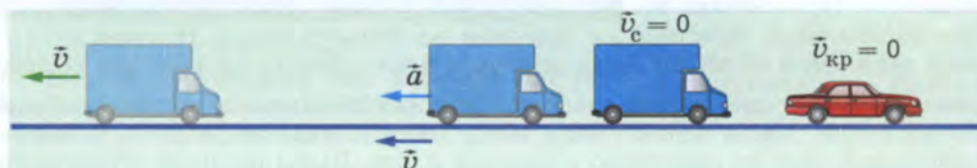


Рис. 10.6

верхность двигалась равномерно со скоростью \vec{v} . При включении тормоза синий автомобиль относительно красного автомобиля начал двигаться с ускорением под действием силы трения со стороны равномерно движущейся земной поверхности, увеличивая свою скорость (рис. 10.6).

Теперь вспомним о силе трения покоя, действующей при каждом шаге человека. Отталкиваясь ногой от земли, человек действует на земную поверхность силой трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.п}1}$, направленной назад. По третьему закону Ньютона земная поверхность действует на подошву обуви силой трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.п}2}$, направленной вперёд (рис. 10.7). Именно эта сила трения покоя и вызывает ускорение движения человека при каждом шаге.



Рис. 10.7

Может показаться странным, но автомобиль на обычной дороге приводится в движение не силами давления нагретого газа на поршень двигателя, а силами трения покоя. Каждый знает, что самый мощный мотор не может привести в движение автомобиль на дороге, покрытой слоем жидкой грязи или льдом с водой. При отсутствии сил трения мотор вращает колёса автомобиля, но автомобиль не трогается с места.

При наличии сил трения вращающееся колесо не скользит по поверхности, а толкает Землю назад силой трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.п}1}$. По третьему закону Ньютона Земля толкает равной по модулю и направленной вперёд силой трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.п}2}$. Равные по модулю силы взаимного отталкивания сообщают ускорение автомобилю и Земле. Ускорение Земли из-за громадной массы ничтожно мало, автомобиль движется с большим ускорением (рис. 10.8).

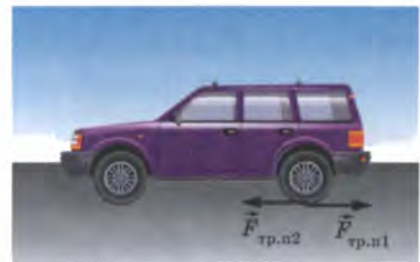


Рис. 10.8

Пример решения задачи

Задача. Под действием силы тяжести лыжник скатывается по склону горы под углом 37° к горизонтальной поверхности. Из состояния покоя он перемещается на 50 м за 5 с равноускоренно прямолинейно. Определите коэффициент трения скольжения лыж о снег ($g = 10 \text{ м/с}^2$).

Дано:

- $\alpha = 37^\circ$
- $s = 50 \text{ м}$
- $t = 5 \text{ с}$
- $v_0 = 0$
- $g = 10 \text{ м/с}^2$

$\mu - ?$

Решение

Как и в примере решения задачи 1 в § 9, при движении вниз по наклонной плоскости модуль ускорения равен $a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$.

При равноускоренном движении путь определяется уравнением

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)t^2}{2}.$$

Отсюда находим значение коэффициента трения:

$$\sin\alpha - \frac{2s}{gt^2} = \frac{0,6 - \frac{100}{10 \cdot 25}}{0,8} = \frac{0,6 - 0,4}{0,8} = 0,25.$$

Ответ: $\mu = 0,25$.

Задача 10.6. Автомобиль движется с ускорением 1 м/с^2 вверх по дороге под углом $17,5^\circ$ к горизонтальной поверхности. Чему равно минимально возможное значение коэффициента трения μ между шинами и дорогой?

Задача 10.7. По ледяной горке, составляющей угол 53° с горизонтальной поверхностью, шайба после удара клюшкой прошла снизу вверх до остановки путь 5,5 м за 1 с. За какое время шайба соскользнет вниз до начальной точки?

§ 11. Закон всемирного тяготения



Исаак Ньютон



Найдите

<http://elementy.ru/trefil/23>
(Закон всемирного тяготения Ньютона.)

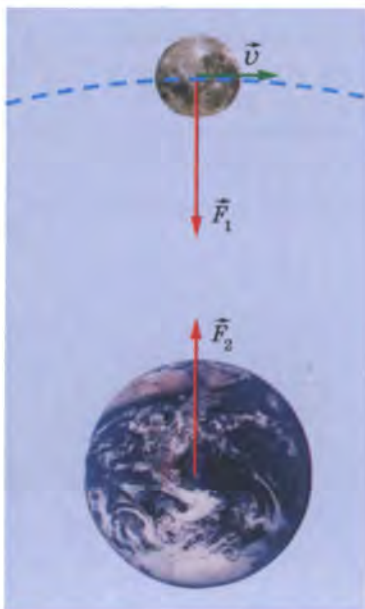


Рис. 11.1

Зависимость силы тяжести от расстояния. Сила тяжести действует на любое тело у поверхности Земли, на вершине самой высокой горы и на расстоянии более 30 км от поверхности Земли, достигаемом стратостатами. Зависит ли сила тяжести от расстояния до Земли? На этот вопрос впервые дал обоснованный ответ в XVII в. английский физик Исаак Ньютон (1643—1727).

Ньютон предположил, что сила тяжести действует на любом расстоянии от Земли, а её значение убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли. Для проверки этого предположения нужно было измерить силу притяжения какого-то тела на большом расстоянии от Земли и сравнить её с силой притяжения у поверхности Земли. Ньютон решил эту задачу почти за 300 лет до запуска первого искусственного спутника Земли, используя результаты астрономических наблюдений.

Сила тяжести равна произведению массы тела на ускорение свободного падения: $F_T = mg$. Отсюда следует, что зависимость ускорения свободного падения тел от расстояния до центра Земли должна быть такой же, как зависимость от расстояния силы их притяжения к Земле.

Ньютон предположил, что Луна удерживается на орбите действием силы тяжести со стороны Земли (рис. 11.1). Тогда центростремительное ускорение Луны есть ускорение свободного падения любого тела на лунной орбите. Его расчёты показали, что наблюдаемое значение центростремительного ускорения Луны совпадает с вычисленным на основании гипотезы об убывании силы тяжести обратно пропорционально квадрату расстояния. Предположение о единой природе силы, удерживающей Луну на орбите, и силы тяжести подтвердилось. На этом основании в 1682 г. Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения:

любые тела притягиваются друг к другу силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния R между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}. \quad (11.1)$$

Силы притяжения любых тел по закону (11.1) называются **силами всемирного тяготения** или **гравитационными силами**. Коэффициент пропорциональности G в законе всемирного тяготения называется **гравитационной постоянной**.

Закон всемирного тяготения в форме (11.1) может применяться для вычисления сил взаимодействия между телами любой формы, если размеры тел малы по сравнению с расстоянием между ними. Для однородных шарообразных тел закон тяготения в данной форме применим при любых расстояниях между телами. За расстояние R в этом случае принимается расстояние между центрами шаров.

Гравитационная постоянная. Если существует гравитационное притяжение между земным шаром и яблоком, то оно должно существовать и между половиной земного шара и яблоком. Продолжая мысленно такой процесс деления тел, можно прийти к выводу, что гравитационные

силы должны действовать не только между звёздами и планетами, но и между двумя яблоками и даже отдельными атомами.

В 1798 г. английский физик Генри Кавендиш не только экспериментально доказал правильность такого предположения, но и определил значение гравитационной постоянной. Гравитационную постоянную можно определить по закону всемирного тяготения, измерив силу притяжения F двух тел с известными массами m_1 и m_2 на известном расстоянии R : $G = \frac{FR^2}{m_1 m_2}$.

Для проведения опыта Кавендиш подвесил на тонкой медной проволоке стержень с двумя свинцовыми шарами диаметром по 5 см на его концах. Против этих шаров он поместил два свинцовых шара диаметром по 20 см. В результате взаимного притяжения двух пар шаров по закону всемирного тяготения стержень поворачивался и закручивал медную проволоку подвеса. Возникающая при этом сила упругости, пропорциональная углу φ поворота стержня, противодействовала закручиванию нити. Сила взаимного притяжения шаров измерялась по углу φ максимального поворота стержня (рис. 11.2).

Фотография современного лабораторного прибора для измерения силы гравитационного взаимодействия представлена на рисунке 11.3.

По современным данным, гравитационная постоянная равна $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ (Н} \cdot \text{м}^2\text{)/кг}^2$.

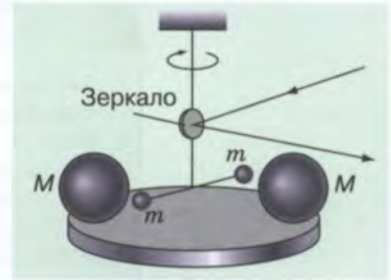


Рис. 11.2



Рис. 11.3

Экспериментальное задание 11.1

Работаем самостоятельно

Измерение массы Земли

Оборудование: гиря, динамометр.

Измерьте силу гравитационного притяжения гири известной массы к Земле и вычислите массу Земли.

Порядок выполнения задания

1. Подвесьте гирию массой m на крючок динамометра и измерьте силу F гравитационного притяжения гири к Земле.
2. Используя закон всемирного тяготения, вычислите массу M Земли:

$$F = G \frac{mM}{R^2}, \quad M = \frac{FR^2}{Gm}.$$

Средний радиус R Земли равен 6371 км.

Задача 11.1. Космический корабль на поверхности Земли имеет вес 8100 Н. Каким будет вес этого корабля на поверхности Луны? Масса Луны примерно в 81 раз меньше массы Земли, радиус Луны примерно в 3,7 раза меньше радиуса Земли.

Задача 11.2. На поверхности Земли на космическую станцию, подготовленную к запуску, действует сила гравитационного притяжения 3600 Н. Какая сила гравитационного притяжения будет действовать на эту космическую станцию на расстоянии от поверхности Земли, равном двум радиусам Земли?

? Вопросы

1. Какие экспериментальные факты послужили основой для открытия силы всемирного тяготения?
2. Как доказывается тождество силы всемирного тяготения и силы тяжести у поверхности Земли?
3. Существуют ли какие-либо ограничения для использования формулы (11.1) при вычислениях гравитационных сил притяжения между двумя телами?
4. Почему заметно действие сил гравитационного притяжения со стороны Земли на любые тела, а действие сил гравитационного притяжения между любыми другими телами в повседневной практической жизни незаметно?
5. Как была экспериментально определена гравитационная постоянная?
6. Как можно измерить массу Земли?

Примеры решения задач

Задача 1. Вычислите ускорение свободного падения на орбите Луны, используя закон всемирного тяготения. Вычислите центростремительное ускорение Луны при её движении вокруг Земли. В расчётах примите, что Луна движется равномерно по круговой орбите радиусом $R_{\text{л}} = 384\,401$ км с периодом обращения $T = 27,3$ сут. Радиус Земли равен $R_{\text{з}} = 6371$ км. Масса $m_{\text{з}}$ Земли неизвестна. Сравните полученные значения ускорений и сделайте выводы.

Решение

По закону всемирного тяготения ускорение свободного падения тела массой m на орбите Луны равно:

$$g_{\text{л}} = \frac{F_{\text{л}}}{m} = \frac{G \frac{mm_{\text{з}}}{R_{\text{л}}^2}}{m} = \frac{Gm_{\text{з}}}{R_{\text{л}}^2}. \quad (1)$$

Ускорение свободного падения у поверхности Земли равно:

$$g_{\text{з}} = \frac{F_{\text{з}}}{m} = \frac{G \frac{mm_{\text{з}}}{R_{\text{з}}^2}}{m} = \frac{Gm_{\text{з}}}{R_{\text{з}}^2}. \quad (2)$$

Из равенства (2) находим

$$Gm_{\text{з}} = g_{\text{з}}R_{\text{з}}^2. \quad (3)$$

Из равенств (1) и (3) следует:

$$g_{\text{л}} = \frac{g_{\text{з}}R_{\text{з}}^2}{R_{\text{л}}^2}. \quad (4)$$

Подставляя числовые значения величин в выражение (4), находим значение ускорения свободного падения на орбите Луны:

$$g_{\text{л}} = \frac{9,81 \cdot (6\,371\,000)^2}{(384\,401\,000)^2} \text{ м/с}^2 \approx 0,0027 \text{ м/с}^2.$$

По известным значениям радиуса орбиты Луны и периода обращения Луны вокруг Земли вычислим центростремительное ускорение Луны:

$$g_{\text{л}} = \frac{v^2}{R_{\text{л}}} = \frac{4\pi^2 R_{\text{л}}^2}{T^2 R_{\text{л}}} = \frac{4\pi^2 R_{\text{л}}}{T^2},$$

$$g_{\text{л}} = \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 384\,401\,000}{(27,3 \cdot 24 \cdot 3600)^2} \text{ м/с}^2 \approx 0,0027 \text{ м/с}^2.$$

Вывод: наблюдаемое значение центростремительного ускорения Луны совпадает с вычисленным на основании гипотезы об убывании силы тяжести обратно пропорционально квадрату расстояния. Следовательно, причиной возникновения центростремительного ускорения Луны является сила тяжести Земли. Сила тяжести Земли и есть сила всемирного тяготения, действующая между Луной и Землёй.

Задача 2. На прямой, соединяющей Солнце и Землю, имеется точка, в которой сила гравитационного притяжения Солнца равна силе притяжения Земли. На каком расстоянии от Земли находится эта точка? Масса Солнца примерно в 333 000 раз больше массы Земли, расстояние от Солнца до Земли 150 000 000 км.

Решение

Массу тела обозначим m , массу Земли — M_3 , массу Солнца — M_C . Расстояние от искомой точки до центра Земли обозначим a , до центра Солнца — b . Так как по условию задачи силы притяжения тела к Земле и Солнцу одинаковы, по закону всемирного тяготения получаем

$$G \frac{mM_3}{a^2} = G \frac{mM_C}{b^2},$$

или

$$\frac{M_3}{a^2} = \frac{333\,000\,M_3}{b^2}.$$

Отсюда получаем

$$b = \sqrt{333\,000} \cdot a \approx 577 a.$$

Из условия задачи следует:

$$\begin{aligned} a + b &= 150\,000\,000 \text{ км,} \\ a + 577a &= 578a = 150\,000\,000 \text{ км,} \\ a &\approx 260\,000 \text{ км.} \end{aligned}$$

Искомая точка находится на расстоянии примерно 260 000 км от центра Земли.

Задача 11.3. На каком расстоянии от поверхности Земли сила земного притяжения, действующая на тело массой 1 кг, равна 2,5 Н? Ускорение свободного падения у поверхности Земли примите равным 10 м/с^2 .

Задача 11.4. Искусственный спутник Земли движется вокруг Земли равномерно по окружности, его центростремительное ускорение равно $2,5 \text{ м/с}^2$. Чему равно расстояние от поверхности Земли до спутника? Ускорение свободного падения у поверхности Земли примите равным 10 м/с^2 . Расстояние выразите в радиусах Земли.

Задача 11.5. В опыте Кавендиша использовались свинцовые шары диаметром 5 и 20 см. Вычислите силу гравитационного притяжения между этими шарами при расстоянии 20 см между центрами шаров. Плотность свинца равна $11\,350 \text{ кг/м}^3$.

Задача 11.6. Чему равно ускорение свободного падения у поверхности планеты, радиус которой в 10 раз больше радиуса Земли, а масса в 100 раз больше массы Земли?

Задача 11.7. Представьте себе, что две пирамиды Хеопса подвешены на прочных канатах одна около другой (рис. 11.4). Как вы думаете, можно ли их удержать от сближения под действием сил всемирного тяготения? Проверьте своё предположение расчётом. При расчёте примите массу пирамиды равной 6 млн т, расстояние между центрами пирамид равным 234 м.



Рис. 11.4

§ 12. Движение тел под действием силы тяжести

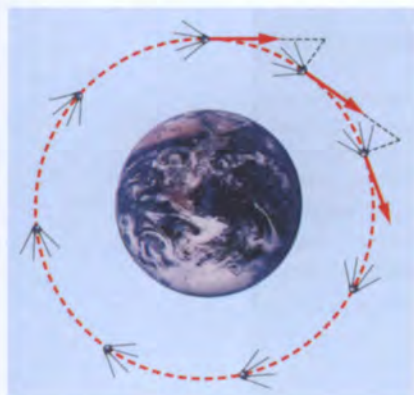


Рис. 12.1

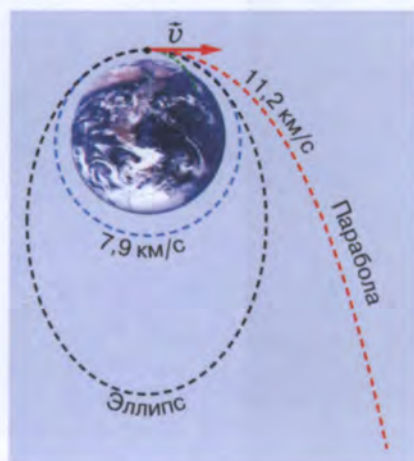


Рис. 12.2

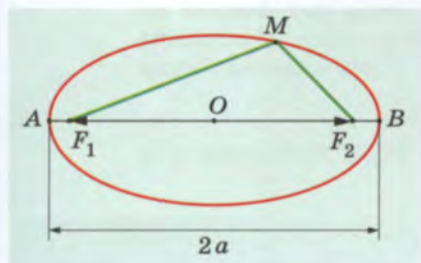


Рис. 12.3

Если перемещение тела под действием силы тяжести значительно меньше расстояния до центра Земли, то можно считать силу всемирного тяготения во всех точках траектории одинаковой, а движение тела равноускоренным. При начальной скорости, равной нулю, тело движется прямолинейно по направлению к центру Земли. Если начальная скорость тела отлична от нуля и вектор начальной скорости направлен не по вертикали, то под действием силы тяжести тело движется с ускорением свободного падения по криволинейной траектории.

Первая космическая скорость. Дальность полёта тела, брошенного с некоторой высоты параллельно земной поверхности, увеличивается с возрастанием начальной скорости. В расчётах необходимо учитывать шарообразность Земли и изменение направления вектора силы тяжести в разных точках траектории. При некотором значении начальной скорости тело может двигаться вокруг Земли по окружности, удаляясь от неё за секунду по инерции ровно на столько, на сколько приближается к ней в свободном падении (рис. 12.1). Скорость v такого движения вокруг Земли по круговой орбите называется **первой космической скоростью**.

При движении с первой космической скоростью по окружности радиусом r вокруг Земли центростремительное ускорение тела равно ускорению свободного падения:

$$\frac{v^2}{r} = g, \quad v = \sqrt{rg}. \quad (12.1)$$

Из формулы (12.1) для значения радиуса орбиты, равного радиусу Земли, первая космическая скорость равна $v \approx 7,9$ км/с.

При скорости меньше 7,9 км/с брошенное в горизонтальном направлении тело падает на поверхность Земли.

При небольшом превышении первой космической скорости тело движется вокруг Земли по криволинейной замкнутой линии, которая называется эллипсом.

При начальной скорости 11,2 км/с траектория движения оказывается разомкнутой линией, ветви которой уходят в бесконечность. Эта линия называется параболой (рис. 12.2).

Минимальная скорость, при которой тело способно преодолеть действие сил притяжения небесного тела и удалиться от него на бесконечно далёкое расстояние, называется параболической скоростью или **второй космической скоростью**.

Эллипс. Эллипсом называется геометрическое место точек на плоскости, для которых сумма расстояний до двух заданных точек F_1 и F_2 (фокусов) есть величина постоянная (рис. 12.3):

$$MF_1 + MF_2 = \text{const.}$$

Половина отрезка AB между точками эллипса на прямой, проходящей через фокусы эллипса, называется большой полуосью a эллипса, $AB = 2a$. Легко доказать равенство

$$MF_1 + MF_2 = 2a.$$

@ Найдите
<http://sch119comp4.narod.ru/02.htm>
 (Вес, невесомость и перегрузка.)

Вес тела. Силу \vec{P} действия тела на опору или подвес в результате притяжения Земли называют **весом** тела. По третьему закону Ньютона на тело действует сила реакции опоры \vec{F} , равная по модулю силе веса \vec{P} и направленная противоположно (рис. 12.4):

$$\vec{P} = -\vec{F}. \quad (12.2)$$

Если под действием силы тяжести $m\vec{g}$ и силы реакции опоры \vec{F} тело остаётся неподвижным или движется с постоянной скоростью, то сумма этих сил равна нулю:

$$m\vec{g} + \vec{F} = 0, \quad m\vec{g} = -\vec{F}. \quad (12.3)$$

Из выражений (12.2) и (12.3) следует, что вес \vec{P} неподвижного или равномерно движущегося тела равен силе тяжести $m\vec{g}$, действующей на тело со стороны Земли:

$$\vec{P} = m\vec{g}. \quad (12.4)$$

Сила тяжести приложена к телу, сила веса приложена к опоре. Эти силы имеют различную физическую природу. Сила тяжести есть сила всемирного тяготения, вес есть сила упругости.

При ускоренном движении тела и опоры вес \vec{P} тела может быть больше или меньше силы тяжести $m\vec{g}$. В лифте, движущемся с ускорением \vec{a} , по второму закону Ньютона имеем

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F} = m\vec{g} - \vec{P}, \quad \vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}. \quad (12.5)$$

Из уравнения (12.5) следует, что при движении лифта с ускорением \vec{a} , направленным вниз параллельно вектору ускорения свободного падения \vec{g} , модуль веса тела в лифте меньше модуля силы тяготения на величину ma :

$$P = mg - ma = m(g - a). \quad (12.6)$$

Если же лифт движется с ускорением \vec{a} , направленным противоположно вектору ускорения свободного падения \vec{g} , модуль веса тела в лифте больше модуля силы тяготения на величину ma :

$$P = mg + ma = m(g + a). \quad (12.7)$$

Невесомость. Если ускорение \vec{a} тела и опоры равно ускорению свободного падения \vec{g} , то согласно уравнению (12.6) вес тела равен нулю: $P = 0$.

Явление отсутствия веса при движении тела и опоры с ускорением свободного падения называется **невесомостью**. При движении самолёта в пикировании вниз с ускорением свободного падения самолёт и находящиеся в нём люди движутся с одинаковым ускорением, поэтому вес человека равен нулю. В состоянии невесомости находятся космонавты при движении под действием силы тяжести вокруг Земли (рис. 12.5).

Перегрузка. Если при ускоренном движении тела и опоры вес тела оказывается больше действующей на него силы тяжести, отношение веса P к силе тяжести mg называют **перегрузкой**. Перегрузки испытывают на себе космонавты при старте ракет, лётчики и водители спортивных автомобилей при ускоренном движении.



Рис. 12.4



Рис. 12.5

? Вопросы

1. Какая скорость называется первой космической скоростью?
2. Какая скорость называется второй космической скоростью?
3. Что называется весом тела?
4. От чего зависит вес тела?
5. При каком условии наблюдается явление невесомости?
6. Что называется перегрузкой?
7. Какая кривая называется эллипсом?

Движение планет и спутников. Для вычисления первой космической скорости на расстоянии r от любого небесного тела, звезды или планеты нужно знать ускорение свободного падения g на этом расстоянии от центра масс небесного тела. Небесное тело массой M действует на другое тело массой m на расстоянии r силой всемирного тяготения F . Следовательно, ускорение свободного падения тела на этом расстоянии равно:

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{Mm}{r^2 m} = G \frac{M}{r^2}. \quad (12.8)$$

Из уравнений (12.1) и (12.8) следует, что первая космическая скорость v_1 на расстоянии r от центра небесного тела массой M равна:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{r}}. \quad (12.9)$$

Формула (12.9) позволяет вычислять массы небесных тел, вокруг которых обращаются другие небесные тела под действием сил всемирного тяготения. Массу M Солнца можно найти по известным значениям скорости v движения Земли по её орбите и радиусу r земной орбиты:

$$\frac{v^2}{r} = G \frac{M}{r^2}, \quad M = \frac{rv^2}{G}. \quad (12.10)$$

Скорость v движения Земли по орбите можно найти по известному радиусу её орбиты и периоду обращения вокруг Солнца:

$$v = \frac{2\pi r}{T}.$$

Для вычисления массы Солнца получаем формулу

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}. \quad (12.11)$$

Аналогично массу M любой планеты, имеющей спутника, можно определить по измеренным значениям радиуса r орбиты и периода обращения T её спутника.

Из формулы (12.11) следует, что для всех спутников, обращающихся по круговым орбитам вокруг одной планеты, или для всех планет, обращающихся вокруг одной звезды, отношение квадратов периодов обращения к кубам радиусов орбит является величиной одинаковой:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}. \quad (12.12)$$

Равенство (12.12) выполняется и в случае движения спутников или планет по эллиптическим орбитам, если через r обозначить длину большой полуоси эллипса.

Факт, что квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их эллиптических орбит, был открыт Иоганном Кеплером и называется **третьим законом Кеплера**:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}. \quad (12.13)$$

Задача 12.1. Спутник планеты Марс Деймос обращается по орбите радиусом 23 460 км с периодом 1,263 земных суток. Определите массу планеты Марс.

Задача 12.2. При какой продолжительности суток на Земле вес тела на экваторе был бы равен нулю?

Задача 12.3. Какие «перегрузки» испытывает бельё в центрифуге стиральной машины, если диаметр центрифуги 40 см, а частота её вращения составляет 1200 об/мин? Ось вращения центрифуги расположена вертикально.

Задача 12.4. При выходе из пикирования самолёт движется по дуге окружности радиусом 250 м со скоростью 360 км/ч. Какую перегрузку испытывает пилот самолёта в нижней точке траектории?

Примеры решения задач

Задача 1. Вычислите массу Солнца по известным значениям периода обращения Земли вокруг Солнца и расстояния от Земли до Солнца.

Решение

Для вычисления массы Солнца используем формулу (12.11). Расстояние r от Солнца до Земли равно примерно 150 000 000 000 м, период обращения T Земли вокруг Солнца равен $T \approx 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} \approx 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$.

Находим значение массы Солнца:

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \approx \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot (1,5 \cdot 10^{11})^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (3,15 \cdot 10^7)^2} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг.}$$

Ответ: $M \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$.

Задача 2. Тело брошено под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту со скоростью $v_0 = 30 \text{ м/с}$. Определите скорость и координаты тела через 1 с после начала движения. Примите в расчётах $g = 10 \text{ м/с}^2$, сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

Дано:

$$\begin{aligned} \alpha &= 60^\circ \\ v_0 &= 30 \text{ м/с} \\ t &= 1 \text{ с} \\ g &= 10 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

$v - ?$, x , $y - ?$

Решение

В качестве тела отсчёта выберем Землю. Начало отсчёта системы координат поместим в точку, из которой тело начало двигаться. Ось OY направим вертикально вверх, а ось OX расположим так, чтобы вектор скорости лежал в плоскости XOY (рис. 12.6). В этом случае движение будет происходить в указанной плоскости и для определения положения тела нужно знать лишь две координаты. На тело действует только сила тяжести $F = mg$.

За начало отсчёта времени примем момент бросания тела. Запишем начальные условия:

$$x_0 = 0, y_0 = 0, v_{0x} = v_0 \cos \alpha, v_{0y} = v_0 \sin \alpha, a_x = 0, a_y = -g.$$

Проекции скорости на оси координат равны:

$$v_x = v_0 \cos \alpha, v_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

Отсюда можно определить модуль и направление вектора скорости в любой момент времени t :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0 \sin \alpha - gt)^2}, \quad \text{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

Подставив числовые данные, получим

$$v = \sqrt{900 \cdot 0,25 + (30 \cdot 0,87 - 10 \cdot 1)^2} \approx 22 \text{ м/с,}$$

$$\text{tg} \beta = \frac{30 \cdot 0,87 - 10 \cdot 1}{30 \cdot 0,5} \approx 1,07, \quad \beta = 47^\circ.$$

Координаты тела в любой момент времени равны: $x = v_0 \cos \alpha \cdot t$, $y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$.

$$x = 30 \cdot 0,5 \cdot 1 \text{ м} = 15 \text{ м}, y \approx 30 \cdot 0,87 \cdot 1 \text{ м} - 5 \text{ м} \approx 21 \text{ м}.$$

Ответ: $v \approx 22 \text{ м/с}$, $x = 15 \text{ м}$, $y \approx 21 \text{ м}$.

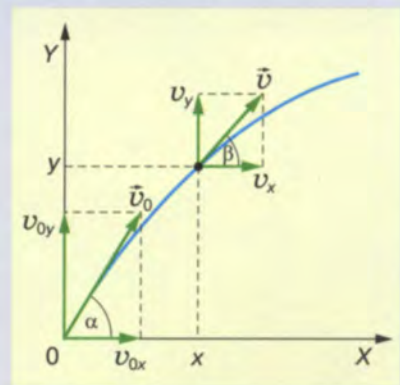


Рис. 12.6

Задача 3. Человек массой 80 кг катается на карусели. Определите вес человека на карусели при движении по окружности радиусом 5 м с периодом вращения 4 с.

Дано:

$$m = 80 \text{ кг}$$

$$R = 5 \text{ м}$$

$$T = 4 \text{ с}$$

$$P = ?$$

Решение

Вес P человека на карусели по третьему закону Ньютона равен по модулю действующей на него силе упругости $F_{\text{упр}}$:

$$P = F_{\text{упр}}$$

Центростремительное ускорение \vec{a} создается равнодействующей силы тяжести $m\vec{g}$ и силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$. По второму закону Ньютона $m\vec{a} = \vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g}$.

На рисунке 12.7 показаны векторы \vec{P} , $\vec{F}_{\text{упр}}$, $m\vec{g}$ и $m\vec{a}$. Так как векторы $m\vec{g}$ и $m\vec{a}$ взаимно перпендикулярны, то

$$F_{\text{упр}} = \sqrt{(ma)^2 + (mg)^2} = m\sqrt{a^2 + g^2}.$$

Центростремительное ускорение a и силу упругости $F_{\text{упр}}$ найдём по начальным условиям:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{(2\pi R)^2}{T^2 R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

$$a \approx \frac{4 \cdot 9,9 \cdot 5}{16} \text{ м/с}^2 \approx 12,4 \text{ м/с}^2.$$

$$F_{\text{упр}} = 80 \sqrt{(12,4)^2 + 10^2} \text{ Н} \approx 1273 \text{ Н}.$$

Ответ: $P = 1273 \text{ Н}$.

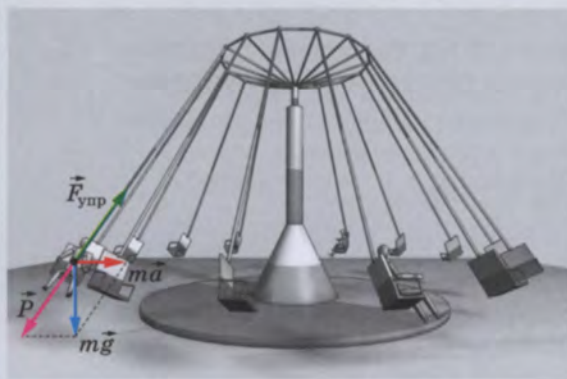
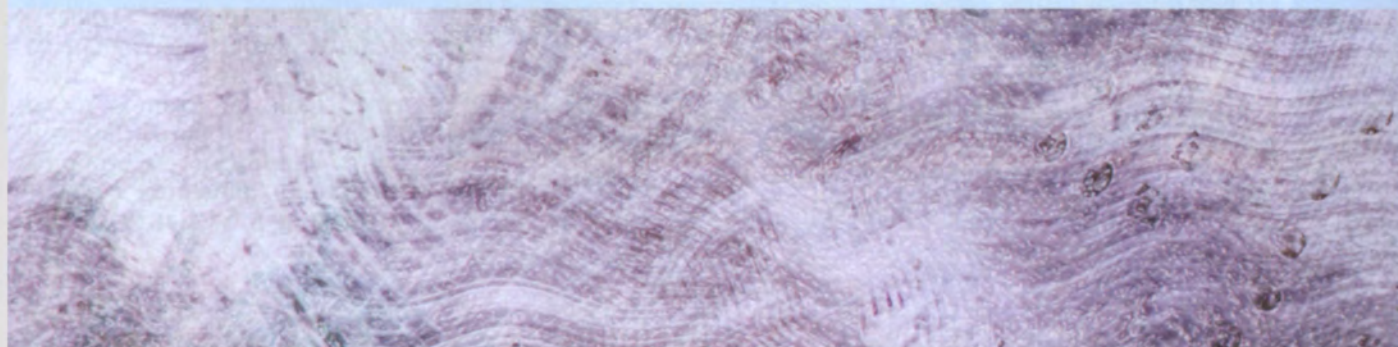


Рис. 12.7

Законы сохранения

13	Закон сохранения импульса	60	17	Потенциальная энергия при упругой деформации тел	76
14	Кинетическая энергия	64	18	Закон сохранения механической энергии	80
15	Работа	68	19	Закон сохранения энергии в тепловых процессах	84
16	Потенциальная энергия гравитационного притяжения тел	72	20	Принцип работы тепловых машин	88



§ 13. Закон сохранения импульса

Импульс тела. По третьему закону Ньютона силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 взаимодействия между двумя телами массами m_1 и m_2 равны по модулю и направлены противоположно. Эти силы можно выразить через значения масс и ускорений тел, а затем через изменения их скорости:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2, \quad m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2, \quad m_1 \frac{\Delta \vec{v}_1}{\Delta t_1} = -m_2 \frac{\Delta \vec{v}_2}{\Delta t_2}. \quad (13.1)$$

Интервалы времени Δt_1 и Δt_2 действия сил одинаковы, поэтому из уравнения (13.1) следует:

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 = -m_2 \Delta \vec{v}_2, \quad \text{или} \quad m_1 \Delta \vec{v}_1 + m_2 \Delta \vec{v}_2 = 0. \quad (13.2)$$

Из уравнения (13.2) для скоростей \vec{v}_1 и \vec{v}_2 тел до взаимодействия и скоростей \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 после взаимодействия получаем

$$m_1(\vec{v}'_1 - \vec{v}_1) + m_2(\vec{v}'_2 - \vec{v}_2) = 0, \quad m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2. \quad (13.3)$$

Физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется импульсом тела.

Импульс обозначается латинской буквой \vec{p} :

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (13.4)$$

Импульс тела иногда называют количеством движения. Импульс — величина векторная, направление вектора импульса совпадает с направлением вектора скорости \vec{v} тела. За единицу импульса в Международной системе единиц принят импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.

Закон сохранения импульса. При любом взаимодействии импульсы тел изменяются. Равенство (13.3) показывает, что сумма векторов импульсов двух тел до взаимодействия равна сумме векторов импульсов тел после их взаимодействия:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2. \quad (13.5)$$

Неизменность суммы векторов импульсов тел при любых взаимодействиях тел является одним из основных, или фундаментальных, законов физики. Этот закон выполняется не только при взаимодействии двух тел, но и при взаимодействии любого количества тел. Он называется **законом сохранения импульса**:

в инерциальной системе отсчёта при отсутствии действия внешних сил сумма векторов импульсов тел остаётся постоянной при любых взаимодействиях тел между собой:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n = \text{const}. \quad (13.6)$$

Если сумма векторов импульсов взаимодействующих тел остаётся постоянной, то сумма изменений импульсов взаимодействующих тел равна нулю:

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 + \Delta \vec{p}_3 + \dots + \Delta \vec{p}_n = 0. \quad (13.7)$$

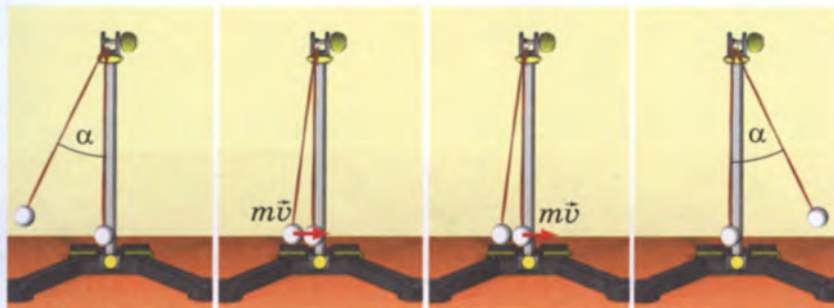


Рис. 13.1

Постоянство суммы импульсов при взаимодействиях тел между собой обнаруживается в простых опытах. Подвесим на нитях равной длины два одинаковых шара на один стержень. Отведём первый шар от вертикали на некоторый угол α и отпустим. Под действием силы тяжести со стороны Земли и силы упругости со стороны нити шар движется с ускорением и к моменту столк-

новения со вторым шаром приобретает скорость \vec{v} . В результате столкновения со вторым шаром первый шар останавливается. Обратим внимание на то, что в момент столкновения шаров внешние силы тяжести и натяжения, действующие на шары, перпендикулярны их импульсу, поэтому они не могут изменить импульс системы, направленный в момент столкновения горизонтально. Угол максимального отклонения второго шара равен углу α начального отклонения первого шара, следовательно, второй шар приобретает точно такую скорость \vec{v} , с какой двигался первый шар (рис. 13.1). Массы шаров одинаковы, значит, импульс второго шара после удара равен импульсу первого шара до столкновения, а сумма импульсов двух шаров не изменилась.

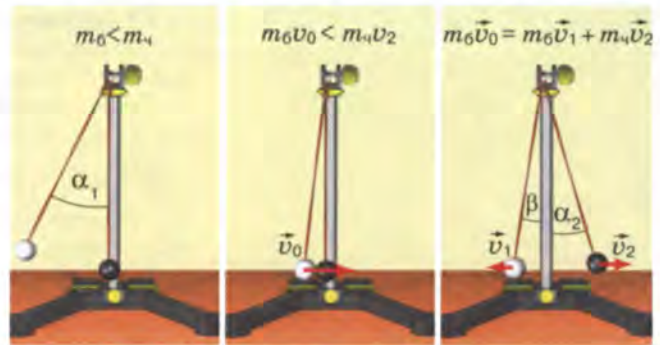


Рис. 13.2

Во втором опыте заменим второй белый шар чёрным шаром, масса которого больше массы белого шара. В опыте с шарами разной массы угол α_2 максимального отклонения чёрного шара оказывается меньше угла α_1 начального отклонения белого шара (рис. 13.2). Это значит, что чёрный шар приобретает после взаимодействия с белым шаром скорость \vec{v}_2 , которая меньше скорости \vec{v}_0 белого шара перед столкновением. Это неудивительно. Так как масса чёрного шара больше массы белого шара, при одинаковом импульсе его скорость должна быть меньше скорости белого шара. Удивительно другое: точные измерения показывают, что импульс $m_4 v_2$ чёрного шара после удара больше импульса $m_6 v_0$ белого шара перед ударом: $m_4 v_2 > m_6 v_0$!

Кроме того, белый шар после удара не останавливается, а движется в противоположном направлении с некоторой скоростью \vec{v}_1 и обладает импульсом $m_6 v_1$. Таким образом, сумма модулей импульсов белого и чёрного шаров после столкновения больше суммы модулей импульсов этих шаров до столкновения: $m_6 v_1 + m_4 v_2 > m_6 v_0 + m_4 \cdot 0$.

Результат такого опыта не опровергает закон сохранения импульса, а полностью его подтверждает. Закон сохранения импульса (13.6) относится к сумме векторов импульсов тел, а не к сумме модулей этих векторов:

$$m_6 \vec{v}_0 + m_4 \vec{0} = m_6 \vec{v}_1 + m_4 \vec{v}_2.$$

Так как вектор \vec{v}_1 скорости белого шара после столкновения направлен противоположно вектору \vec{v}_2 чёрного шара, то при нахождении модуля суммы векторов импульсов этих шаров модуль вектора импульса белого шара вычитается из модуля импульса чёрного шара. В результате для модулей импульсов выполняется равенство

$$m_6 v_0 = m_4 v_2 - m_6 v_1.$$

Задача 13.1. Какую скорость приобретёт неподвижно стоявшая лодка при выпрыгивании на берег человека массой 50 кг со скоростью 8 м/с, направленной горизонтально, если масса лодки равна 200 кг?

Задача 13.2. Вагон массой 10 т, движущийся со скоростью 0,3 м/с, нагоняет вагон массой 15 т, движущийся со скоростью 0,2 м/с. Чему равна скорость вагонов после срабатывания сцепки?

? Вопросы

1. Что называется импульсом тела? Сформулируйте закон сохранения импульса. При каких условиях выполняется закон сохранения импульса?
2. Может ли неподвижное тело в результате столкновения с ним тела, движущегося со скоростью v_1 , приобрести скорость $v_2 > v_1$?
3. Может ли неподвижное тело в результате столкновения с ним тела, обладающего импульсом p_1 , приобрести импульс p_2 , превышающий по модулю импульс ударяющего тела, $p_2 > p_1$?
4. При падении мяча на Землю его импульс непрерывно увеличивается. Не нарушается ли при этом закон сохранения импульса?
5. Поезд метро затормозил и остановился на станции. Куда «исчез» импульс поезда?
6. Почему трудно сойти на берег из лёгкой лодки на воде и просто сойти на берег с большого корабля?

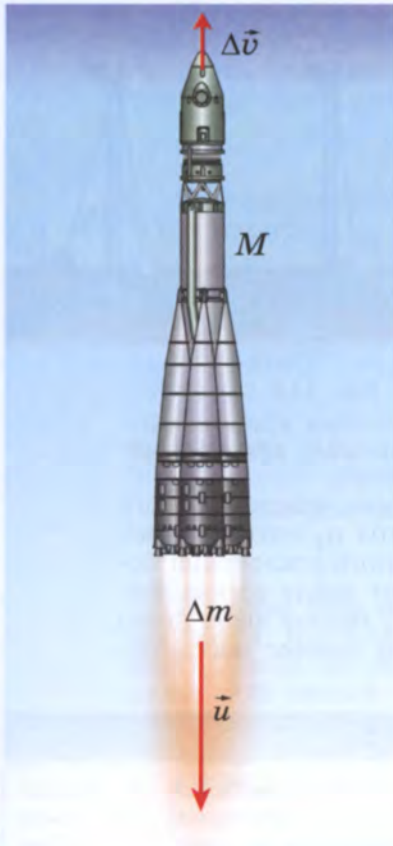


Рис. 13.3

Реактивное движение. Применение закона сохранения импульса позволяет выполнять необходимые расчёты при использовании реактивных двигателей.

При старте ракеты её двигатель за малый интервал времени Δt выбрасывает со скоростью \vec{u} горячие газы массой Δm , ракета массой M приобретает скорость $\Delta\vec{v}$ (рис. 13.3). По закону сохранения импульса сумма векторов изменений импульса ракеты и импульса истекающих газов равна нулю: $M\Delta\vec{v} + \Delta m\vec{u} = 0$

Отсюда получаем равенство

$$M\Delta\vec{v} = -\Delta m\vec{u}. \quad (13.8)$$

Изменение скорости ракеты равно:

$$\Delta\vec{v} = -\frac{\Delta m}{M}\vec{u}. \quad (13.9)$$

Эта формула применима для вычисления изменения скорости Δv ракеты при условии небольшого изменения массы M ракеты в результате работы её двигателей. Изменение импульса ракеты за интервал времени Δt равно импульсу силы тяги $\vec{F}_{\text{тяги}}$, возникающей в результате работы реактивных двигателей:

$$M\Delta\vec{v} = \vec{F}_{\text{тяги}} \Delta t. \quad (13.10)$$

Из выражений (13.10) и (13.8) следует равенство

$$\vec{F}_{\text{тяги}} \Delta t = -\Delta m\vec{u}. \quad (13.11)$$

Из уравнения (13.11) получаем

$$F_{\text{тяги}} = \frac{\Delta m}{\Delta t} u, \quad (13.12)$$

где $\Delta m/\Delta t$ — секундный расход топлива; u — скорость истечения газов.

Ракета обладает многими замечательными особенностями. Автомобилю для движения, кроме двигателя, нужна ещё дорога, с которой могли бы взаимодействовать колёса, теплоходу — вода, а самолёту — воздух. Ракете для движения не нужны ни земля, ни вода, ни воздух, так как она движется в результате взаимодействия с газами, образующимися при сгорании топлива. Поэтому ракета может двигаться в безвоздушном космическом пространстве.

Экспериментальное задание 13.1

Работаем в группе

Измерение скорости истечения струи газа из ракеты

Оборудование: пластмассовая бутылка, весы с разновесом, пробка резиновая с отверстием, насос, манометр, измерительная лента.

Измерьте скорость истечения воздуха из бутылки по реактивному действию газовой струи.

Содержание работы

В качестве ракеты в опыте используется пластмассовая бутылка. В горлышко бутылки вставляют резиновую пробку с трубкой внутри и через шланги соединяют с насосом и манометром. Пробку закрепляют в лапке штатива так, чтобы бутылка была расположена вертикально (рис. 13.4).

Для оценки скорости u истечения газовой струи из ракеты можно включить её двигатель на короткое время и измерить скорость v движения ракеты массой M , которую она приобретает в результате выбрасывания газов массой m . По закону со-

хранения импульса $M\vec{v} + m\vec{u} = 0$, $u = \frac{Mv}{m}$. (13.13)

Накачивая воздух в бутылку, постепенно повышают давление в ней. Когда бутылка-ракета взлетает вертикально вверх (рис. 13.5), воздух выходит из неё до выравнивания давления в бутылке с атмосферным давлением.

Массу m выходящего из ракеты воздуха можно найти по известному объёму V бутылки и измеренному избыточному давлению Δp воздуха в ней в момент старта ракеты.

Порядок выполнения задания

1. Определите массу M пластмассовой бутылки взвешиванием на весах.
2. Вставьте в горлышко бутылки пробку, соединённую с манометром и насосом. Закрепите пробку в штативе таким образом, чтобы ракета взлетала вертикально вверх.
3. Накачивайте воздух в бутылку до взлёта бутылки-ракеты. При этом один участник эксперимента непрерывно должен следить за показаниями манометра и заметить избыточное давление Δp при взлёте ракеты.

Другой участник эксперимента должен заметить высоту подъёма ракеты и измерить эту высоту h .

4. По известному объёму V бутылки и измеренному избыточному давлению Δp найдите массу m вышедшего воздуха. Для вычисления плотности ρ_1 добавленного при накачивании воздуха используйте прямую пропорциональную связь давление газа с его плотностью:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{\Delta p}{p_0}, \quad \rho_1 = \rho_0 \frac{\Delta p}{p_0}.$$

Плотность воздуха при нормальном давлении равна $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $m = \rho_1 V = \rho_0 \frac{\Delta p}{p_0} V = 1,2 \frac{\Delta p}{p_0} V$.

5. По высоте h подъёма ракеты вычислите её начальную скорость: $v = \sqrt{2gh}$.

6. Подставив найденные значения массы M бутылки, массы m вышедшего воздуха и начальной скорости бутылки в уравнение (13.13), вычислите скорость u истечения струи воздуха из ракеты. Результаты измерений и расчётов занесите в таблицу.

Таблица 13.1

M , кг	Δp , Па	V , м ³	m , кг	h , м	v , м/с	u , м/с

Дополнительное задание. Исследуйте, зависит ли скорость истечения струи воздуха из ракеты от начального значения избыточного давления.

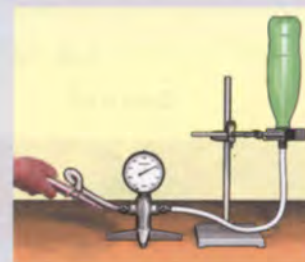


Рис. 13.4



Рис. 13.5

Задача 13.3. Ракета массой 1000 т стартует вертикально вверх под действием двигателей, выбрасывающих газы со скоростью 4 км/с, расход топлива 3250 кг/с. С каким ускорением начинает ракета своё движение вверх?

Темы сообщений

1. Принцип работы реактивного двигателя.
2. Реактивное движение в природе.
3. Реактивное движение в авиации.
4. Реактивное движение на водном и сухопутном транспорте.
5. Работы К. Э. Циолковского и С. П. Королёва.
6. Космические ракеты.

Вопросы

1. Приведите примеры реактивного движения и объясните его принцип.
2. Чем отличается принцип действия ракетного двигателя от всех других двигателей?
3. Почему с увеличением избыточного давления воздуха в ракете высота её подъёма возрастает?
4. Чем объясняется большая скорость истечения воздуха из бутылки, полученная в эксперименте?

§ 14. Кинетическая энергия

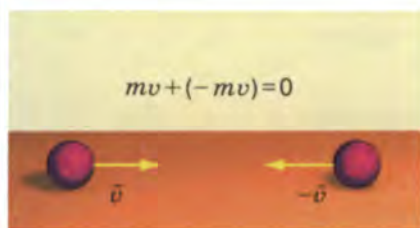


Рис. 14.1

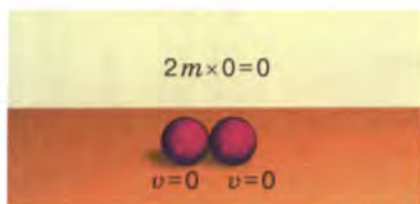


Рис. 14.2

Превращение поступательного механического движения тел в другие формы движения. Закон сохранения импульса показывает, что механическое движение характеризуется импульсом как физической величиной, сохраняющейся в системе при любых взаимодействиях тел. Однако этот закон не может объяснить все закономерности механических взаимодействий тел. Рассмотрим такой опыт.

Если два одинаковых шара из пластилина движутся навстречу друг другу с одинаковыми по модулю скоростями, то после столкновения они останавливаются (рис. 14.1, 14.2). Сумма импульсов шаров до и после столкновения одинакова и равна нулю, закон сохранения импульса выполняется.

Если бы движущиеся тела в результате взаимодействия между собой могли останавливаться без каких-либо изменений в них, то из этого факта можно было бы сделать вывод о бесследном исчезновении механического движения при взаимодействии тел. Но природа устроена иначе. В природных явлениях нигде и никогда механическое движение не исчезает бесследно. Нигде и никогда в природе механическое движение не возникает само собой, без каких-либо изменений во взаимодействующих телах.

При столкновении пластилиновых шаров, помимо изменений скоростей их движения, произошла деформация шаров и повышение их температуры. Не исчезает бесследно и механическое движение мяча при падении на пол. Мяч деформируется, останавливается, а затем вновь приходит в движение и летит вверх.

Но существует ли мера механического движения, с помощью которой можно было бы точно рассчитать, на сколько градусов нагреются пластилиновые шары при столкновении, на сколько сантиметров сожмётся мяч и как высоко он подпрыгнет после удара о пол?

Оказалось, что существует мера механического движения, сохраняющаяся при любых превращениях одного вида механического движения в другие виды механического движения или в другие виды движения материи. Эта сохраняющаяся мера движения материи называется **энергией**.

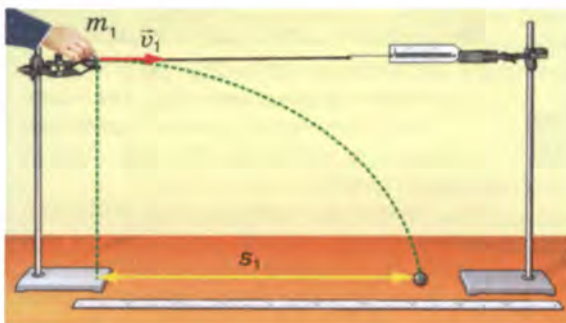


Рис. 14.3

Кинетическая энергия. Для нахождения меры поступательного механического движения, пригодной для количественного описания взаимных превращений различных видов механического движения, превращений механического движения в другие формы движения, выполним следующие опыты.

Закрепим динамометр горизонтально над столом и прикрепим к его пружине нить (рис. 14.3). К другому концу нити привяжем шар массой m_1 . Затем поднимем шар до уровня крепления нити к пружине, растянем пружину и отпустим шар. Под действием растянутой пружины шар приходит в движение и приобретает скорость \vec{v}_1 . Эту скорость можно

определить по дальности полёта s_1 в горизонтальном направлении.

Заменяем шар массой m_1 на шар массой m_2 , в 4 раза большей массы первого шара ($m_2 = 4m_1$), и повторим опыт при одинаковом растяжении пружины. Дальность полёта второго шара s_2 оказывается в 2 раза меньше дальности полёта первого шара s_1 (рис. 14.4).

Следовательно, начальная скорость \vec{v}_2 второго шара при одинаковом растяжении пружины оказывается в 2 раза меньше начальной скорости \vec{v}_1 первого шара:

$$v_2 = \frac{1}{2}v_1.$$

Отсюда следует, что при одинаковом действии пружины у двух шаров с разными массами одинаковыми оказываются произведения массы на квадрат скорости:

$$m_2 v_2^2 = 4m_1 \cdot \frac{1}{4}v_1^2 = m_1 v_1^2.$$

Если два шара с разными массами сталкиваются поочередно с одной и той же пружиной и сжимают её, то в момент прекращения движения шаров сжатие пружины одинаково, если у шаров были одинаковыми произведения массы на квадрат начальной скорости. Поэтому величина mv^2 может служить количественной мерой поступательного движения тел при взаимных превращениях различных видов механического движения, при превращениях механического движения в другие формы движения и при превращениях других форм движения в механическое движение. В физике в качестве этой количественной меры принята величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости, которая называется **кинетической энергией** тела и обозначается буквой E с индексом «к»:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Значение кинетической энергии тела зависит от выбора системы отсчёта.

Задача 14.1. Человек прыгнул вверх. В результате взаимодействия с Землёй импульс человека изменился. По закону сохранения импульса ровно на столько же по модулю изменился импульс Земли. Равно ли при этом изменение кинетической энергии человека изменению кинетической энергии Земли? Докажите своё утверждение.

Задача 14.2. Изменяются ли импульс и кинетическая энергия искусственного спутника Земли за половину оборота по круговой орбите вокруг Земли?

Задача 14.3. В результате работы двигателя импульс автомобиля увеличился в 2 раза. Как изменилась при этом кинетическая энергия автомобиля?

Задача 14.4. Кинетическая энергия тела равна 20 Дж, а его импульс равен 10 Н·с. С какой скоростью движется тело?

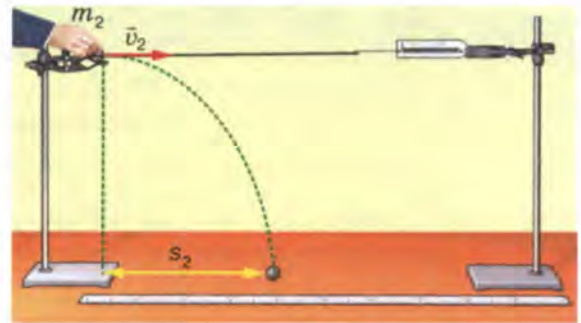


Рис. 14.4

? Вопросы

1. Что называется кинетической энергией?
2. Почему половину произведения массы тела на квадрат его скорости выбрали в качестве меры поступательного движения тел?
3. Объясните опыты, в которых обнаруживается способность кинетической энергии служить мерой превращения поступательного механического движения в другие формы движения материи.

Пример решения задачи

Задача. Легковой автомобиль массой 2 т выехал на встречную полосу движения и столкнулся с грузовым автомобилем массой 4 т, движущимся навстречу со скоростью 72 км/ч. В результате столкновения произошли разрушения в обоих автомобилях без их перемещения от места столкновения. После столкновения движение автомобилей прекратилось. Определите скорость легкового автомобиля перед столкновением и энергию, затраченную на разрушение автомобилей.

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 2 \text{ т} = 2000 \text{ кг} \\ m_2 &= 4 \text{ т} = 4000 \text{ кг} \\ v_2 &= 72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с} \\ v_1 &= ? \quad E = ? \end{aligned}$$

Решение

Так как автомобили остались на месте столкновения, их суммарный импульс после столкновения был равен нулю. По закону сохранения импульса сумма импульсов автомобилей до и после столкновения одинакова, следовательно, выполняется равенство

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2)v = 0.$$

Отсюда находим модуль скорости легкового автомобиля:

$$v_1 = \frac{m_2 v_2}{m_1}, \quad v_1 = \frac{4000 \text{ кг} \cdot 20 \text{ м/с}}{2000 \text{ кг}} = 40 \text{ м/с} = 144 \text{ км/ч}.$$

Скорость автомобилей после столкновения равна нулю, следовательно, кинетическая энергия обоих автомобилей была затрачена на их взаимное разрушение:

$$E = E_{к1} + E_{к2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{2000 \text{ кг} \cdot 1600 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2} + \frac{4000 \text{ кг} \cdot 400 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2} = 2\,400\,000 \text{ Дж}.$$

Ответ: $v_1 = 144 \text{ км/ч}$, $E = 2400 \text{ кДж}$.

Задача 14.5. Два автомобиля с одинаковой массой по 1000 кг движутся со скоростями 10 и 30 м/с в одном направлении. Чему равна кинетическая энергия второго автомобиля в системе отсчёта первого автомобиля?

Задача 14.6. По прямолинейному горизонтальному участку дороги движутся в одном направлении два автомобиля с одинаковой по модулю скоростью $v_1 = 72 \text{ км/ч}$. Затем первый автомобиль увеличивает свою скорость до $v_2 = 144 \text{ км/ч}$, а второй продолжает движение с постоянной скоростью. Вычислите изменения кинетической энергии первого автомобиля в системе отсчёта, связанной с Землёй, и в системе отсчёта, связанной со вторым автомобилем. Масса первого автомобиля $m = 1000 \text{ кг}$.

Задача 14.7. Сколько бензина расходует автомобильный мотор при разгоне автомобиля массой 1 т из состояния покоя до скорости 108 км/ч, если КПД двигателя 40%? При расчётах потерями энергии на преодоление действия сил трения и сопротивления воздуха пренебречь. Удельная теплота сгорания бензина равна 45 000 кДж/кг.

Задача 14.8. Для запуска в космос первого в мире космонавта Ю. А. Гагарина был построен космический корабль «Восток» массой 287 т. Более половины этой массы приходилось на горючее для ракетных двигателей. Какой массы керосина было бы достаточно для запуска человека массой 80 кг на орбиту искусственного спутника Земли, если бы был разработан способ превращения всей энергии, освобождающейся при сжигании керосина, в кинетическую энергию движения космонавта? Удельная теплота сгорания керосина равна 43 000 кДж/кг, первая космическая скорость равна 7,9 км/с.

Изменение кинетической энергии тела под действием силы. Изменение кинетической энергии тела происходит под действием сил. Если на первоначально неподвижное тело массой m действует сила \vec{F} , то во время движения вектор силы направлен параллельно вектору скорости. Тело движется равноускоренно, и через время t скорость \vec{v} его движения достигает значения

$$v = at, \quad (15.1)$$

или

$$v = \frac{Ft}{m}. \quad (15.2)$$

Изменение кинетической энергии тела при этом равно:

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{2}. \quad (15.3)$$

Из выражений (15.3), (15.1) и (15.2) получаем

$$\Delta E_k = \frac{m \cdot at \cdot Ft}{2m} = F \cdot \frac{at^2}{2} = Fs. \quad (15.4)$$

Работа.

Физическая величина, равная изменению кинетической энергии тела в результате действия на него силы, называется работой силы.

Работа обозначается буквой A :

$$A = \Delta E_k. \quad (15.5)$$

Из равенств (15.5) и (15.4) следует, что при совпадении направления вектора силы с направлением вектора скорости тела работа силы A равна произведению модуля силы F на пройденный путь s :

$$A = Fs. \quad (15.6)$$

Единица работы в Международной системе единиц 1 Дж равна работе силы 1 Н на пути 1 м при совпадении направлений вектора силы и вектора скорости: 1 Дж = 1 Н · 1 м.

По определению работа равна изменению кинетической энергии, поэтому и для измерения энергии в СИ принята единица *джоуль* (1 Дж).

Задача 15.1. Какую работу совершила сила тяжести при свободном падении тела массой 5 кг при увеличении скорости от нуля до 10 м/с?

Задача 15.2. Человек массой 80 кг прыгает с высоты 5 м на землю. Чему равна кинетическая энергия человека в момент приземления? Влиянием сопротивления воздуха пренебречь, ускорение свободного падения принять равным 10 м/с².

? Вопросы

1. Что называется работой? Как связана работа с действующей на тело силой?
2. При каких условиях работа силы равна нулю?
3. В каких единицах выражается работа?
4. Может ли работа силы иметь отрицательное значение?
5. Какой знак имеет работа, совершаемая силой трения при торможении?

Задача 15.3. Автомобиль массой 2000 кг начал движение из состояния покоя и при движении по горизонтальной дороге достиг скорости 108 км/ч. Какую полезную работу при этом совершил двигатель автомобиля?

Задача 15.4. На горизонтальном участке дороги скорость автомобиля массой 1000 кг увеличилась от 72 до 144 км/ч. Вычислите полезную работу двигателя на этом пути.

Задача 15.5. Автомобиль начинает движение из состояния покоя и разгоняется на горизонтальном участке пути до скорости 36 км/ч. Чему равно отношение полезной работы A_1 автомобильного двигателя, совершённой при увеличении скорости автомобиля от 0 до 18 км/ч, к работе A_2 , совершённой при увеличении скорости автомобиля от 18 до 36 км/ч?

Работа при непараллельном направлении векторов силы и скорости. При направлении вектора силы \vec{F} под некоторым углом α к вектору скорости \vec{v} тела вектор силы \vec{F} можно представить как равнодействующую вектора силы \vec{F}_1 , параллельного вектору скорости \vec{v} тела, и вектора силы \vec{F}_2 , перпендикулярного вектору скорости \vec{v} (рис. 15.1). Действие силы \vec{F}_2 не изменяет модуля скорости тела, а изменяет лишь направление вектора скорости. Так, при равномерном движении тела по окружности действует центростремительная сила. Изменение модуля скорости и кинетической энергии тела происходит только под действием силы \vec{F}_1 , параллельной вектору скорости \vec{v} :

$$\Delta E_k = F_1 s. \quad (15.7)$$

Модуль вектора силы \vec{F}_1 равен:

$$F_1 = F \cos \alpha. \quad (15.8)$$

Из выражений (15.5), (15.7) и (15.8) следует:

$$A = F s \cos \alpha. \quad (15.9)$$

Мы получили, что при направлении вектора силы под углом к вектору скорости тела работа силы равна произведению модуля силы на пройденный путь и на косинус угла α между векторами силы и скорости.

Из выражения (15.9) следует, что в зависимости от угла между векторами силы и скорости работа силы может иметь положительное или отрицательное значение. При значениях угла α в пределах $0 < \alpha < 90^\circ$ работа силы \vec{F} положительна. В результате действия силы скорость тела возрастает, кинетическая энергия увеличивается.

При значениях угла α в пределах $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ работа силы \vec{F} отрицательна, в результате действия силы скорость тела убывает.

Например, при действии силы трения скольжения на движущееся тело действует сила трения \vec{F} , направленная противоположно вектору скорости \vec{v} , $\alpha = 180^\circ$ (рис. 15.2). Так как $\cos 180^\circ = -1$, работа силы трения при торможении отрицательна.

Скорость и кинетическая энергия тел в разных системах отсчёта могут иметь различные значения, поэтому относительна и работа сил, равная изменению кинетической энергии тела.

Определение скорости автомобиля по длине тормозного пути. Для установления виновника автомобильной аварии нужно определить скорость автомобиля перед началом торможения. Для этого измеряют длину тормозного пути (рис. 15.3). По длине s тормозного пути и известному значению силы трения находят работу A силы трения. Эта работа равна изменению кинетической энергии автомобиля:

$$A = -Fs = 0 - \frac{mv^2}{2} = -\frac{mv^2}{2}. \quad (15.10)$$

Отсюда скорость v автомобиля перед началом торможения равна:

$$v = \sqrt{\frac{2Fs}{m}}. \quad (15.11)$$

Сила трения на горизонтальной поверхности равна $F = \mu mg$, поэтому

$$v = \sqrt{2\mu gs}, \quad (15.12)$$

где μ — коэффициент трения; g — ускорение свободного падения.

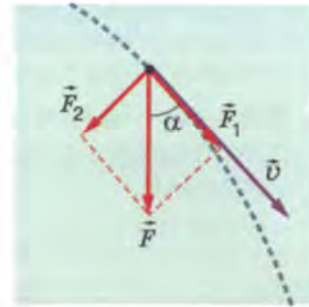


Рис. 15.1

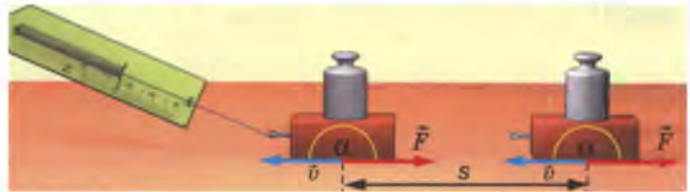


Рис. 15.2



Рис. 15.3

Экспериментальное задание 15.1

Работаем в группе

Определение кинетической энергии и скорости тела по длине тормозного пути

Оборудование: линейка измерительная, книги, монета, два листа бумаги, весы с разновесом.



Рис. 15.4



Рис. 15.5

Определите по длине тормозного пути начальное значение скорости и значение кинетической энергии монеты.

Порядок выполнения задания

1. Положите на стол 3—4 книги и постройте наклонную плоскость (рис. 15.4). На эту наклонную плоскость положите два листа бумаги для того, чтобы монета могла плавно соскальзывать с такой плоскости на горизонтальную поверхность. Положите монету на наклонную плоскость у верхнего края и отпустите её. Измерьте тормозной путь s монеты.

2. Изменяя высоту h наклонной плоскости (рис. 15.5), найдите такое её значение, при котором действие составляющей вектора силы тяжести, направленной вдоль наклонной плоскости, уравновешивается действием силы трения скольжения:

$$mg \sin \alpha = F = \mu N = \mu mg \cos \alpha. \quad (15.13)$$

При выполнении этого условия монета начинает скользить по наклонной плоскости при лёгком постукивании по столу. Из равенства (15.13) следует,

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = h/a. \quad (15.14)$$

что коэффициент трения равен:

3. Измерьте высоту h , длину a и вычислите значение коэффициента трения.

4. Используя формулу (15.12), по найденным значениям тормозного пути s и коэффициента трения μ вычислите скорость v в начале тормозного пути.

5. Взвесьте монету и вычислите её кинетическую энергию в начале тормозного пути. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

Таблица 15.1

s , м	h , м	a , м	μ	v , м/с	m , кг	E_k , Дж

Пример решения задачи

Задача. Автомобиль движется равномерно со скоростью 144 км/ч по горизонтальному участку шоссе. Вычислите силу сопротивления воздуха движению автомобиля, если известно, что полезная мощность двигателя, расходуемая на преодоление действия этой силы, была равна 120 кВт.

Дано:

$$v = 144 \text{ км/ч} = 40 \text{ м/с}$$

$$N = 120 \text{ кВт} = 120\,000 \text{ Вт}$$

$F = ?$

Решение

Полезная мощность N двигателя равна $N = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv$.

Отсюда находим силу сопротивления: $F = \frac{N}{v} = \frac{120\,000 \text{ Вт}}{40 \text{ м/с}} = 3000 \text{ Н}$.

Ответ: $F = 3000 \text{ Н}$.

Задача 15.6. Велосипедист двигался со скоростью 20 м/с по круговой траектории. Чему равна работа сил трения при торможении велосипеда до скорости 10 м/с на этой круговой траектории? Масса велосипеда с велосипедистом 80 кг, длина тормозного пути 20 м.

Задача 15.7. На тело массой 2 кг, движущееся равномерно со скоростью 25 м/с относительно Земли, в течение 5 с действовала сила 10 Н, направленная противоположно вектору скорости. Вычислите изменение кинетической энергии тела за это время в системе отсчёта, связанной с Землёй.

Пример решения задачи

Задача. Санки скатываются из состояния покоя по ледяному склону и продолжают движение по горизонтальной поверхности до остановки. Длина l склона равна 5 м, угол α его наклона к горизонтальной поверхности равен 37° , длина пройденного пути s по горизонтальной поверхности равна 52 м. Определите коэффициент трения полозьев санок о снег.

Дано:

$l = 5 \text{ м}$
 $\alpha = 37^\circ$
 $s = 52 \text{ м}$

$\mu = ?$

Решение

При известном значении начальной скорости v коэффициент трения μ можно найти по длине тормозного пути s при движении санок по горизонтальной поверхности. Изменение кинетической энергии ΔE_k санок на горизонтальном участке пути s равно работе A силы трения $F_{\text{тр}}$:

$$\Delta E_k = A, \quad \frac{mv^2}{2} = F_{\text{тр}} s = \mu mgs. \quad (1)$$

Отсюда находим выражение для вычисления коэффициента трения:

$$\mu = \frac{mv^2}{2mgs} = \frac{v^2}{2gs}. \quad (2)$$

Скорость v в начале горизонтального участка пути можно найти, определив ускорение a движения санок по склону известной длины l .

На рисунке 15.6 представлены три силы, действующие на санки. Это сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры \vec{N} , перпендикулярная поверхности склона, и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$, параллельная поверхности склона и противоположная вектору скорости.

Представим вектор силы тяжести как равнодействующую двух векторов: \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . Действие силы \vec{F}_2 уравнивается действием равной по модулю и направленной противоположно силы реакции опоры \vec{N} . Следовательно, равнодействующая \vec{F} трёх сил равна сумме векторов $\vec{F}_{\text{тр}}$ и \vec{F}_1 : $\vec{F} = \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_1$.

Модули этих сил равны $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu F_2 = \mu mg \cos \alpha$, $F_1 = mg \sin \alpha$.

Векторы $\vec{F}_{\text{тр}}$ и \vec{F}_1 направлены противоположно, поэтому модуль равнодействующей равен разности их модулей: $F = F_1 - F_{\text{тр}} = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha$.

Ускорение санок при скольжении по склону по второму закону Ньютона равно:

$$a = \frac{F}{m} = g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha). \quad (3)$$

Скорость равноускоренного движения из состояния покоя после прохождения пути l с ускорением a по формуле (4.6) равна:

$$v = \sqrt{2al} = \sqrt{2g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)l}. \quad (4)$$

Подставляя найденное выражение для скорости санок в конце склона в выражение (2), получаем коэффициент трения:

$$\mu = \frac{v^2}{2gs} = \frac{2g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)l}{2gs} = \frac{(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)l}{s}, \quad \mu(s + \cos \alpha \cdot l) = \sin \alpha \cdot l,$$

$$\mu = \frac{\sin \alpha \cdot l}{s + \cos \alpha \cdot l}, \quad \mu \approx \frac{0,6 \cdot 5}{52 + 0,8 \cdot 5} \approx 0,05.$$

Ответ: $\mu \approx 0,05$.

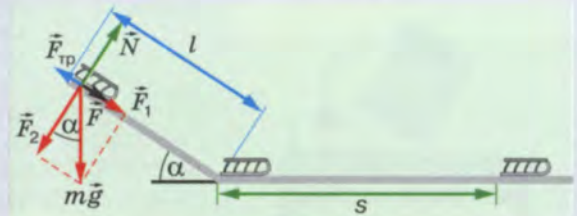


Рис. 15.6

§ 16. Потенциальная энергия гравитационного притяжения тел

Потенциальная энергия. При свободном падении на Землю скорость любого тела увеличивается, кинетическая энергия тела возрастает. Отсюда можно сделать вывод, что поднятое над Землёй тело обладает запасом какой-то энергии, обусловленной действием сил гравитационного притяжения и способной превращаться в кинетическую энергию поступательного движения. Чтобы тело обладало запасом этой энергии, его нужно поднять над Землёй. Чем выше поднято тело над Землёй, тем больше его кинетическая энергия у поверхности Земли. Энергия, которая зависит только от взаимного расположения взаимодействующих тел или частей одного тела, называется **потенциальной энергией**.

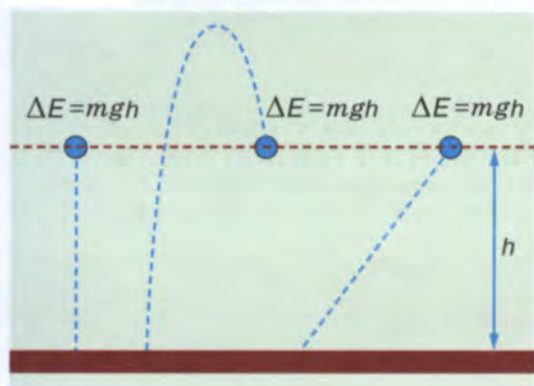


Рис. 16.1

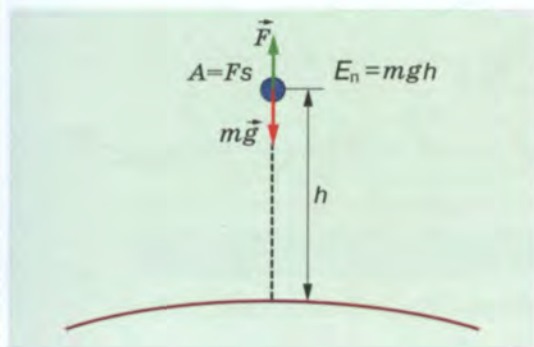


Рис. 16.2

Опыты показали, что при движении под действием сил гравитационного притяжения изменение кинетической энергии тела зависит только от изменения расстояния от тела до Земли и не зависит от формы траектории движения тела, направления и модуля вектора начальной скорости тела (рис. 16.1). Это объясняется тем, что потенциальная энергия гравитационного притяжения тел к Земле зависит только от расстояния между телом и Землёй.

Потенциальная энергия гравитационного притяжения в однородном поле. Изменение потенциальной энергии, как и изменение кинетической энергии, в физике измеряется работой силы. Для нахождения закона зависимости потенциальной энергии тела от расстояния до поверхности Земли будем считать, что ускорение свободного падения во всех точках над некоторым участком поверхности Земли одинаково по модулю и направлению. Гравитационное поле с такими свойствами называется **однородным** полем. Гравитационное поле у поверхности Земли можно считать однородным в том случае, если изменения положения тела относительно поверхности Земли очень малы по сравнению с радиусом Земли. Таким было бы гравитационное поле над плоской Землёй.

Для подъёма тела массой m вертикально вверх на высоту h над поверхностью Земли внешняя сила F должна совершить работу A против действия силы тяжести mg на расстоянии h (рис. 16.2):

$$A = Fs = mgh.$$

Эта работа равна изменению потенциальной энергии ΔE_n тела в поле силы тяжести:

$$\Delta E_n = A = mgh. \quad (16.1)$$

Таким образом, увеличение потенциальной энергии тела может произойти в результате действия внешней силы, направленной противоположно силе тяжести.

Кинетическая энергия в любой системе отсчёта может иметь только положительное значение или быть равной нулю. Потенциальная энергия может иметь как положительные, так и отрицательные значения.

Обычно условно принимают, что потенциальная энергия тела на поверхности Земли равна нулю: $E_{n0} = 0$. При таком выборе начала отсчёта из выражения (16.1) следует, что на высоте h потенциальная энергия E_n тела равна произведению массы m тела на ускорение свободного падения g и на высоту h :

$$E_n = mgh. \quad (16.2)$$

В шахте или в колодце на глубине $-h$ от поверхности Земли потенциальная энергия E_n тела имеет отрицательное значение: $E_n = -mgh$.

При свободном падении тела с высоты h на поверхность Земли сила тяжести F_T совершает работу

$$A_T = mgh.$$

Потенциальная энергия тела при этом уменьшается на величину $-mgh$:

$$\Delta E_n = -mgh.$$

Следовательно, изменение потенциальной энергии тела при его вертикальном перемещении в однородном гравитационном поле равно работе силы тяжести, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta E_n = -A_T. \quad (16.3)$$

Хотя значение потенциальной энергии тела в гравитационном поле зависит от выбора начала отсчёта, изменение потенциальной энергии тела, равное работе силы тяжести при перемещении тела из одной точки в другую, не зависит от выбора начала отсчёта.

Экспериментальное задание 16.1

Работаем самостоятельно

Определение потенциальной энергии тела

Оборудование: учебник, нить, динамометр, измерительная лента или линейка.

Определите потенциальную энергию учебника физики, лежащего на столе.

Порядок выполнения задания

Для определения потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тела с Землёй нужно знать массу m тела и высоту h над уровнем, который условно принят за нулевой уровень. Высота h нулевого уровня принимается равной нулю, потенциальная энергия любого тела на этом уровне равна нулю.

1. За нулевой уровень примите уровень пола. Измерьте расстояние h от поверхности стола до поверхности пола.

2. Обвяжите учебник нитью и измерьте его вес с помощью динамометра (рис. 16.3):

$$P = mg.$$

3. Вычислите потенциальную энергию учебника, лежащего на столе, относительно уровня пола:

$$E_n = mgh.$$



Рис. 16.3

? Вопросы

1. Почему потенциальная энергия поднятого над Землёй тела равна произведению массы тела на ускорение свободного падения и высоту над Землёй?
2. При свободном падении изменение кинетической энергии тела равно работе сил тяжести со знаком «плюс», а изменение потенциальной энергии равно работе сил тяжести со знаком «минус». Какой смысл в знаках «плюс» и «минус»?
3. При выборе начала отсчёта на поверхности Земли изменение кинетической энергии свободно падающего с высоты h тела равно изменению потенциальной энергии этого тела, взятому с противоположным знаком. Сохранится ли это равенство при выборе начала отсчёта потенциальной энергии на высоте h ?

Пример решения задачи

Задача. Из квартиры на пятом этаже человек может спуститься на лифте или по лестнице. Найдите отношение работ, совершённых силой тяжести в первом и втором случаях, если пройденный человеком путь во втором случае в 1,5 раза больше пути в первом случае.

Решение

В системе тел человек—Земля работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A_T = -\Delta E_n = mg\Delta h.$$

Изменение высоты Δh одинаково в обоих случаях, работа силы тяжести при переходе человека с одного этажа на другой не зависит от того, спускался он по лестнице или воспользовался лифтом. Отношение работ равно единице.

Задача 16.1. Как изменяется потенциальная энергия искусственного спутника Земли массой 100 кг при совершении половины оборота по круговой орбите радиусом 7000 км?

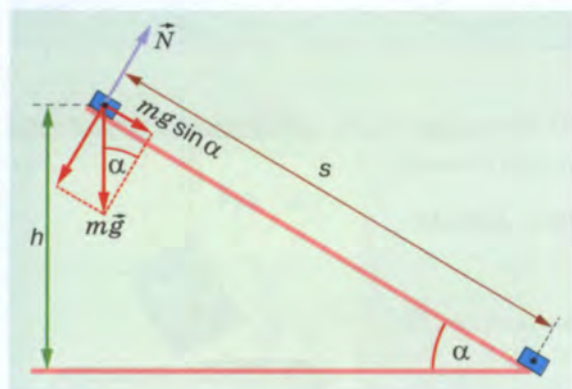


Рис. 16.4

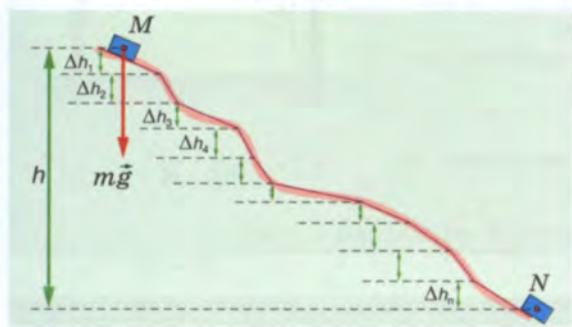


Рис. 16.5

Работа силы тяжести при движении по криволинейной траектории. При перемещении тела вниз по наклонной плоскости (рис. 16.4) сила тяжести совершает работу:

$$A_T = mgs \cdot \sin \alpha = mgh.$$

Движение тела в поле силы тяжести из точки M в точку N по криволинейной траектории (рис. 16.5) можно мысленно представить состоящим из перемещений по наклонным отрезкам. Работа A_T силы тяжести на этом пути равна сумме работ на отдельных участках пути. Если на всём пути ускорение силы тяжести одинаково, то эта работа равна:

$$A_T = mg\Delta h_1 + mg\Delta h_2 + \dots + mg\Delta h_n = mg(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n) = mgh.$$

Это значит, что работа постоянной силы тяжести не зависит от траектории движения тела и равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в начальном и конечном положениях. При движении вниз работа силы тяжести положительна, при движении вверх отрицательна. Если начальное и конечное значения высоты совпадают, работа силы тяжести равна нулю.

Задача 16.2. Тело первый раз свободно падает с высоты 5 м, второй раз скользит без трения по наклонной плоскости длиной 10 м с той же высоты. Найдите отношения скоростей тела и времени его движения в первом и втором случаях.

Задача 16.3. Камень массой 2 кг брошен вертикально вверх с начальной скоростью 10 м/с. Найдите работу силы тяжести и изменение потенциальной энергии камня при подъёме камня до высшей точки траектории. Ускорение свободного падения равно 10 м/с².

Задача 16.4. На тело массой 2 кг, находившееся в покое на поверхности Земли, в течение 1 с действовала сила 40 Н, направленная вертикально вверх. Чему равны работа этой силы, изменения потенциальной и кинетической энергии тела за 1 с? Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с².

Экспериментальное задание 16.2

Работаем в группе

Сравнение изменения потенциальной энергии с изменением кинетической энергии при движении тела по наклонной плоскости

Оборудование: наклонная плоскость, каретка, электронный секундомер с датчиками, измерительная линейка, весы с разновесом.

Определите экспериментально изменения потенциальной и кинетической энергии при движении тела по наклонной плоскости.

Порядок выполнения задания

1. Установите наклонную плоскость под углом около 45° к горизонтальной плоскости. Установите датчики секундомера у конца наклонной плоскости на расстоянии $\Delta s = 5$ см один от другого (рис. 16.6). Сделайте сброс показаний секундомера.

2. Поставьте каретку у верхнего края наклонной плоскости и отпустите её. Запишите показания секундомера. Повторите опыт 5 раз и вычислите среднее значение интервала времени Δt между моментами прохождения каретки мимо первого и второго датчиков. Разделив пройденный путь Δs на время движения Δt , вычислите среднюю скорость v каретки у конца наклонной плоскости.

3. Измерьте массу m каретки и вычислите кинетическую энергию каретки у конца наклонной плоскости.

4. Измерьте изменение высоты Δh каретки при движении по наклонной плоскости и вычислите изменение потенциальной энергии каретки.

5. Сравните изменения кинетической и потенциальной энергии каретки при движении по наклонной плоскости и объясните полученные результаты.



Рис. 16.6

Пример решения задачи

Задача. Ребёнок на санках скатывается по склону горы под углом 37° к горизонту из состояния покоя, затем санки движутся вверх по склону другой горы под таким же углом к горизонту. Какой путь пройдут санки по второму склону до остановки, если пройденный ими путь по первому склону равен 34 м, а коэффициент трения полозьев о снег равен 0,1? ($\sin 37^\circ \approx 0,6$, $\cos 37^\circ \approx 0,8$.)

Дано:

- $\alpha = 37^\circ$
- $s_1 = 34$ м
- $\mu = 0,1$
- $\sin 37^\circ \approx 0,6$
- $\cos 37^\circ \approx 0,8$

$s_2 = ?$

Решение

Так как в начале и в конце пути кинетическая энергия санок равна нулю, работа сил трения на двух склонах гор равна изменению потенциальной энергии санок: $A_1 + A_2 = E_{п1} - E_{п2}$.

Используя рисунок 16.7, найдём выражение для силы трения:

$$F_{тр1} = F_{тр2} = \mu N = \mu mg \cos \alpha.$$

Выразим работу и потенциальную энергию через пройденные санками пути (рис. 16.8):

$$F_{тр1} \cdot s_1 + F_{тр2} \cdot s_2 = mgh_1 - mgh_2,$$

$$\mu mg \cos \alpha \cdot s_1 + \mu mg \cos \alpha \cdot s_2 = mgs_1 \cdot \sin \alpha - mgs_2 \cdot \sin \alpha.$$

Отсюда $s_2 = \frac{s_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{\sin \alpha + \mu \cos \alpha} \approx \frac{34(0,6 - 0,1 \cdot 0,8)}{0,6 + 0,1 \cdot 0,8}$ м ≈ 26 м.

Ответ: $s_2 \approx 26$ м.

Решите эту задачу для случая $\alpha = 53^\circ$, $\mu = 0,05$, $s_1 = 30$ м.

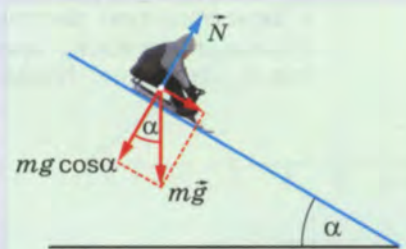


Рис. 16.7

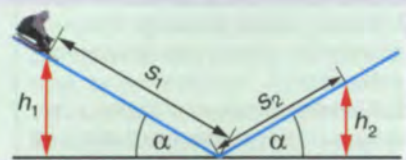


Рис. 16.8

§ 17. Потенциальная энергия при упругой деформации тел

Энергия при упругой деформации пружины. Упругими деформациями тел называются такие изменения формы и размеров тел под действием внешних сил, после которых с прекращением действия внешних сил тела самопроизвольно полностью восстанавливают свою первоначальную форму и размеры.

В опытах с растянутой пружиной динамометра (см. рис. 14.3) мы наблюдали, как взаимодействия частей растянутой пружины вызывают ускорение тела. При восстановлении своей первоначальной формы пружина сжималась и действовала на шар силой упругости. В результате этого взаимодействия потенциальная энергия упруго деформированных частей одного тела превращалась в кинетическую энергию поступательного движения другого тела.

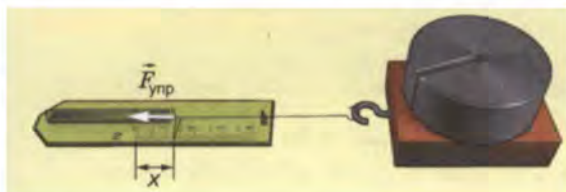


Рис. 17.1

При растяжении пружины возникает сила упругости $F_{\text{упр}}$ (рис. 17.1), по закону Гука равная по модулю произведению коэффициента k , называемого жёсткостью пружины, на удлинение x пружины:

$$F_{\text{упр}} = kx. \quad (17.1)$$

Если удлинение растянутой пружины в результате действия сил упругости между её частями уменьшается от x до 0, то пружина действует на тело, соединённое с её концом, силой упругости, уменьшающейся по закону (17.1)

от $F_1 = kx$ до $F_2 = 0$. Среднее значение такой силы упругости равно:

$$F_{\text{ср}} = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{kx + 0}{2} = \frac{kx}{2}. \quad (17.2)$$

Работа силы упругости на пути x положительна и равна:

$$A = F_{\text{ср}} x = \frac{kx^2}{2}. \quad (17.3)$$

Потенциальная энергия упруго деформированной пружины равна работе сил упругости при переходе в недеформированное состояние:

$$E_{\text{п}} = A, \quad E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}. \quad (17.4)$$

Энергия упруго деформированных тел широко применяется для преобразования в кинетическую энергию. С помощью деформированного лука запускается стрела, стальные пружины вращают стрелки часов, приводят в движение бойки пистолетов и автоматов, подают и выбрасывают патроны, запирают автоматически двери.

Экспериментальное задание 17.1

Работаем самостоятельно

Измерение потенциальной энергии упруго деформированной пружины

Оборудование: динамометр, деревянный брусок, измерительная линейка, нить.

Осуществите превращение потенциальной энергии упруго деформированной пружины в кинетическую энергию движения деревянного бруска и определите эту энергию путём измерения тормозного пути. Сравните полученное значение кинетической энергии бруска с расчётным значением потенциальной энергии упруго деформированной пружины.

Вопросы

1. Что такое деформация тел?
2. Какие деформации тел называются упругими деформациями?
3. Какими опытами можно доказать, что потенциальная энергия упруго деформированного тела пропорциональна квадрату деформации?

Порядок выполнения задания

1. Измерьте удлинение x пружины при значении силы упругости 4 Н и вычислите жёсткость k пружины:

$$k = \frac{F}{x}$$

2. Вычислите потенциальную энергию упруго деформированной пружины при её растяжении на длину x :

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$$

3. Установите деревянный брусок на столе, прикрепите к нему через нить динамометр. Удерживая брусок, растяните пружину динамометра до значения силы упругости 4 Н (рис. 17.2).

Удерживая динамометр, отпустите брусок. Измерьте расстояние s , пройденное бруском до остановки (рис. 17.3). Опыт повторите 5 раз и найдите среднее значение пути $s_{\text{ср}}$.

4. Измерьте силу трения $F_{\text{тр}}$ при равномерном движении бруска по столу (рис. 17.4) и вычислите работу этой силы на тормозном пути s бруска: $A = F_{\text{тр}}s_{\text{ср}}$.

Эта работа равна изменению кинетической энергии бруска от момента начала торможения до остановки или кинетической энергии бруска в начале тормозного пути: $A = \Delta E_{\text{к}} = E_{\text{к}}$.

5. Сравните значение кинетической энергии бруска в начале тормозного пути со значением потенциальной энергии при деформации пружины. Объясните полученный результат.

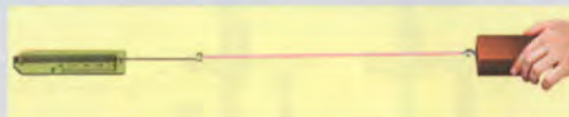


Рис. 17.2

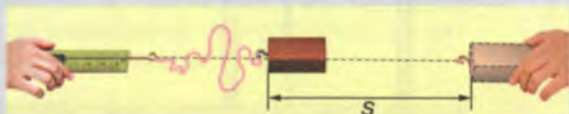


Рис. 17.3

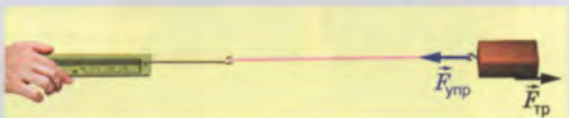


Рис. 17.4

Задача 17.1. Пружину динамометра жёсткостью 6 Н/м растянули на 10 см. Вычислите потенциальную энергию упруго деформированной пружины.

Задача 17.2. Под действием силы 40 Н пружина растянулась на 8 см. Чему равны работа по растяжению пружины и её потенциальная энергия?

Задача 17.3. Для сжатия пружины на 5 см требуется приложить внешнюю силу 100 Н. Какую работу необходимо совершить для сжатия этой пружины на 2 см? Какой потенциальной энергией обладает эта пружина при сжатии на 4 см?

Задача 17.4. Как изменяется потенциальная энергия упруго деформированной пружины при увеличении её длины в 2 раза?

Задача 17.5. При растяжении на 5 см упруго деформированная стальная пружина обладает потенциальной энергией 10 Дж. Какой потенциальной энергией обладает эта пружина при растяжении на 2 см?

Задача 17.6. На рисунке 17.5 представлен график зависимости силы упругости пружины от её удлинения. Чему равна потенциальная энергия этой пружины при растяжении на 10 см?

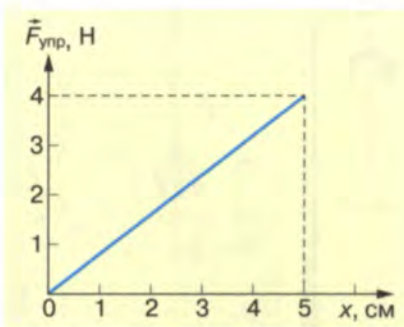


Рис. 17.5

? **Вопросы**

1. Как связаны между собой работа силы трения и изменение кинетической энергии тела под действием этой силы?
2. Какие превращения энергии происходят при движении бруска от момента начала движения до остановки?

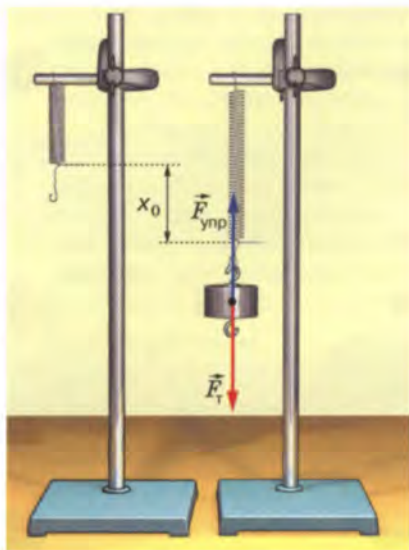


Рис. 17.6

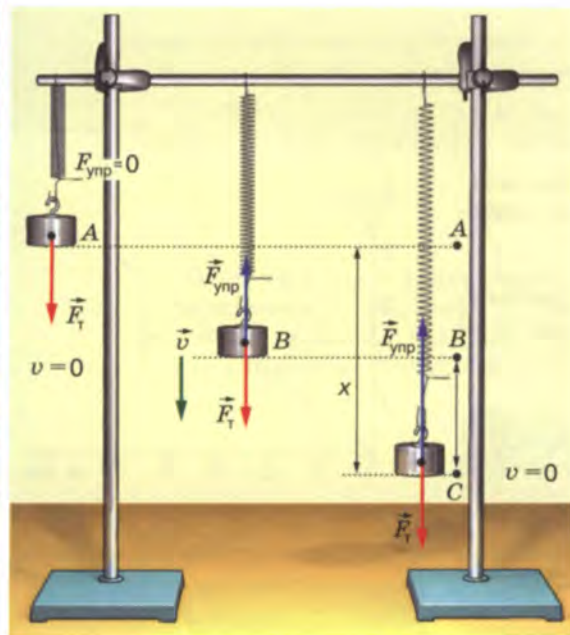


Рис. 17.7

Из выражения (17.7) находим скорость тела в точке B:

$$v = \sqrt{gx_0}. \quad (17.8)$$

Движение вниз будет продолжаться до тех пор, пока работа сил упругости не станет равной изменению потенциальной энергии при упругой деформации. Обозначим расстояние между крайними точками A и C буквой x , запишем усло-

Превращения потенциальной и кинетической энергии при колебаниях груза на пружине. Тело массой m , подвешенное на стальной пружине, находится в равновесии под действием силы тяжести F_T и противоположно направленной силы упругости $F_{\text{упр}}$ при условии равенства этих сил по модулю (рис. 17.6):

$$F_{\text{упр}} = F_T, \quad kx_0 = mg, \quad (17.5)$$

где x_0 — деформация пружины в положении равновесия.

Если это тело подвесить к недеформированной пружине в точке A и сразу отпустить, оно будет падать вниз до положения равновесия с возрастающей скоростью. Равнодействующая силы тяжести и силы упругости направлена вниз, но убывает по модулю по мере приближения к положению равновесия. После прохождения по инерции положения равновесия сила упругости становится больше силы тяжести и равнодействующая направлена вверх.

Найдём расстояние BC от положения равновесия в точке B до точки C, в которой скорость тела уменьшается до нуля и оно начинает движение вверх (рис. 17.7). Для этого определим скорость v_0 тела в момент прохождения положения равновесия.

При движении тела от точки A до точки равновесия B сила тяжести, направленная параллельно вектору скорости, совершает положительную работу $A_T = mgx_0$. При этом направленная противоположно вектору скорости сила упругости совершает отрицательную работу, равную по модулю изменению потенциальной энергии упруго деформированной пружины:

$$A_{\text{упр}} = -\frac{kx_0^2}{2}.$$

Работа равнодействующей этих двух сил равна кинетической энергии тела в момент прохождения положения равновесия: $A_T + A_{\text{упр}} = \Delta E_k$,

$$mgx_0 - \frac{kx_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2}. \quad (17.6)$$

Из условия равновесия (17.5) находим жёсткость k пружины: $k = \frac{mg}{x_0}$ — и подставляем в выражение (17.6):

$$mgx_0 - \frac{mgx_0^2}{2x_0} = \frac{mgx_0}{2} = \frac{mv^2}{2}. \quad (17.7)$$

вие равенства работы силы упругости и изменения потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тела (см. рис. 17.7):

$$A_{\text{упр}} = E_C - E_A, \quad -\frac{kx^2}{2} = -mgx - 0, \quad x = \frac{2mg}{k} = \frac{2mgx_0}{mg} = 2x_0.$$

Так как $AC = 2x_0$ и $AB = x_0$, то $BC = x_0$. Следовательно, тело опускается ниже точки равновесия ровно настолько, насколько оно было выше этой точки при начале движения вниз. Далее равнодействующая силы тяжести и силы упругости заставляет тело двигаться вверх до точки равновесия B , затем тело по инерции движется вверх до точки A . На этом один период колебаний завершается, начинается следующий, и далее процесс периодически повторяется.

? Вопрос

Почему груз, подвешенный на предварительно нерастянутую пружину, продолжает движение вниз после достижения положения равновесия, в котором сила тяжести равна по модулю силе упругости и направлена противоположно?

● Экспериментальное задание 17.2

Работаем самостоятельно

Исследование колебаний груза на пружине

Оборудование: пружина, груз, измерительная линейка, секундомер.

Теоретическое решение задачи о колебаниях тела массой m на пружине жёсткостью k даёт следующую формулу для вычисления периода колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (17.9)$$

Исследуйте зависимость периода колебаний груза на пружине от массы груза, жёсткости пружины и амплитуды колебаний. Сравните результаты расчёта и эксперимента.

Порядок выполнения задания

1. Измерьте длину пружины без груза. Подвесьте на пружину груз массой 400 г и измерьте длину пружины в положении равновесия. Найдите удлинение x_0 пружины под действием силы тяжести груза и вычислите жёсткость пружины k .
2. Вычислите период свободных колебаний груза массой 400 г на этой пружине по формуле (17.9).
3. Оттяните груз на пружине вниз от положения равновесия на 5 см, отпустите его и измерьте период свободных колебаний. Сравните результаты расчёта и эксперимента.
4. Повторите расчёты и измерения для груза массой 100 г.
5. Замените пружину и повторите расчёты и измерения периода колебаний.
6. Исследуйте, зависит ли период свободных колебаний груза на пружине от амплитуды колебаний.

● Экспериментальное задание 17.3

Работаем самостоятельно

Исследование колебаний груза на двух пружинах

Оборудование: две одинаковые пружины, груз, измерительная линейка, секундомер.

Рассчитайте период колебаний груза, подвешенного на двух одинаковых пружинах, соединённых последовательно. Расчёты проверьте экспериментально. Повторите расчёты и измерения для параллельно соединённых пружин.

§ 18. Закон сохранения механической энергии

Связь между изменениями потенциальной и кинетической энергии. При действии только силы тяжести изменение кинетической энергии тела равно работе гравитационных сил: $\Delta E_k = A_T$.

При этом изменение потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел равно работе гравитационных сил, взятой с противоположным знаком: $\Delta E_n = -A_T$.

Отсюда следует, что сумма изменений потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел и кинетической энергии под действием только гравитационных сил равна нулю:

$$\Delta E_n + \Delta E_k = 0. \quad (18.1)$$

Изменение кинетической энергии при действии только гравитационных сил в любой момент времени равно изменению потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел, взятому с противоположным знаком:

$$\Delta E_k = -\Delta E_n. \quad (18.2)$$

Поэтому изменения потенциальной и кинетической энергии тел при гравитационных взаимодействиях можно рассматривать как процессы взаимных превращений потенциальной и кинетической энергии тел.

Закон сохранения полной механической энергии. Сумма потенциальной и кинетической энергии тел, взаимодействующих только гравитационными силами, называется **полной механической энергией** E :

$$E = E_n + E_k. \quad (18.3)$$

В системе тел, взаимодействующих только гравитационными силами, полная механическая энергия E не изменяется:

$$E = \text{const}. \quad (18.4)$$

Этот экспериментально установленный факт называется **законом сохранения полной механической энергии**. Закон сохранения полной механической энергии является одним из основных законов механики.

Условия, при которых выполняется закон сохранения полной механической энергии. Во-первых, как все законы механики, он выполняется только в инерциальных системах отсчёта. Во-вторых, он выполняется только при взаимодействиях тел гравитационными или электростатическими силами.

К этим двум силам можно добавить ещё силы упругости, но это добавление оправдано только в случае действия идеальных сил упругости. Любые реальные тела не являются идеально упругими.

Взаимные превращения потенциальной энергии упругой деформации и кинетической энергии при взаимодействиях тел сопровождаются превращением части механической энергии во внутреннюю энергию тел. Поэтому амплитуда колебаний груза на пружине постепенно уменьшается и со временем механические колебания прекращаются.

На основе использования закона сохранения полной механической энергии оказывается возможно определить скорости и координаты тел после взаимодействия без расчётов действующих сил и ускорений.

? Вопросы

1. Что называется полной механической энергией?
2. При каких условиях выполняется закон сохранения механической энергии?

Пример решения задачи

Задача. В аттракционе тележка с пассажирами скатывается по наклонной плоскости и движется в вертикальном кольце радиусом 6 м. Какой должна быть высота наклонной плоскости для успешного прохождения тележкой верхней точки траектории в кольце? Силы трения считайте пренебрежимо малыми.

Решение

При прохождении верхней точки траектории в кольце скорость v тележки должна быть не меньше той скорости, при которой центростремительное ускорение равно ускорению свободного падения (рис. 18.1):

$$\frac{v^2}{R} = g, \quad v^2 = gR.$$

Применив закон сохранения механической энергии к начальному и конечному состояниям, получим

$$\Delta E_{\text{п}} + \Delta E_{\text{к}} = 0, \quad mg(H-2R) = \frac{mv^2}{2}, \quad v^2 = 2g(H-2R); \quad gR = 2g(H-2R), \quad H = \frac{5}{2}R = 15 \text{ м.}$$

Ответ: $H = 15 \text{ м.}$

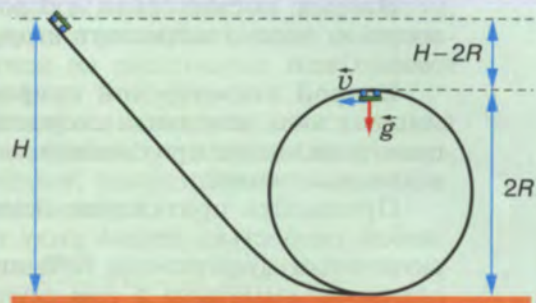


Рис. 18.1

Экспериментальное задание 18.1

Работаем в паре

Исследование превращений механической энергии

Оборудование: штатив, динамометр, нить, груз массой 100 г, измерительная линейка.

Рассчитайте, на какую высоту h поднимется груз массой 100 г под действием пружины динамометра, растянутой на 7,5 см. Результат расчёта проверьте экспериментально.

Содержание работы

По закону сохранения энергии изменение потенциальной энергии упруго деформированной пружины равно по модулю изменению потенциальной энергии при подъёме груза:

$$\frac{kx^2}{2} = mgh.$$

Отсюда высота h подъёма груза равна $h = \frac{kx^2}{2mg}$.

Порядок выполнения задания

1. Подвесьте груз на пружину. Измерьте деформацию x_0 пружины в положении равновесия (рис. 18.2). Определите жёсткость k пружины, разделив силу тяжести mg груза на деформацию x_0 пружины в положении равновесия под действием силы тяжести: $mg = kx_0, \quad k = \frac{mg}{x_0}$.

2. Используя найденное значение жёсткости k пружины, вычислите значение высоты h подъёма груза:

$$h = \frac{kx^2}{2mg} = \frac{mgx^2}{2mgx_0} = \frac{x^2}{2x_0} \approx \frac{56}{2x_0} \text{ см.}$$

3. Закрепите динамометр на штативе на таком расстоянии над столом, чтобы при подвешивании груза и растяжении пружины на $x = 7,5 \text{ см}$ груз касался поверхности стола (рис. 18.3). Закрепите линейку на высоте h расчётного значения от верхней поверхности груза, касающегося поверхности стола. Подвесьте груз на пружину, оттяните груз до стола и отпустите. Заметьте, совпадает ли максимальная высота подъёма груза с расчётным значением h , отмеченным линейкой.

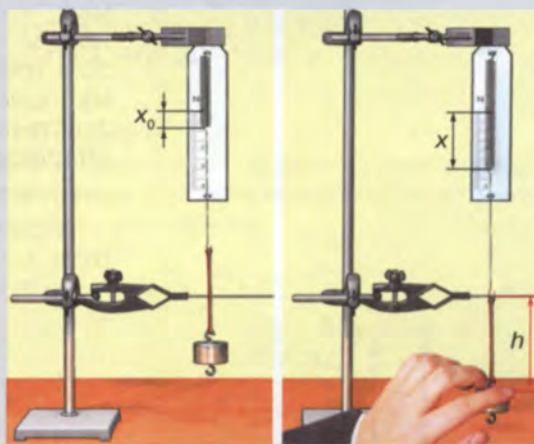


Рис. 18.2

Рис. 18.3

? Вопрос

В чём смысл закона сохранения механической энергии, если механическая энергия в разных системах отсчёта имеет разные значения?

Вторая космическая скорость. Используя закон сохранения механической энергии, можно вычислить вторую космическую скорость для Земли и других небесных тел.

Второй космической скоростью для любой планеты или звезды называется минимальная начальная скорость тела, достаточная для преодоления действия сил гравитационного притяжения этой планеты и удаления от неё на бесконечно далёкое расстояние.

Преодолеть притяжение Земли космический корабль может при движении с любой скоростью, создав силу тяги, равную силе тяготения. Однако затраты горючего оказываются тем большими, чем меньше скорость движения. Затраты горючего минимальны в том случае, если кораблю за очень короткое время сообщается начальная скорость, достаточная для преодоления действия сил тяготения в процессе дальнейшего движения по инерции. Вторая космическая скорость — это скорость, необходимая для преодоления земного тяготения при выключенных двигателях.

При удалении космического корабля из некоторой точки, находящейся на расстоянии R от центра небесного тела, до бесконечности по закону сохранения полной механической энергии сумма изменений его потенциальной и кинетической энергии равна нулю. Поэтому космическая ракета должна сообщить кораблю такую начальную скорость, при которой начальная кинетическая энергия $E_{к0}$ корабля равна изменению потенциальной энергии корабля ΔE_n при его удалении на бесконечность от Земли: $E_{к0} = \Delta E_n$.

Изменение потенциальной энергии взаимодействия тел силами тяготения равно работе внешних сил против действия сил тяготения: $\Delta E_n = A$.

При расчёте работы нужно учитывать, что сила всемирного тяготения зависит от расстояния между телами. Примем, что при перемещении тела на очень малое расстояние $\Delta r = r_1 - r_2$ вдоль прямой, соединяющей тяготеющие тела (рис. 18.4), сила тяготения постоянна и равна среднему пропорциональному из двух крайних значений сил, действующих на расстояниях r_1 и r_2 . (Средним пропорциональным двух чисел a и b называется число x , равное $x = \sqrt{ab}$, $x^2 = ab$.)

При таком предположении значение силы тяготения на пути между точками 1 и 2 равно:

$$F = G \frac{mM}{r^2} \approx G \frac{mM}{r_1 r_2}.$$

Работа этой силы на пути Δr равна:

$$\Delta A = F \cdot \Delta r = F(r_1 - r_2) = G \frac{mM}{r_1 r_2} (r_1 - r_2) = G \frac{mM}{r_2} - G \frac{mM}{r_1}.$$

Вычислим работу на всех малых участках пути от поверхности Земли до бесконечности, обозначаемой символом ∞ , и сложим эти работы. Все слагаемые, кроме двух крайних, взаимно уничтожатся, и мы получим

$$A = \sum \Delta A = G \frac{mM}{\infty} - G \frac{mM}{R} = -G \frac{mM}{R}.$$

При выборе равной нулю потенциальной энергии взаимодействия тел на бесконечно далёком расстоянии потенциальная энергия тела массой m на расстоянии R от центра Земли массой M равна работе A :

$$E_{nR} = -G \frac{mM}{R}.$$

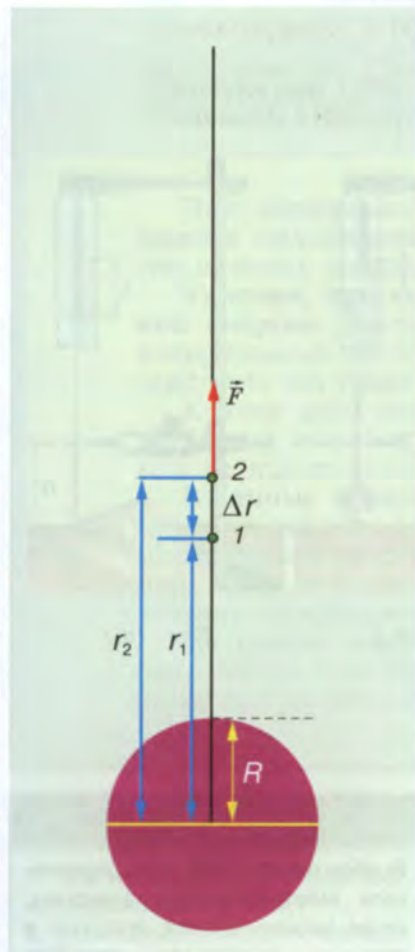


Рис. 18.4

Этот результат, полученный упрощённым способом, совпадает с результатом, получаемым более строгими способами. Он позволяет рассчитать вторую космическую скорость v_{II} для любого тела, находящегося на расстоянии R от центра небесного тела массой M .

Для преодоления действия сил тяготения начальное значение кинетической энергии $E_{к0}$ тела массой m должно быть равно изменению потенциальной энергии тела при перемещении из начального положения, находящегося на расстоянии R от поверхности тела массой M , до бесконечности:

$$E_{к0} = \Delta E_{п} = (E_{п\infty} - E_{пR}) = 0 + G \frac{mM}{R} = G \frac{mM}{R}; \quad \frac{mv_2^2}{2} = G \frac{mM}{R}, \quad v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Сравним полученное выражение для второй космической скорости v_{II} с ранее полученным выражением (12.9) для первой космической скорости v_I :

$$v_I = \sqrt{G \frac{M}{r}}.$$

Получим связь между ними: $v_{II} = \sqrt{2}v_I$.

Для Земли значение второй космической скорости равно:

$$v_{II} \approx \sqrt{2} \cdot 7,9 \text{ км/с} \approx 11,2 \text{ км/с}.$$

Пример решения задачи

Задача. Для определения скорости пули массой 9 г был произведён выстрел в деревянный брусок массой 4,5 кг, подвешенный на шнурах длиной по 2 м (рис. 18.5). Пуля застряла в бруске, подвес отклонился максимально на угол 20° . Чему равна скорость пули?

Дано:

$m = 9 \text{ г} = 0,009 \text{ кг}$
 $M = 4,5 \text{ кг}$
 $l = 2 \text{ м}$
 $\alpha = 20^\circ$

 $v_0 - ?$

Решение

Начальную скорость v бруска и пули после соединения можно выразить через начальную скорость v_0 пули до столкновения, применив закон сохранения импульса к системе пуля—брусок:

$$mv_0 = (M+m)v, \quad v_0 = \frac{M+m}{m}v. \quad (1)$$

Для бруска с остановившейся пулей выполняется закон сохранения механической энергии в положениях начала совместного движения бруска с пулей и при максимальном отклонении:

$$E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}, \quad 0 + \frac{(M+m)v^2}{2} = (M+m)gh + 0.$$

Отсюда получаем $v = \sqrt{2gh}$.

Подставляя полученную скорость в выражение (1) с учётом того, что $h = l - l\cos\alpha = l(1 - \cos\alpha)$ (см. рис. 18.5), находим скорость пули v_0 :

$$v_0 = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos\alpha)}, \quad v_0 \approx 775 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v_0 \approx 775 \text{ м/с}$.

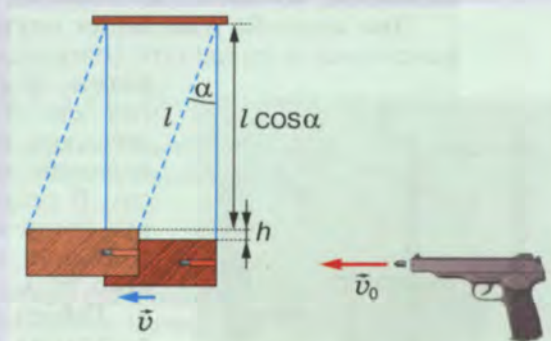


Рис. 18.5

§ 19. Закон сохранения энергии в тепловых процессах



Рис. 19.1



Рис. 19.2

Работа и количество теплоты. До середины XIX в. механические и тепловые явления рассматривались в физике как принципиально различные. Количественной мерой механического движения тел была работа A , определяемая как произведение модуля силы F на путь s , пройденный в направлении вектора силы: $A = Fs$.

Мерой теплового движения было количество теплоты Q , равное произведению массы m тела на изменение его температуры Δt и постоянный коэффициент c , называемый удельной теплоёмкостью вещества: $Q = cm\Delta t$.

До второй половины XIX в. между работой и количеством теплоты не было найдено определённой взаимной связи, несмотря на то что во многих физических явлениях происходит изменение температуры тел при совершении механической работы. Так, при торможении автомобиля в результате работы силы трения повышается температура тормозных дисков и шин, т. е. кинетическая энергия автомобиля превращается во внутреннюю энергию теплового движения атомов вещества. Это с одной стороны.

С другой стороны, передача телу количества теплоты путём нагревания может привести к совершению им механической работы. Так, нагревание солнечным излучением воды в экваториальных областях Мирового океана приводит к возникновению ветров и морских течений. Движущийся со скоростью до 300 км/ч воздух в мощном тропическом циклоне обладает кинетической энергией, в сотни тысяч раз превышающей энергию взрыва атомной бомбы.

На рисунке 19.1 представлен вид из космоса на тропический ураган «Катрина» 2005 г., на рисунке 19.2 — его вид с Земли.

Механический эквивалент теплоты. Английский учёный Джеймс Джоуль в 1843 г. выполнил опыты с калориметром, в котором с помощью вращающихся лопастей перемешивалась вода (рис. 19.3). Он обнаружил, что в результате механической работы температура воды повышалась. В этих опытах Джоуль определил соотношение между совершённой работой, выраженной в джоулях, и изменением внутренней энергии тела, найденным по изменению температуры, выраженному в калориях. Это соотношение было названо **механическим эквивалентом теплоты**. Количество теплоты 1 кал эквивалентно работе 4,2 Дж.

Два способа изменения внутренней энергии. Внутренняя энергия тела может изменяться в результате совершения механической работы над телом или теплопередачи от других тел.

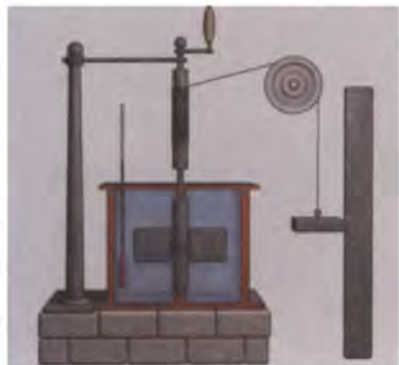


Рис. 19.3

Работа A служит мерой передачи энергии или её превращения из одной формы в другую в механических процессах. Количество теплоты Q служит мерой передачи энергии путём теплопередачи в тепловых процессах. В результате взаимодействий отдельных атомов и молекул часть кинетической энергии беспорядочного теплового движения частиц горячего тела передаётся частицам холодного тела.

Работа и количество теплоты не являются параметрами состояния тела. Не имеет смысла вопрос о том, сколько в этом теле работы или какое в нём количество теплоты. Состояние тела характеризуется запасом его внутренней энергии. Работа и количество теплоты являются лишь характеристиками процессов, сопровождающихся изменением энергии тела.

Закон сохранения и превращения энергии. Наблюдениями и физическими экспериментами установлено, что

при любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только передаётся от одного тела к другому или превращается из одной формы в другую.

Этот экспериментально установленный факт называется **законом сохранения и превращения энергии**.

Закон сохранения и превращения энергии является одним из самых общих законов природы. Изменение внутренней энергии ΔU тела всегда равно сумме количества теплоты Q , полученного телом в результате теплопередачи от других тел, и работы A' , совершённой над телом внешними силами:

$$\Delta U = Q + A'. \quad (19.1)$$

Уравнение (19.1) является математическим выражением закона сохранения и превращения энергии.

Раздел физики, изучающий тепловые явления, называется термодинамикой. Закон сохранения и превращения энергии с участием процессов теплопередачи (19.1) называют **первым законом термодинамики**.

Если тело получает количество теплоты Q в результате теплопередачи от других тел и совершает работу A над внешними телами, первый закон термодинамики имеет следующий вид:

$$\Delta U = Q - A. \quad (19.2)$$

При совершении работы внутренняя энергия тела убывает, поэтому работа A в этом случае имеет знак «минус».

Пример решения задачи

Задача. Теплопередача от нагретой солнечным излучением земной поверхности привела к повышению температуры воздуха в приземном слое на 10°C . Тёплый воздух расширился и стал подниматься вверх, атмосферное давление над местом с пониженной плотностью воздуха уменьшилось. Из-за различия атмосферного давления над разными участками земной поверхности возник ветер.

Оцените, какой может быть скорость ветра, если предположить, что в таком процессе в механическую энергию ветра может преобразоваться 20 % внутренней энергии.

Удельная теплоёмкость воздуха при нормальном атмосферном давлении равна примерно $1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Решение

Так как кинетическая энергия воздуха массой m , движущегося со скоростью v , равна 20% количества теплоты, полученного этим воздухом, выполняется равенство

$$\frac{mv^2}{2} = 0,2 c m \Delta t.$$

Отсюда скорость v ветра равна $v = \sqrt{0,4 c \Delta t} = \sqrt{0,4 \cdot 1000 \cdot 10} \approx 63 \text{ м/с} \approx 228 \text{ км/ч}$.

Мы получили, что преобразование всего 20 % внутренней энергии воздуха, полученной при нагревании на 10°C , может привести к возникновению ураганного ветра со скоростью гоночного автомобиля.

Задача 19.1. Свинцовая пуля при ударе о броню танка расплавилась. Чему равно минимальное значение скорости пули? Удельная теплоёмкость свинца $130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, удельная теплота плавления свинца 25 кДж/кг , температура плавления свинца 327°C , начальная температура пули 27°C .

Задача 19.2. Чему равна минимальная высота водопада, при которой в принципе возможно было бы превращение падающей воды в пар за счёт превращения кинетической энергии воды во внутреннюю энергию? Удельная теплоёмкость воды $4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, удельная теплота парообразования воды 2256 кДж/кг . Температура воды 25°C .

КПД теплового двигателя. **Тепловым двигателем** называется машина, совершающая механическую работу за счёт использования внутренней энергии топлива. Важной характеристикой теплового двигателя является его **коэффициент полезного действия** (КПД).

КПД теплового двигателя определяется как отношение совершённой им полезной работы A к затраченному количеству теплоты Q :

$$\eta = \frac{A}{Q}.$$

КПД тепловых машин стало возможным измерять после определения механического эквивалента теплоты. КПД двигателей первых паровозов составлял всего 2–4%, даже у паровозов XX в. он был лишь около 10%. Все попытки инженеров и изобретателей повысить КПД паровых машин путём улучшения их конструкции, уменьшения влияния сил трения не приводили к существенному уменьшению бесполезных потерь.

Главная причина низкого КПД паровых машин связана с особенностями превращений энергии с участием процессов теплопередачи. Этот факт был установлен в физике после открытия основных законов термодинамики.

Оказалось, что любые виды энергии, кроме энергии беспорядочного теплового движения частиц вещества, могут превращаться друг в друга полностью, на 100%. Но полное превращение энергии беспорядочного теплового движения частиц вещества в энергию механического движения тел или в электрическую энергию оказывается невозможным.

Особенность энергии беспорядочного теплового движения частиц вещества заключается в том, что в неживой природе сами собой, без внешнего воздействия обычно происходят только процессы превращения упорядоченного движения в беспорядочное, беспорядочное движение самопроизвольно не превращается в упорядоченное.



Рис. 19.4

Случайно можно уронить тарелки, и они разобьются на множество осколков. Закону сохранения энергии не противоречило бы такое явление, которое можно наблюдать при прокручивании киноплёнки в обратном направлении: все осколки собираются сами собой в целые тарелки и подпрыгивают с пола в руки неудачника (рис. 19.4). Но бесполезно надеяться, что такое явление случится на самом деле. Природа устроена иначе.

При падении пластилинового шара на пол кинетическая энергия его механического движения превращается в беспорядочное тепловое движение частиц вещества. Количество этой энергии такое же, но нет способа собрать всю эту энергию и вернуть пластилиновому шару так, чтобы он полетел вверх с такой скоростью, с какой подлетал к полу.

Измерения кинетической энергии автомобиля показывают, что двигатель превращает в механическую энергию лишь 30–40% энергии, освобождённой при сжигании топлива, а 60–70% этой энергии бесполезно выбрасывает в атмосферу. Если полное превращение энергии беспорядочного теплового движения в энергию механического движения в принципе невозможно, то нужно найти способы достижения этой проблемы было найдено в 1824 г. французским инженером Сади Карно.

Исходя из принципа невозможности вечного двигателя, Карно доказал, что для получения работы тепловой машине необходимо иметь два тела с различными температурами — *нагреватель* и *холодильник*. Холодильник в машине так же необходим, как и нагреватель. Обычно роль холодильника для большинства тепловых машин играет окружающая среда. КПД тепловой машины повышается при увеличении разности температур нагревателя и холодильника.

Низкие значения КПД первых паровых машин объясняются малыми значениями разности температур применявшихся в них нагревателей и «холодильника» — земной атмосферы. В современных паротурбинных установках температура пара достигает 580 °С. Это позволяет получить значения КПД паротурбинной установки около 40%. В двигателях внутреннего сгорания температура нагревателя достигает от 500 до 1500 °С. Это позволяет повысить их КПД.

Так как для получения работы тепловой машине необходимо иметь два тела с различными температурами — нагреватель и холодильник, то оказываются неосуществимыми все проекты вечных двигателей второго рода. Так называют проекты машин, предполагающих отбор энергии путём теплопередачи от какого-то большого нагревателя без использования холодильника. Заманчиво, например, просто отбирать энергию Мирового океана и использовать её для любых нужд. При громадной массе воды в Океане годовые потребности человечества могли бы быть удовлетворены при охлаждении Океана на сотую долю процента. Но теплопередача от Океана сама собой может произойти только более холодному телу. Нужен ещё один, более холодный Океан.

Вечный двигатель. Создать машину, которая не просто помогала бы человеку, а работала вместо него, очень хотелось многим поколениям изобретателей. Такую идеальную машину они называли вечным двигателем. Но усилия изобретателей вечного двигателя за прошедшие столетия оказались безрезультатными. Великий итальянский изобретатель и художник Леонардо да Винчи в течение нескольких лет пытался создать непрерывно работающий двигатель, улучшая известные конструкции и изобретая новые. Одна из них, в форме колеса с откидывающимися грузами, была разработана в 1487 г. В результате он сформулировал принцип невозможности создания вечного двигателя: «Я пришёл к выводу о невозможности нахождения непрерывного движения, а также вечного колеса. Поиск конструкции вечного колеса — источника вечного движения — можно назвать одним из наиболее бессмысленных заблуждений человека».

Но и сегодня есть люди, пытающиеся изобрести машины, действующие вопреки известным законам физики. Их называют изобретателями вечного двигателя.

Из закона сохранения и превращения энергии (19.2) следует:

$$A = Q - \Delta U.$$

Это выражение показывает, что тело может совершить положительную работу за счёт получения некоторого количества теплоты от внешних тел или за счёт уменьшения своей внутренней энергии. Совершение работы каким-либо устройством без теплопередачи от других тел и без изменения внутренней энергии невозможно. Главным доказательством утверждения о невозможности построения такой машины является экспериментальный факт безуспешности всех попыток построения вечного двигателя.



Леонардо да Винчи



Творческое задание

Экспериментально установлено, что при постоянном давлении нагревание воздуха на 1 °С приводит к увеличению его объёма на 0,366% от объёма при 0 °С. Удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении 101325 Па равна $c_p = 240$ кал/(кг · °С). В процессе нагревания при постоянном объёме удельная теплоёмкость воздуха равна $c_v = 171$ кал/(кг · °С).

По этим данным вычислите значение механического эквивалента теплоты.

Паровая турбина. Первыми машинами для преобразования энергии сжигаемого топлива в энергию механического движения были паровые машины. Расширяющийся нагретый пар приводил в действие водяные насосы, паровые автомобили, пароходы, паровозы. Теперь почти всюду паровые машины вытеснены двигателями внутреннего сгорания. Но одну работу паровые машины и сегодня выполняют лучше других тепловых машин: электрические генераторы тепловых и атомных электростанций приводятся в действие **паровыми турбинами**.

Паровая турбина имеет радиально расположенные пластины, похожие на лопасти вентилятора. Струя пара давит на пластину и передаёт ей часть своей кинетической энергии (рис. 20.1). Турбина начинает вращаться, под струю пара подходит следующая пластина и т. д.

Скорость струи горячего водяного пара может превышать 1000 м/с. При такой скорости лопастей вращающаяся турбина была бы разрушена силами инерции. Поэтому турбины вращаются значительно медленнее, а для отбора всей кинетической энергии струи пара на турбине устанавливается несколько рядов лопастей возрастающего диаметра на общем валу (рис. 20.2).

После взаимодействия с первым рядом лопастей пар направляется на второй ряд лопастей большего диаметра, отдавая часть оставшейся кинетической энергии, и т. д. На современных паровых турбинах более 90% кинетической энергии струи пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора турбины и электрогенератора.

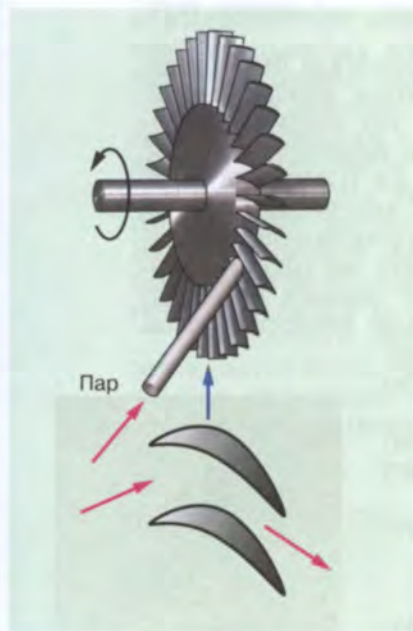


Рис. 20.1

Принцип действия карбюраторного двигателя внутреннего сгорания. Большинство современных тепловых двигателей являются двигателями внутреннего сгорания. Так они называются потому, что в них топливо сжигается внутри нагреваемого воздуха, тогда как в паровых машинах вода и пар нагреваются в котлах, нагреваемых снаружи.

Рассмотрим принцип действия четырёхтактного карбюраторного двигателя внутреннего сгорания. Внутри цилиндра двигателя находится поршень, соединённый шатуном с коленчатым валом. Цикл работы двигателя совершается за четыре интервала времени, называемые **тактами**.

Во время движения поршня вниз, происходящего в результате вращения коленчатого вала, давление внутри цилиндра понижается. В это время устройство, называемое **карбюратором**, распыляет порцию жидкого топлива, смешивает его с воздухом. При открывании впускного клапана горючая смесь засасывается в цилиндр (рис. 20.3, впуск). Затем впускной клапан закрывается.

Под действием коленчатого вала поршень движется вверх и сжимает горючую смесь (рис. 20.3, сжатие). В момент достижения поршнем верхней точки горючая смесь зажигается электрической искрой. Воздух нагревается до высокой температуры и в результате возрастания давления толкает поршень вниз (рис. 20.3, рабочий ход). Движущийся вниз поршень вращает коленчатый вал. После прохождения поршнем нижней точки в цилиндре открывается выпускной клапан, и при движении вверх поршень выталки-



Рис. 20.2

вает продукты сгорания топлива в атмосферу (рис. 20.3, выпуск). Все такты работы двигателя периодически повторяются. Вращение коленчатого вала через систему передач вызывает вращение ведущих колёс транспортного средства.

В двигателе с четырьмя цилиндрами в каждый момент времени происходит расширение нагретого воздуха в одном из четырёх цилиндров. Это обеспечивает постоянную силу тяги двигателя.

Двигатель Дизеля. Немецкий инженер Рудольф Дизель в 1892 г. разработал новый тип двигателя внутреннего сгорания. Этот двигатель теперь называют именем его изобретателя. В дизельном двигателе нет карбюратора и нет системы электрического зажигания. Сжатие в цилиндре подвергается не горючая смесь, а только воздух. По окончании процесса сжатия в цилиндр впрыскивается горючее. Для его зажигания не требуется никакого специального устройства, так как при высокой степени сжатия температура воздуха повышается до 600–700 °С. Горючее, впрыскиваемое с помощью топливного насоса через форсунку, воспламеняется при соприкосновении с раскалённым воздухом. Подача топлива регулируется таким образом, что процесс горения протекает более длительное время, чем в карбюраторном двигателе, и часть рабочего такта расширения происходит при постоянном давлении. Это повышает КПД двигателя.

Газотурбинный двигатель. Газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора, камер сгорания и газовой турбины. При работе турбины ротор компрессора вращается и засасывает воздух. При сжатии давление воздуха повышается в 5–7 раз, его температура поднимается примерно до 200 °С. Сжатый воздух поступает в камеру сгорания, туда же форсунками впрыскивается под большим давлением жидкое топливо, керосин или мазут (рис. 20.4). При горении топлива воздух нагревается до 1500–2200 °С и расширяется. Движущийся с большой скоростью воздух с продуктами горения вызывает вращение турбины, турбина вращает компрессор и винт самолёта или ротор электрического генератора. При одинаковой мощности газотурбинный двигатель имеет втрое меньший объём, а его масса в 6–9 раз меньше массы поршневого двигателя, что позволило применять его в авиации.



Рис. 20.4



Рис. 20.3



Рис. 20.5



Ю. А. Гагарин и С. П. Королёв



Рис. 20.6

Турбореактивный двигатель. Отработавший в газовой турбине воздух вместе с продуктами сгорания выбрасывается в атмосферу со скоростью более 500 м/с.

Возникающая при этом реактивная сила тяги может быть использована для движения самолёта. Турбореактивные двигатели имеют самолёты Ил-62, Ту-154, Ил-86, многие военные самолёты (рис. 20.5).

Ракетный двигатель. Самые мощные тепловые машины — это двигатели космических ракет. Наиболее просто устроены ракетные двигатели на твёрдом топливе. Такие двигатели используют в межконтинентальных баллистических ракетах. Более удобны в управлении жидкостные реактивные двигатели. В таких двигателях жидкое топливо и окислитель, необходимый для горения, поступают в камеру сгорания (рис. 20.6). При сжигании горючего образуются продукты горения в газообразном состоянии. Выходящая из сопла струя газа создаёт реактивную силу.

Разработанная под руководством академика Сергея Павловича Королёва ракетно-космическая техника позволила осуществить 4 октября 1957 г. запуск первого в мире искусственного спутника Земли, полёт 12 апреля 1961 г. вокруг Земли первого в мире космонавта Ю. А. Гагарина, запуск межпланетных автоматических станций на Луну, Марс, Венеру.

Ракетная система «Энергия» (рис. 20.7), доставившая в космическое пространство космический челнок «Буран», имеет мощность двигателей 125 млн кВт. Стартовая масса комплекса 2400 т, масса полезного груза, выводимого на околоземную орбиту, достигает 100 т.

Компрессионный холодильник. В домашнем компрессионном холодильнике для понижения температуры внутри холодильного шкафа используется свойство жидкости поглощать энергию при испарении. Для этой цели используется жидкость, которая при пониженном давлении кипит при температуре ниже 0 °С. Такой жидкостью, например, является фреон. Этим веществом заполнена система *конденсатора* и *испарителя* (рис. 20.8). Испаритель находится в морозильной камере, конденсатор расположен снаружи холодильного шкафа на задней стенке. Компрессор, приводимый в действие электродвигателем, откачивает газообразное рабочее вещество из испарителя и нагнетает его в конденсатор. При сжатии газ нагревается. Охлаждение его до комнатной температуры производится в конденсаторе. Охлаждённый до комнатной температуры при повышенном давлении, создаваемом в конденсаторе с помощью компрессора, газ переходит в жидкое состояние. Из конденсатора жидкость через капиллярную трубку поступает в испаритель. Откачкой паров с помощью компрессора в испарителе поддерживается пониженное давление. При пониженном давлении в испарителе жидкость кипит при температуре ниже 0 °С. Теплота на испарение жидкости отбирается от стенок испарителя, вызывая их охлаждение. Откачанные пары поступают в компрессор, оттуда снова в конденсатор и так далее по замкнутому циклу.

Температура кипения жидкости понижается с понижением давления. При постоянной скорости поступления жидкости из конденсатора в испаритель через капиллярную трубку давление паров в испарителе тем ниже, чем дольше работает компрессор. Если не требуется понижать температуру в холодильнике до предельно низкого значения, то работа компрессора периодически останавливается выключением электромотора с помощью автомата, следящего за поддержанием заданной температуры.

Экологические проблемы использования тепловых машин. В настоящее время количество сжигаемого в тепловых машинах топлива так велико, что продукты сгорания топлива причиняют серьёзный вред всей живой природе на Земле. При сжигании угля и нефтепродуктов атмосфера загрязняется вредными соединениями азота и серы. Больше половины загрязнений атмосферы создаёт транспорт. Кроме оксида углерода и соединений азота, автомобильные двигатели выбрасывают в атмосферу за год около 3 млн т соединений свинца, добавляемых в автомобильный бензин. Выбросы вредных веществ можно уменьшить использованием дизельных двигателей вместо карбюраторных, так как эти двигатели примерно на треть экономичнее карбюраторных, причём в дизельное топливо не добавляют соединений свинца. Ведутся разработки автомобилей, использующих в качестве топлива водород, продуктом сгорания которого является вода.

При сжигании угля, нефти и газа в атмосферу Земли ежегодно поступает дополнительно около 20 млрд т углекислого газа — оксида углерода. В последние десятилетия содержание в атмосфере углекислого газа возросло более чем на треть, метана — в 2,5 раза. Повышение концентрации углекислого газа в атмосфере Земли может привести к парниковому эффекту. Суть парникового эффекта состоит в том, что согретая Солнцем Земля излучает в космическое пространство инфракрасные лучи. Содержащиеся в атмосфере водяной пар, углекислый газ и метан поглощают инфракрасное излучение, удерживая часть тепла в атмосфере, подобно тому как покрытие из прозрачной плёнки или стекла удерживает тепло в парнике.

Участившиеся в последние десятилетия погодные аномалии, возможно, связаны с процессом глобального потепления на Земле. Одной из причин глобального потепления может быть парниковый эффект, вызванный выбросами в атмосферу продуктов сжигания топлива (рис. 20.9).

Для решения проблемы парникового эффекта как глобальной экологической проблемы в 1997 г. в Киото было подписано международное соглашение, согласно которому до 2012 г. развитые страны должны снизить уровень выбросов парниковых газов на 5% от уровня 1990 г. Это должно способствовать более рациональному использованию энергии.



Рис. 20.7

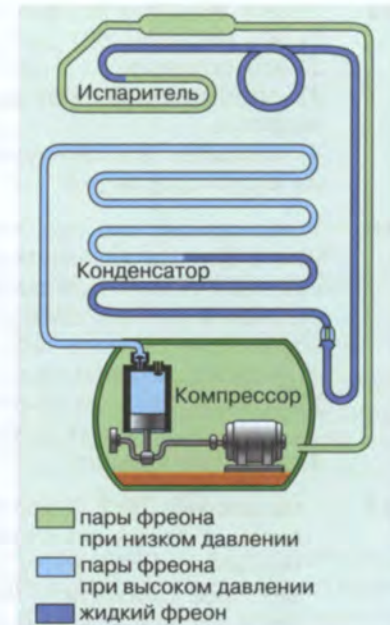


Рис. 20.8



Рис. 20.9

@ Найдите

<http://www.critical.ru/calendar/1901watt.htm>
(19 января 1736 г.)

Тест 2

Тест предназначен для самоконтроля результатов изучения тем
«Законы Ньютона. Законы сохранения»

Работу над заданиями теста следует проводить так же, как рекомендовано на с. 32 для теста 1.

Часть 1

- A1.** Вследствие явления инерции всякое тело при отсутствии действия на него других тел
- 1) находится в покое
 - 2) движется равномерно и прямолинейно
 - 3) находится в покое или движется равномерно и прямолинейно
 - 4) постепенно уменьшает скорость движения до нуля
 - 5) движется равномерно по окружности
- A2.** Мерой инертности тела является
- 1) его масса
 - 2) его скорость
 - 3) произведение массы тела на его скорость
 - 4) половина произведения массы тела на его скорость
- A3.** Утверждение, что при взаимодействии тела с другими телами ускорение движения тела прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела, называется
- 1) первым законом Ньютона
 - 2) вторым законом Ньютона
 - 3) третьим законом Ньютона
 - 4) законом инерции
- A4.** На рисунке T2.1, а представлены траектория движения шара, брошенного под углом к горизонту, и направления векторов скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} шара в точке А. Какой из векторов на рисунке T2.1, б указывает направление равнодействующей сил, действующих на шар в этой точке?

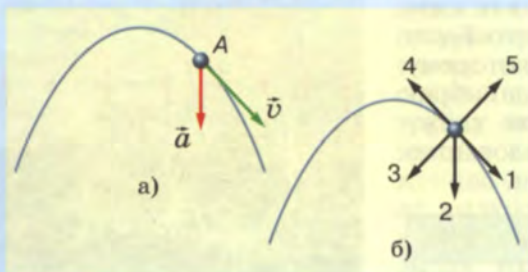


Рис. T2.1

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4
- 5) 5

- A5.** Человек, стоящий на Земле, действует на неё силой тяготения, направленной вертикально вверх. По третьему закону Ньютона равной по модулю силой противодействия является сила
- 1) упругости, приложенная к человеку и направленная вертикально вниз
 - 2) упругости, приложенная к Земле и направленная вертикально вниз
 - 3) тяготения, приложенная к Земле и направленная вертикально вниз
 - 4) тяготения, приложенная к человеку и направленная вертикально вниз
- A6.** На рисунке T2.2 представлены три вектора сил, лежащие в одной плоскости и приложенные к одной точке тела. Модули векторов \vec{F}_1 , \vec{F}_2 и \vec{F}_3 равны соответственно 4 Н, 5 Н и 3 Н. Модуль равнодействующей этих трёх сил равен

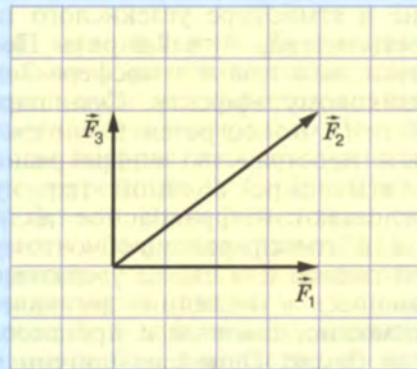


Рис. T2.2

- 1) 0
 - 2) 2 Н
 - 3) 5 Н
 - 4) 10 Н
 - 5) 12 Н
- A7.** Сила гравитационного притяжения космонавта на поверхности Земли равна 800 Н. Чему будет равна сила гравитационного притяжения этого космонавта на поверхности планеты, масса которой в 80 раз меньше массы Земли и радиус которой в 4 раза меньше радиуса Земли?

- 1) 0,625 Н 3) 20 Н 5) 160 Н
2) 2,5 Н 4) 40 Н

- A8.** Брусок массой m перемещается на расстояние s по прямой на горизонтальной поверхности под действием силы \vec{F} , направленной под углом α к горизонту (рис. Т2.3). Коэффициент трения равен μ . Чему равна работа силы \vec{F} по преодолению действия силы трения на этом пути?

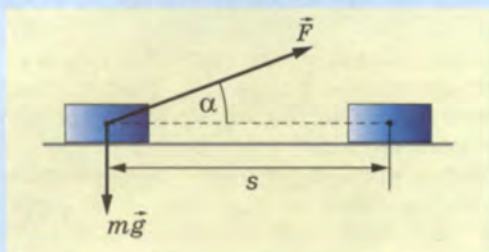


Рис. Т2.3

- 1) $-\mu mgs$
2) $-\mu(mg - Fs \sin \alpha)s$
3) $\mu(mg - Fs \sin \alpha)s$
4) $Fs \sin \alpha$
5) $Fs \cos \alpha$

- A9.** Тело массой 2 кг падает под действием силы тяжести. Какую работу совершила сила тяжести при увеличении скорости тела от 1 до 5 м/с?

- 1) 48 Дж 3) 24 Дж
2) 32 Дж 4) 16 Дж

- A10.** При растяжении первоначально не деформированной пружины жёсткостью 400 Н/м на 5 см её потенциальная энергия упругой деформации становится равной

- 1) 10 000 Дж 3) 1 Дж
2) 5000 Дж 4) 0,5 Дж

- A11.** Груз, подвешенный на нити, совершает свободные колебания как маятник. При отсчёте потенциальной энергии от положения равновесия полная механическая энергия груза при прохождении положения равновесия равна 10 Дж. В каких пределах при этих колебаниях груза изменяются его потенциальная энергия и кинетическая энергия?

- 1) потенциальная энергия изменяется от 0 до 10 Дж, кинетическая энергия изменяется от 0 до 10 Дж
2) потенциальная энергия изменяется от 0 до 10 Дж, кинетическая энергия изменяется от 10 до 20 Дж
3) потенциальная энергия изменяется от 10 до 20 Дж, кинетическая энергия изменяется от 0 до 10 Дж
4) потенциальная энергия изменяется от 0 до 10 Дж, кинетическая энергия не изменяется и равна 10 Дж

- A12.** Газу в цилиндре путём теплопередачи было передано количество теплоты 200 Дж. Нагретый газ совершил работу 100 Дж над внешними телами. Как изменилась внутренняя энергия газа в цилиндре?

- 1) увеличилась на 300 Дж
2) увеличилась на 200 Дж
3) увеличилась на 100 Дж
4) не изменилась
5) уменьшилась на 100 Дж

Часть 2

Выполните задания В1–В3 и запишите полученные ответы на поставленные вопросы без записи хода решения.

- В1.** Буксир тянет баржу массой 10 т с помощью троса. С каким ускорением начинает движение баржа при силе натяжения троса 5000 Н и силе сопротивления воды 4000 Н?

- В2.** Космонавт при выходе из космического корабля в открытый космос оттолкнулся от корабля и стал удаляться от него со скоростью 71 см/с. В результате толчка космонавта скорость космического корабля изменилась на 1 см/с. Чему равна масса космонавта? Масса космического корабля 7000 кг.

- В3.** Вагон массой 20 т при движении со скоростью 0,6 м/с сталкивается с неподвижным вагоном массой 10 т, сцепляется с ним, и далее они движутся вместе. Чему равно количество теплоты, выделившееся при сцеплении вагонов?

? Вопросы

1. Для чего в научных экспериментах обычно выполняют несколько повторных измерений физической величины?
2. Для чего вычисляют среднее арифметическое значение результатов измерений физической величины, выполненных в одинаковых условиях?

Задачи

Задача 1. Лодочная станция находится на берегу озера около устья реки. Катер совершает первую поездку туда и обратно на расстояние 600 м по озеру, вторую туда и обратно на расстояние 600 м по реке. Скорость катера относительно воды 3 м/с, скорость течения воды в реке 1 м/с. Определите время, затраченное на поездку по озеру, и время, затраченное на поездку по реке.

Задача 2. Автомобиль двигался со скоростью 20 м/с, затем происходило торможение с ускорением 4 м/с². Найдите путь, пройденный автомобилем за 6 с после момента начала торможения.

Задача 3. Лыжник скользит по наклонной плоскости равноускоренно из состояния покоя. За вторую секунду движения он прошёл путь 3 м. Какой путь он прошёл за первую секунду движения?

Задача 4. На тело массой m действует сила тяжести \vec{F}_T , тело действует на опору силой веса P . Какие из трёх названных физических величин, являясь свойством данного тела, не изменяются при изменении его положения в пространстве, не зависят от движения этого тела и опоры?

Задача 5. Монету положили на доску, наклонённую под углом 53° к горизонтальной поверхности. Будет ли скользить монета по доске? Если будет, то с каким ускорением? Коэффициент трения равен 0,5. В расчётах примите приближённые значения: $\sin 53^\circ = 0,8$; $\cos 53^\circ = 0,6$; $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Задача 6. Точка на прямой, соединяющей центры Земли и Луны, в которой сила притяжения, действующая на любое тело со стороны Земли, равна по модулю силе притяжения со стороны Луны, находится на расстоянии 54 радиусов Земли от центра Земли. Масса Земли больше массы Луны в 81 раз. Определите расстояние от Земли до Луны в радиусах Земли.

Задача 7. Для отделения космического корабля от космической станции использована пружина жёсткостью 1600 Н/м, сжатая на 0,1 м. Рассчитайте изменения скорости космического корабля и космической станции после распрямления пружины, если масса корабля 8 т, масса космической станции 32 т. Массой пружины можно пренебречь.

● Экспериментальные задания

Работаем самостоятельно

Экспериментальное задание 1. Используя собственный пульс в качестве меры времени, исследуйте процесс колебаний шара, подвешенного на нити. Изменяется ли период колебаний шара при увеличении его начального отклонения от вертикального положения?

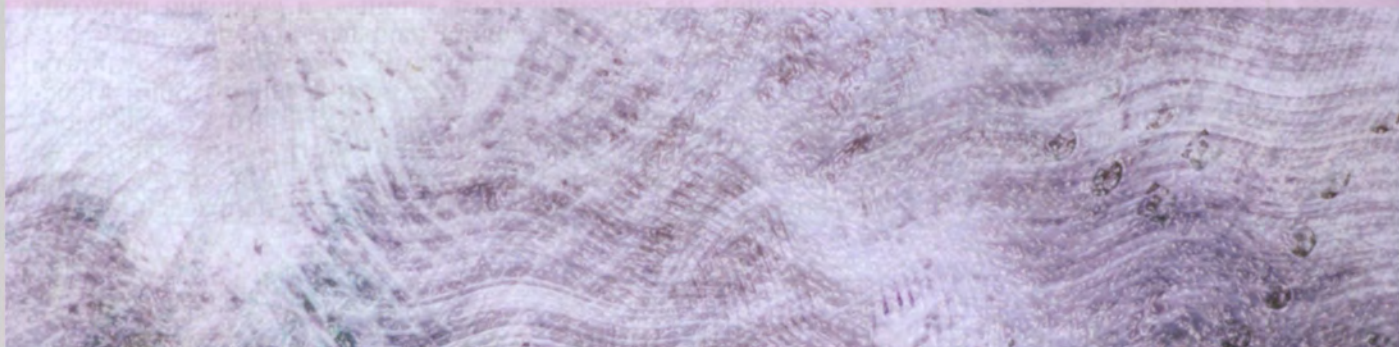
Экспериментальное задание 2. Используя измерительную линейку, измерительный цилиндр и секундомер, определите скорость движения воды в струе, вытекающей из водопроводного крана.

Экспериментальное задание 3. Положите лист бумаги на наклонно поставленный учебник и используйте его как наклонную плоскость. Отпустите монету от верхнего края наклонной плоскости и измерьте расстояние, пройденное монетой по горизонтальной поверхности до остановки. По длине тормозного пути определите скорость монеты после её соскальзывания с наклонной плоскости. Коэффициент трения определите экспериментально в отдельном опыте, используя измерительную линейку.

04

Квантовые явления

21	Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома	96	25	Экспериментальные методы регистрации заряженных частиц	112
22	Линейчатые оптические спектры. Поглощение и испускание света атомами	100	26	Ядерные реакции	116
23	Состав атомного ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядра	104	27	Ядерная энергетика	120
24	Радиоактивность	108	28	Дозиметрия	124



§ 21. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома

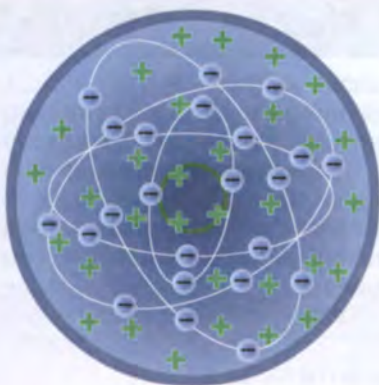


Рис. 21.1



Эрнест Резерфорд

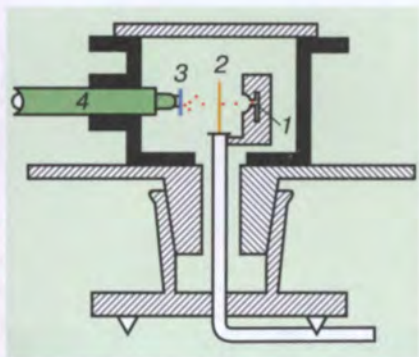


Рис. 21.2

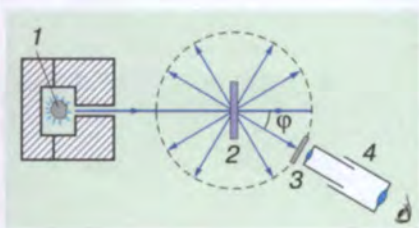


Рис. 21.3

Модель атома Дж. Дж. Томсона. После экспериментального доказательства существования внутри всех атомов отрицательно заряженных частиц — электронов английский физик Джозеф Джон Томсон высказал гипотезу о том, что нейтральный атом состоит из положительного электрического заряда, равномерно распределённого в шаре радиусом порядка одной десятимиллионной доли миллиметра. Внутри этого шара отрицательно заряженные электроны вращаются по концентрическим орбитам (рис. 21.1).

Такое представление об устройстве атомов было опровергнуто опытами английского физика Эрнеста Резерфорда.

Опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Альфа-частицами называют быстро движущиеся положительные ионы атомов гелия, испускаемые некоторыми радиоактивными атомами. Для экспериментального исследования зависимости числа рассеянных частиц от угла рассеяния Резерфорд использовал установку, схема устройства которой представлена на рисунке 21.2. В центре установки под вакуумным колпаком находилось радиоактивное вещество 1, из него выходил тонкий пучок альфа-частиц. На пути частиц была расположена тонкая металлическая фольга 2, за ней экран 3, покрытый сернистым цинком.

После выкачивания воздуха из-под колпака альфа-частицы проходили сквозь фольгу и сталкивались с кристаллами сернистого цинка на экране 3. Каждый удар альфа-частицы вызывал в кристалле вспышку света, которую можно было наблюдать через микроскоп 4. Положение экрана 3 и микроскопа 4 можно было изменять в пространстве и по шкале измерять углы рассеяния альфа-частиц (рис. 21.3).

Опыты показали, что альфа-частицы в газах и твёрдых телах при скоростях движения в десятки тысяч километров в секунду движутся практически прямолинейно. Их отклонения от первоначального направления движения в большинстве случаев составляют лишь несколько градусов.

Модель атома Томсона оказалась в противоречии с этими новыми экспериментальными фактами. Известно, что средние расстояния между центрами атомов в твёрдых телах составляют примерно 10^{-8} см. Если считать атомы сплошными шариками радиусом порядка 10^{-8} см, то листок золота в опытах Резерфорда толщиной $6 \cdot 10^{-5}$ см должен содержать несколько тысяч слоёв атомов. Из атомов золота, увеличенных до размеров обычного кирпича, получится стена толщиной в несколько сотен метров. Альфа-частица, летящая к листку золота, подобна в этом случае кирпичу, брошенному в громадную стену. Легко представить себе удивление физиков, обнаруживших, что «кирпич» не отскакивает от «стены», а свободно проходит сквозь неё, даже не изменив направления движения.

Ещё более удивительными оказались результаты следующих экспериментов. Сотрудник лаборатории Марсден при проведении опыта, предложенного Резерфордом, заметил отклонения небольшой части альфа-частиц на большие углы. Примерно одна из восьми тысяч частиц отразилась от фольги даже в обратном направлении.

Ядерная модель атома. Для объяснения удивительных результатов опытов по рассеянию альфа-частиц в воздухе и металлических листках Резерфорд разработал новую модель атома, которую называют **ядерной моделью**. Зная массу и скорость альфа-частицы, Резерфорд вычислил радиус положительно заряженного шара, в котором должен быть сконцентрирован электрический заряд для обратного отражения альфа-частицы. Оказалось, что этот шар должен иметь радиус примерно в 100 тыс. раз меньше радиуса атома.

На основе результатов этих расчётов Резерфорд в 1911 г. предложил ядерную модель строения атома. Согласно этой модели атом устроен подобно Солнечной системе. В центре атома находится положительно заряженное ядро малых размеров радиусом порядка 10^{-12} – 10^{-13} см, а вокруг него на больших по сравнению с размерами ядра расстояниях порядка 10^{-8} см движутся по круговым орбитам отрицательно заряженные электроны. Размеры атома определяются радиусом орбиты самого удалённого от ядра электрона. Почти вся масса атома сосредоточена в атомном ядре.

Альфа-частицы без рассеяния проходят через тысячи слоёв атомов потому, что большая часть пространства внутри атомов пуста, а столкновения с лёгкими электронами почти не влияют на движение тяжёлой альфа-частицы. Заметное отклонение альфа-частиц от первоначального направления движения происходит только при редких столкновениях с атомными ядрами очень малых размеров (рис. 21.4).

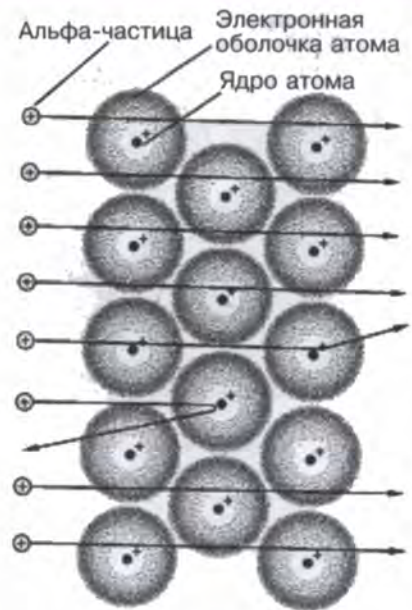


Рис. 21.4

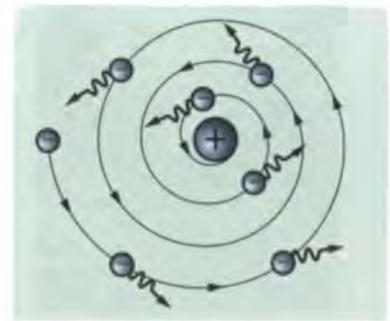


Рис. 21.5

Недостатки модели атома Резерфорда. Модель атома Резерфорда не смогла объяснить все свойства атомов. Согласно законам классической физики электроны при обращении по круговым орбитам вокруг положительно заряженного ядра должны излучать электромагнитные волны. Излучение электромагнитных волн должно приводить к уменьшению запаса потенциальной энергии в системе ядро—электрон, к постепенному уменьшению радиуса орбиты электрона и падению электрона на ядро (рис. 21.5). Но атомы устойчивы, они обычно не излучают электромагнитных волн, электроны не падают на атомные ядра.

Вопросы

1. Какие экспериментальные факты указывали на существование сложной внутренней структуры у атомов химических элементов?
2. Какую модель строения атома предложил Томсон?
3. Какие экспериментальные факты послужили основой для выдвижения гипотезы о существовании атомного ядра?
4. Какими экспериментами Резерфорд подтвердил правильность своей гипотезы о существовании атомного ядра?
5. Какие свойства атомов не мог объяснить Резерфорд на основе своей модели строения атома?

Прочитайте

Эрнест Резерфорд//Энциклопедия для детей: Физика. — М.: Аванта+, 2001. — Т. 16. — С. 223—228.

Найдите

<http://class-fizika.narod.ru/mm9.htm>

(Опыт Резерфорда.)



Майкл Фарадей



Джозеф Джон Томсон

Электрон. К концу XIX в. в физике сложилась система представлений о мире, которую называют классической физикой. В классической физике считалось, что все тела в материальном мире состоят из неделимых атомов, взаимодействующих между собой с помощью гравитационных и электромагнитных полей. В этой картине мира было неясно, как связаны с атомами электрические заряды.

В 1833 г. Майкл Фарадей при изучении явления электролиза обнаружил, что выделение на одном электроде одинакового количества атомов таких веществ, как водород, натрий, калий, сопровождается переносом одинакового общего заряда. На основании этого факта Фарадей высказал гипотезу о существовании в природе элементарного электрического заряда e — «атома электричества», который не делится на части: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрические заряды, не связанные с атомами, были обнаружены в конце XIX в. при изучении разряда в газах. В разрядной трубке за положительным электродом — анодом — наблюдалось свечение стекла, вызываемое действием какого-то излучения или потока частиц от отрицательного электрода — катода. Это излучение назвали **катодными лучами**. Оно распространялось прямолинейно, не проходило через тонкую металлическую пластину, оставляя за ней тень на светящемся стекле (рис. 21.6).

Французский физик Жан Перрен установил, что катодные лучи являются потоком частиц с отрицательным электрическим зарядом.

Катодные лучи возникают при электрическом разряде в любом газе и обладают одинаковыми свойствами. Следовательно, отрицательно заряженные частицы имеются в составе любых атомов. Эти частицы назвали **электронами**.

В 1897 г. Дж. Дж. Томсон по отклонению катодных лучей в электрическом и магнитном полях (рис. 21.7) установил, что масса частицы катодных лучей — электрона — примерно в 2000 раз меньше массы самого лёгкого из атомов — атома водорода.

Открытие электронов в составе любых атомов опровергло представление об атомах как простейших неделимых частицах.

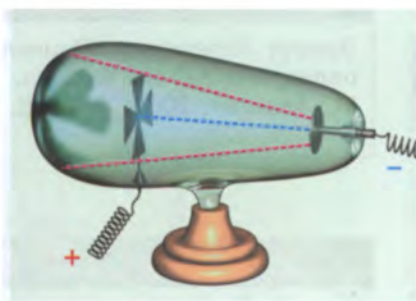


Рис. 21.6

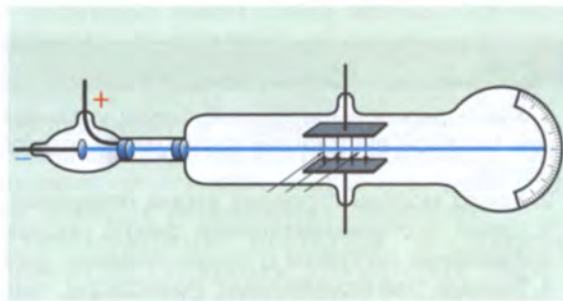


Рис. 21.7

Экспериментальное задание 21.1

Работаем в группе

Измерение элементарного электрического заряда

Оборудование: стеклянный стакан со слабым раствором соляной кислоты (1–2%-ый), пробирка градуированная, источник постоянного тока, миллиамперметр, переменный резистор, соединительные провода, два электрода, секундомер.

Измерьте электрический заряд иона водорода.

Плотность газообразного водорода при нормальных условиях равна $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$, масса молекулы водорода равна $m_{\text{H}_2} = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Содержание работы

При пропускании электрического тока через раствор соляной кислоты к катоду движутся положительные ионы водорода, к аноду — отрицательные ионы хлора. Выделяющийся у катода газообразный водород можно собрать в пробирку и измерить его объём V . Молекула водорода H_2 образуется из двух атомов водорода, поэтому число ионов водорода в 2 раза больше числа N молекул водорода.

При силе тока I за время t ионы водорода переносят заряд q , равный $q = It$.

Разделив заряд q всех ионов водорода на число n ионов, найдём заряд e одного иона водорода, или элементарный электрический заряд: $e = \frac{q}{n} = \frac{q}{2N} = \frac{It}{2N}$.

Число N молекул водорода можно найти, разделив массу m газообразного водорода в пробирке на массу m_{H_2} одной молекулы водорода, а масса m водорода в пробирке равна произведению его плотности ρ на объём V : $N = \frac{m}{m_{\text{H}_2}} = \frac{\rho V}{m_{\text{H}_2}}$, $e = \frac{Itm_{\text{H}_2}}{2\rho V}$.

Таким образом, в эксперименте нужно измерить силу тока I , время t прохождения тока через электролит и объём V выделившегося водорода.

Порядок выполнения задания

1. Заполните градуированную пробирку слабым раствором соляной кислоты до верхнего края. Прикройте пробирку маленьким листом бумаги, переверните вверх дном, опустите её в стакан со слабым раствором кислоты и удалите лист бумаги.

2. Введите внутрь пробирки один конец проводника без изоляции. Остальная часть проводника должна быть покрыта изоляцией. Соедините другой конец этого проводника через миллиамперметр и переменный резистор с отрицательным полюсом источника постоянного тока. Конец проводника, соединённого с положительным полюсом источника тока, опустите в раствор соляной кислоты вне пробирки (рис. 21.8).

3. Включите источник постоянного тока. Регулируя сопротивление резистора, включённого последовательно в электрическую цепь, установите силу тока в цепи 50 мА и включите секундомер. Поддерживайте силу тока в цепи неизменной до выделения в пробирке 10 см^3 водорода и запишите время t электролиза.

4. Вычислите по значениям объёма V , силы тока I и времени t электролиза заряд иона водорода. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.



Рис. 21.8

Таблица 21.1

$V, \text{ м}^3$	N	$I, \text{ А}$	$t, \text{ с}$	$e, \text{ Кл}$

? Вопросы

1. Почему заряд электрона называется элементарным электрическим зарядом?
2. Почему в формуле для вычисления элементарного заряда в знаменателе не N , а $2N$?

§ 22. Линейчатые оптические спектры. Поглощение и испускание света атомами



Нильс Бор

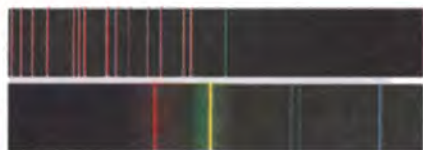


Рис. 22.1

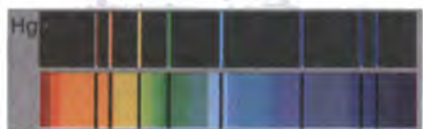


Рис. 22.2

@ Найдите

http://class-fizika.narod.ru/9_class.htm
(Линейчатые спектры.)

? Вопросы

1. Какие спектры испускания называются линейчатыми?
2. Как получают и наблюдают линейчатые спектры излучения?
3. Как получают и наблюдают линейчатые спектры поглощения?
4. Какая связь существует между линейчатыми спектрами излучения и поглощения?

Линейчатые спектры. В 1869 г. Дмитрий Иванович Менделеев открыл периодическую повторяемость химических свойств элементов при расположении их в порядке возрастания атомной массы. Это открытие позволило предположить существование периодической повторяемости внутренней структуры атомов при увеличении в них числа частиц. О сложной внутренней структуре атомов свидетельствовало и открытие линейчатых спектров.

В 1834 г. англичанин Уильям Тальбот обратил внимание на то, что при растворении в спирте солей различных металлов в спектре пламени спиртовки наблюдаются различные светлые линии. Немецкие учёные Густав Кирхгоф и Роберт Бунзен в 1859 г. обнаружили, что при высокой температуре пары любого химического элемента испускают свет, который разлагается призмой на несколько узких пучков света различного цвета. Совокупность наблюдаемых разноцветных линий называется **линейчатым спектром испускания** (или излучения). Каждая линия в линейчатом спектре излучения образуется светом одной длины волны. Линейчатый спектр каждого химического элемента не совпадает со спектром ни одного другого химического элемента. На рисунке 22.1 представлены линейчатые спектры излучения неона (вверху) и гелия (внизу).

При пропускании белого света со сплошным спектром через пары вещества наблюдается возникновение тёмных линий на фоне сплошного спектра испускания. Тёмные линии расположены точно в тех же местах, в которых наблюдаются светлые линии спектра излучения данного химического элемента. Такой спектр называется **линейчатым спектром поглощения** (рис. 22.2).

Совпадение частот линейчатых спектров излучения и поглощения для одного вещества доказывает, что атомы способны поглощать электромагнитное излучение только с такими частотами, какие они могут испускать.

Постулаты Бора. Для объяснения свойств атомов и происхождения линейчатых спектров датский физик Нильс Бор в 1913 г. высказал предположение о свойствах атомов, которые позже были названы **постулатами Бора**. Согласно этим постулатам каждый атом может находиться лишь в определённых состояниях, называемых **стационарными состояниями**. В стационарном состоянии атом обладает определённой энергией и не излучает её. Излучение или поглощение энергии происходит только при переходах атома из одного стационарного состояния в другое. При переходе атома из состояния с энергией E_m в состояние с энергией E_n частота ν испускаемого электромагнитного излучения прямо пропорциональна разности энергий атома в этих состояниях:

$$h\nu = E_m - E_n.$$

Поглощаемую или испускаемую порцию электромагнитного излучения называют **квантом** излучения. Коэффициент пропорциональности h между энергией E и частотой ν кванта называется **постоянной Планка**:

$$E = h\nu.$$

Стационарное состояние атома с минимальным запасом энергии называется **основным состоянием**, все

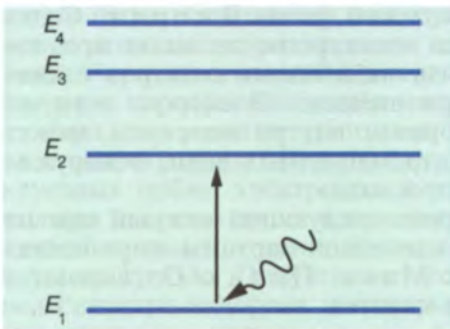


Рис. 22.3

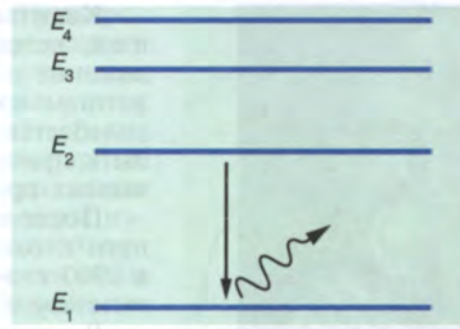


Рис. 22.4

остальные стационарные состояния называются **возбуждёнными состояниями**. В основном состоянии атом может находиться бесконечно долго, в возбуждённом состоянии он находится от миллиардных до миллионных долей секунды.

Стационарные состояния атома на диаграмме обозначаются горизонтальными линиями, называемыми **энергетическими уровнями**. Расстояния между уровнями пропорциональны разностям энергий атомов в этих состояниях. Переход атома из стационарного состояния E_1 с меньшим запасом энергии в состояние E_2 с бóльшим запасом энергии происходит с поглощением энергии (рис. 22.3). Переход атома из стационарного состояния E_2 с бóльшим запасом энергии в состояние E_1 с меньшим запасом энергии происходит с выделением энергии (рис. 22.4).

Экспериментальное задание 22.1

Работаем в группе

Наблюдение линейчатого спектра излучения

Оборудование: лазерный диск, люминесцентная лампа.

Включите лампу дневного света. Используя лазерный диск в качестве спектрального прибора, встаньте на расстоянии 2—3 м от люминесцентной лампы. Расположите диск так, чтобы изображение лампы было в центре диска. Медленно поворачивайте диск вокруг диаметра, параллельного трубке лампы, перемещая изображение лампы от центра диска к его краю. Когда белое изображение скроется за краем диска, у центра диска появится сначала фиолетовая полоса спектра, затем голубая, зелёная, жёлтая, красная линии (рис. 22.5).



Рис. 22.5

Спектрограф. Прибор для наблюдения спектров называется спектроскопом, прибор для фотографирования спектров называется спектрографом. Свет от источника 1 направляется на узкую щель 2 на входе спектрографа (рис. 22.6). Линза 3 находится на фокусном расстоянии от щели и превращает расходящийся пучок света в параллельный пучок. В призме 4 этот пучок в результате дисперсии света превращается в несколько пучков разного цвета, идущих по немного разным направлениям. Каждый параллельный пучок света одного цвета линза 5 собирает в изображение входной щели 2 . Получается разноцветный спектр на фотопластинке 6 . Если источник света обладает линейчатым спектром испускания, спектр получается в виде набора узких разноцветных линий.

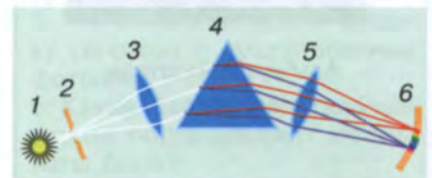


Рис. 22.6



Макс Планк

Кванты. В 1891 г. ирландский физик Джордж Стоуней, который ввёл термин «электрон», высказал предположение о возможной связи линейчатых спектров с движением электронов внутри атомов: «Электрон, если он колеблется каким-либо образом внутри молекулы, может быть причиной таких электромагнитных волн, обнаруживаемых при помощи спектроскопа».

После открытия электрона следующий важный шаг на пути к созданию новой физической картины мира сделал в 1900 г. немецкий физик Макс Планк. Он выдвинул гипотезу о существовании квантов.

В классической физике предполагалось, что электромагнитные волны излучаются нагретыми телами непрерывно. Если же источниками электромагнитных волн являются отдельные атомы, то к одному атому понятие температуры неприменимо. Атом может обладать избытком энергии и затем каким-то образом излучать её в виде электромагнитных волн. В таком случае процесс излучения должен быть ограниченным во времени и после израсходования избытка энергии должен прекратиться.

Согласно гипотезе Планка электромагнитное излучение испускается и поглощается определёнными порциями, которые Планк назвал **квантами**.

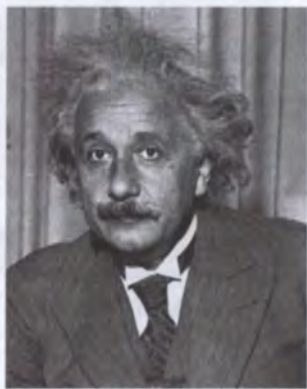
Энергия E каждого кванта пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности h между энергией и частотой кванта называется **постоянной Планка**. Постоянная Планка равна:

$$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

На основе гипотезы о квантах Планк вывел формулу для вычисления распределения энергии в спектре теплового излучения тел. Эта формула полностью соответствовала результатам эксперимента. С гипотезы Планка о квантах началось создание квантовой физики.



Альберт Эйнштейн

Фотоны. Гипотезу Планка о квантовом характере процессов электромагнитного излучения Альберт Эйнштейн в 1905 г. дополнил гипотезой о существовании квантов как особых частиц электромагнитного излучения — **фотонов**. Эта гипотеза полностью подтвердилась.

В классической физике считалось, что любые физические величины могут изменяться непрерывно. Квантовая механика исходит из экспериментально установленных фактов, доказывающих, что основные физические величины — энергия, импульс, электрический заряд, характеризующие системы взаимодействующих частиц, — при переходах системы из одного состояния в другое могут изменяться лишь скачками, квантованно.

Подтверждение квантовых постулатов Бора. Соответствие постулатов Бора действительным свойствам атомов было подтверждено в 1913 г. в опыте немецких физиков Джеймса Франка и Густава Герца. В этом

опыте было установлено, что при столкновениях электронов с атомами ртути передача энергии атому происходит только при кинетической энергии электронов не меньше энергии первого возбуждённого состояния атома ртути.

Большим успехом квантовой теории был расчёт спектра атома водорода. Бор рассчитал радиусы стационарных круговых орбит электронов в атоме водорода, вычислил полную энергию атома в каждом состоянии и частоты излучаемых квантов при переходах электронов с одной орбиты на другую. Полученные теоретически значения длин волн спектра водорода полностью совпали с наблюдаемыми в эксперименте.

На рисунке 22.7 представлена схема строения атома водорода по Бору с переходами электронов между орбитами, на рисунке 22.8 — схема энергетических уровней атома водорода, соответствующая этим орбитам, с переходами между ними. Энергия атома выражена в электронвольтах.

Дальнейшие исследования строения и свойств атомов привели к созданию квантовой механики. **Квантовой механикой** называют теорию, описывающую явления в мире элементарных частиц и состоящих из них систем. Точные значения координат и скоростей частиц в любой момент времени, траектории движения частиц в квантовой механике в принципе неопределимы. Можно вычислить лишь вероятность нахождения частицы в данном месте пространства.

В атомной физике из-за малости значений энергии микрочастиц, кроме единицы *джоуль* (1 Дж), употребляется внесистемная единица энергии *электронвольт* (1 эВ).

1 эВ равен энергии частицы с элементарным электрическим зарядом e , приобретаемой под действием электрического поля при перемещении между точками с напряжением 1 В:

$$E = A = eU,$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Теория атома Бора содержала элементы как новой квантовой теории, так и классической физики. Поэтому Резерфорд в своём письме Бору написал:

20 марта 1913 г.

Дорогой д-р Бор!

...Я прочёл Вашу работу с великим интересом, но мне хочется бережно просмотреть её снова, когда у меня будет больше досуга. Ваши взгляды на механизм рождения водородного спектра очень остроумны и представляются отлично разработанными. Однако сочетание идей Планка со старой механикой делает весьма затруднительным физическое понимание того, что лежит в основе такого механизма. Мне сдаётся, что есть серьёзный камень преткновения в Вашей гипотезе, и я не сомневаюсь, что Вы полностью сознаёте это, а именно: как решает электрон, с какой частотой он должен колебаться, когда происходит его переход из одного состояния в другое? Мне кажется, Вы будете вынуждены предположить, что электрон заранее знает, где он собирается остановиться.

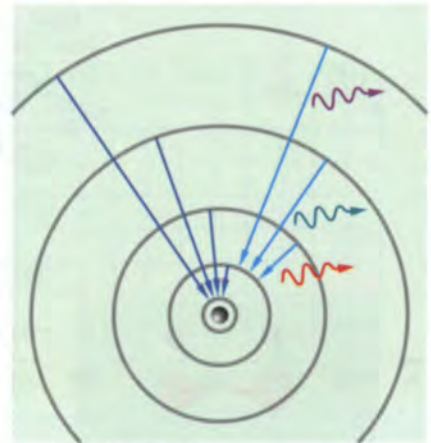


Рис. 22.7

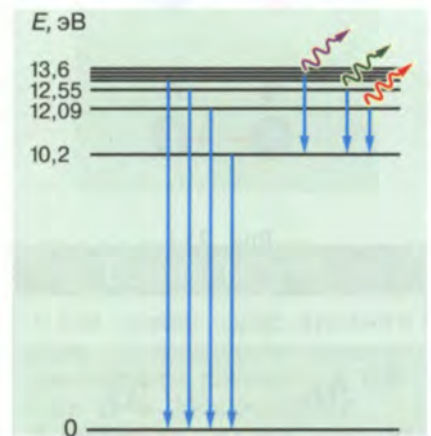


Рис. 22.8

? Вопросы

1. В чём заключается гипотеза о существовании квантов?
2. От чего зависит энергия кванта?
3. От чего зависит частота кванта?
4. Какие экспериментальные факты подтверждают гипотезу о существовании квантов?
5. Что нового внесла в физику гипотеза о существовании фотонов?
6. Какие экспериментальные факты подтверждают постулаты Бора?
7. Какими недостатками обладала квантовая теория Бора?

§ 23. Состав атомного ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядра

Заряд атомного ядра. Исследования атомных ядер показали, что заряд q ядра атома химического элемента с порядковым номером Z в таблице Менделеева равен Z элементарных положительных электрических зарядов e :

$$q = eZ. \quad (23.1)$$

Число Z называют **зарядовым числом** ядра.

Состав атомного ядра. В 1919 г. Резерфорд установил, что при столкновениях с ядрами атомов бора, азота, фтора, натрия и других химических элементов альфа-частицы выбивают из них частицы с элементарным положительным зарядом и массой, равной массе ядра атома водорода:

$$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276470 \text{ а.е.м.}$$

Эти частицы, имеющиеся внутри всех атомных ядер, назвали **протонами**.

В 1932 г. английский физик Джеймс Чадвик открыл частицу **нейтрон**. Нейтрон не имеет электрического заряда, масса нейтрона немного больше массы протона:

$$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665012 \text{ а.е.м.}$$

Ядерные силы. В атомных ядрах протоны находятся на очень малых расстояниях. Силы отталкивания между одноимёнными электрическими зарядами протонов на малых расстояниях очень велики, но протоны не вылетают из ядер. Значит, между ними действуют какие-то силы притяжения. Эти силы назвали **ядерными силами**.

Нуклоны. Ядерные силы притяжения одинаково действуют между двумя протонами, между двумя нейтронами или между протоном и нейтроном (рис. 23.1). Из-за этого протон и нейтрон рассматривают как одну частицу — **нуклон** — в двух разных состояниях.

Особенностью ядерных сил является их малый радиус действия, около $1,4 \cdot 10^{-15}$ м.

Дальнейшие исследования показали, что ядра атомов всех химических элементов состоят из протонов и нейтронов, т. е. из нуклонов. Число протонов в атомном ядре равно зарядовому числу Z , число нейтронов обозначается буквой N . Сумма числа Z протонов и числа N нейтронов в атомном ядре — число нуклонов — называется **массовым числом** ядра и обозначается буквой A (рис. 23.2, 23.3):

$$A = Z + N.$$

Дефект массы атомного ядра. Точные измерения масс атомных ядер показали, что масса атомного ядра, состоящего из нескольких протонов и нейтронов, немного меньше суммы масс свободных протонов и нейтронов, составляющих это ядро:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n. \quad (23.2)$$

Разность между суммой масс свободных протонов и нейтронов и массой атомного ядра называется **дефектом массы** Δm атомного ядра:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}. \quad (23.3)$$

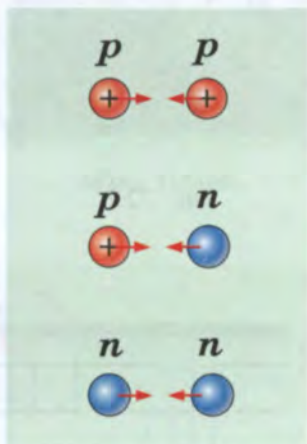


Рис. 23.1

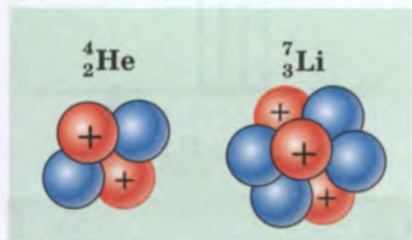


Рис. 23.2

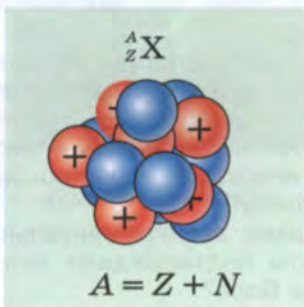


Рис. 23.3

Энергия покоя. В XX в. было установлено, что, кроме кинетической и потенциальной энергии, в природе существует ещё **энергия покоя**. Всякое тело массой m обладает энергией покоя E_0 , равной

$$E_0 = mc^2, \quad (23.4)$$

где c — скорость света в вакууме. Уравнение (23.4), связывающее энергию покоя с массой тела, называется **уравнением Эйнштейна**.

Энергия связи атомных ядер. Так как масса атомного ядра меньше суммы масс свободных протонов и нейтронов, энергия покоя ядра меньше энергии покоя свободных протонов и нейтронов, из которых образовалось это ядро. Уменьшение энергии покоя системы нуклонов на ΔE при их связывании ядерными силами равно произведению дефекта массы Δm атомного ядра на квадрат скорости света в вакууме:

$$\Delta E = \Delta mc^2. \quad (23.5)$$

Энергия, вычисляемая по формуле (23.5), выделяется при соединении свободных нуклонов в атомное ядро. Для разделения атомного ядра на протоны и нейтроны нужно совершить работу против ядерных сил притяжения, равную выделившейся энергии. Эту энергию называют **энергией связи ядра ΔE** .

Частное от деления энергии связи ядра ΔE на число A нуклонов в ядре называется **удельной энергией связи f** ядра:

$$f = \frac{\Delta E}{A}. \quad (23.6)$$

Удельная энергия связи ядра равна среднему значению энергии, необходимой для освобождения из ядра одного нуклона. Значения удельной энергии связи нуклонов в ядре в сотни, тысячи и сотни тысяч раз превышают значения энергии связи электронов в атомах (рис. 23.4).

График на рисунке 23.4 показывает, что с увеличением массового числа A , т. е. числа нуклонов в ядре, удельная энергия связи нуклонов в ядре постепенно возрастает от примерно 1 МэВ/нуклон до почти 9 МэВ/нуклон при значениях массового числа около 60 (железо, кобальт, никель, медь). При дальнейшем увеличении массового числа A удельная энергия связи нуклонов в ядре постепенно убывает и для урана с массовым числом 238 составляет примерно 7,6 МэВ/нуклон.

Нуклоны наиболее прочно связаны ядерными силами в ядрах атомов химических элементов, которые расположены около середины таблицы Менделеева. В лёгких ядрах нуклоны связаны наименее прочно, в тяжёлых ядрах они связаны слабее, чем в ядрах атомов химических элементов, находящихся около середины таблицы Менделеева.

Задача 23.1. Вычислите отношение сил гравитационного притяжения протонов к силам кулоновского отталкивания между ними.

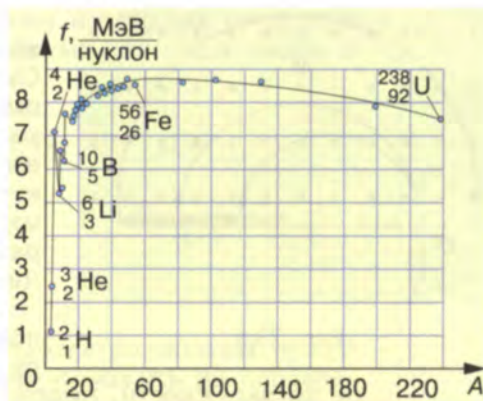


Рис. 23.4

Вопросы

1. Как связан заряд атомного ядра с порядковым номером химического элемента в таблице Д. И. Менделеева?
2. Из каких частиц состоят атомные ядра?
3. Чем отличается протон от нейтрона?
4. Какое свойство одинаково у протона и нейтрона?
5. Что такое нуклон?
6. Каковы особенности ядерных сил?
7. Что такое дефект массы?
8. Как вычисляется дефект массы?
9. Что такое энергия покоя?
10. Как вычисляется энергия покоя?
11. Что такое энергия связи атомного ядра?
12. Как вычисляется энергия связи атомного ядра?
13. Что такое удельная энергия связи атомного ядра?
14. Как вычисляется удельная энергия связи атомного ядра?

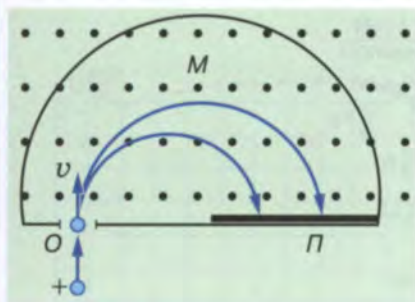


Рис. 23.5

Измерение масс атомных ядер. Массы атомов и атомных ядер измеряются с помощью масс-спектрографа. Схема устройства масс-спектрографа представлена на рисунке 23.5. Специальное устройство пропускает на щель O только ионы с некоторой определённой, одинаковой для всех скоростью v . Через щель пучок ионов попадает в вакуумную камеру M . Эта камера находится между полюсами магнита. Положительные ионы исследуемого вещества разгоняются электрическим полем. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны вектору скорости ионов. На движущуюся заряженную частицу магнитное поле действует силой, направленной под прямым углом к вектору скорости частицы. Под действием этой силы ион движется по окружности, радиус R которой при одинаковой скорости частиц и одинаковых зарядах определяется массой иона. Совершив половину оборота по окружности, ионы попадают на фотопластинку Π и создают в ней скрытое изображение. Если все ионы в пучке имеют одинаковые массы, то после проявления фотопластинки на ней видна одна тёмная полоса — изображение щели. Масса иона определяется путём измерения радиуса окружности, по которой он движется в магнитном поле.

Изотопы. При выполнении экспериментов по измерению масс ионов различных химических элементов на фотопластинке масс-спектрографа обнаруживалась не одна тёмная линия, а несколько линий. Это означало, что атомы одного химического элемента состоят из нескольких групп атомов с разными массами. Следовательно, одно место в таблице химических элементов Д. И. Менделеева занимает не один тип совершенно одинаковых атомов, а набор из нескольких существенно различных групп атомов. Атомы, составляющие один химический элемент, но различные по своим физическим свойствам, оказываются неразличимыми по химическим свойствам потому, что их атомные ядра обладают одинаковыми электрическими зарядами. Все атомы с одинаковым зарядом ядра (при одинаковом числе Z протонов) обладают одинаковым строением электронных оболочек.

Атомы с одинаковым числом Z протонов, но с разным числом N нейтронов в атомном ядре называются **изотопами** одного химического элемента (от греч. isos — одинаковый и topos — место). Изотоп химического элемента X , содержащий Z протонов в ядре и обладающий массовым числом A , обозначается так: A_ZX .

Разное число нейтронов в ядрах атомов одного химического элемента приводит к разным массам ядер изотопов и существенным различиям физических свойств атомных ядер изотопов. Например, в природе есть три вида атомов одного химического элемента водорода. Масса ядра самого лёгкого изотопа водорода равна примерно 1 а.е.м., масса ядра атома второго изотопа водорода — дейтерия — равна примерно 2 а.е.м., масса ядра атома третьего изотопа водорода — трития — равна около 3 а.е.м.

Атомная масса, определённая химическими методами, есть среднее значение масс атомов разных изотопов данного элемента.

Установки, не отличающиеся по принципу действия от масс-спектрографов, используются для промышленного разделения изотопов с целью получения значительных количеств одного из них. Так отделяется изотоп урана-235, пригодный для использования в атомной бомбе, от непригодного для этой цели изотопа урана-238.

Атомные единицы массы и энергии. В атомной и ядерной физике используется единица массы, называемая *атомной единицей массы* (1 а.е.м.). Атомная единица массы равна $1/12$ массы атома изотопа углерода-12. Одна атомная единица массы равна:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Энергию в ядерной физике часто выражают в мегаэлектронвольтах (1 МэВ):

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

При вычислении выделяемой или поглощаемой энергии в ядерных процессах удобно пользоваться переводом дефекта массы Δm в атомных единицах массы в энергию в мегаэлектронвольтах.

Дефекту массы 1 а.е.м. соответствует значение энергии:

$$\Delta E = \Delta mc^2 \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 \approx 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

Найдём значение энергии в мегаэлектронвольтах:

$$\Delta E \approx \frac{1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ}} \approx 931 \text{ МэВ.}$$

Более точный расчёт даёт значение 931,5 МэВ.

Для выражения изменения энергии ΔE системы в мегаэлектронвольтах нужно изменение массы Δm системы в атомных единицах массы умножить на переводной коэффициент 931,5 МэВ/а.е.м.

$$1 \text{ а.е.м.} = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Пример решения задачи

Задача. Вычислите энергию связи нуклонов в ядре атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$. Масса m_p ядра изотопа углерода равна 11,9967 а.е.м., масса m_p свободного протона равна 1,00728 а.е.м., масса m_n свободного нейтрона равна 1,00866 а.е.м.

Решение

Для вычисления энергии связи нуклонов в ядре атома изотопа углерода найдём дефект массы атомного ядра:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}},$$

$$\Delta m = 6 \cdot 1,00728 \text{ а.е.м.} + 6 \cdot 1,00866 \text{ а.е.м.} - 11,9967 \text{ а.е.м.} = 0,09894 \text{ а.е.м.}$$

Вычислим энергию связи атомного ядра:

$$\Delta E = \Delta m \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.},$$

$$\Delta E = 0,09894 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} = 92,1626 \text{ МэВ.}$$

$$\Delta E = 0,09894 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} = 92,1626 \text{ МэВ.}$$

Ответ: $\Delta E = 92,1626 \text{ МэВ.}$

Задача 23.2. Вычислите энергию связи нуклонов в ядре атома изотопа гелия ^4_2He . Масса ядра изотопа гелия равна 4,00151 а.е.м.

Задача 23.3. Вычислите удельную энергию связи нуклонов в ядре атома изотопа азота $^{14}_7\text{N}$. Масса ядра изотопа азота равна 13,99923 а.е.м.

Задача 23.4. Вычислите энергию, выделившуюся при образовании 1 кг атомных ядер гелия ^4_2He из свободных протонов и нейтронов. Сравните эту энергию с энергией, выделяющейся при сжигании 1 кг бензина. Масса ядра изотопа гелия равна 4,00151 а.е.м. Удельная теплота сгорания бензина равна 44 000 кДж/кг.

Задача 23.5. Вычислите энергию связи нуклонов в ядре атома алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$. Рассчитайте, какая энергия потребовалась бы для разделения 1 г ядер алюминия на составляющие протоны и нейтроны. Рассчитайте, сколько килограммов каменного угля потребуется сжечь для получения такой энергии. Масса ядра атома алюминия равна 26,974409 а.е.м. Удельная теплота сгорания каменного угля равна 30 000 кДж/кг.

? Вопросы

1. Что такое атомная единица массы?
2. Как измеряют массы атомных ядер?
3. Что такое изотопы?
4. Почему заряд ядра определяет химические свойства атома?
5. Почему атомы разных изотопов одного химического элемента обладают одинаковыми химическими свойствами?

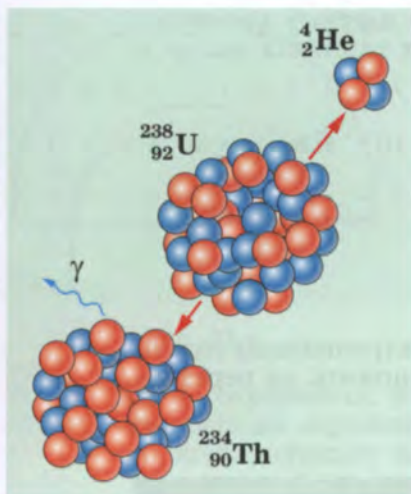


Рис. 24.1

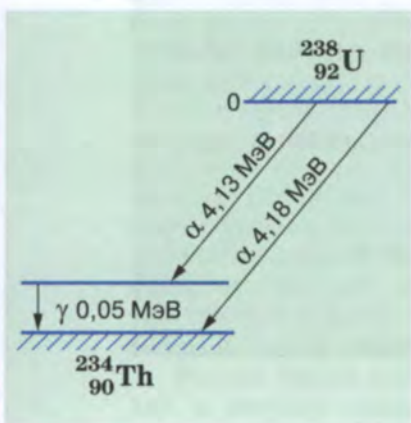


Рис. 24.2

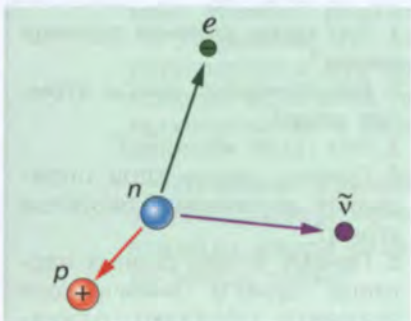


Рис. 24.3

Радиоактивность.

Радиоактивностью называется явление самопроизвольного превращения ядер одного химического элемента в ядра другого химического элемента.

Радиоактивные превращения ядер сопровождаются испусканием радиоактивных излучений. В природе наиболее часто встречаются два типа радиоактивных превращений — альфа-распад и бета-распад.

Альфа-распад. При альфа-распаде из радиоактивного ядра выбрасывается альфа-частица. **Альфа-частицей** называется ядро атома изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. При вылете альфа-частицы зарядовое число Z ядра уменьшается на две единицы, массовое число A уменьшается на четыре единицы. Например, при альфа-распаде ядра изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ — 92-го элемента таблицы Менделеева с массовым числом 238, получается ядро изотопа тория ${}^{234}_{90}\text{Th}$ — 90-го элемента таблицы Менделеева с массовым числом 234 (рис. 24.1). Процесс такого превращения атомного ядра записывается следующим образом:



Гамма-излучение. Атомные ядра имеют дискретный спектр возможных стационарных энергетических состояний. В основном состоянии с минимальной энергией ядра могут существовать длительное время или бесконечно долго. В возбуждённом состоянии атомное ядро находится очень короткое время, а затем самопроизвольно переходит в основное состояние, испуская квант электромагнитного излучения, называемый **гамма-квантом**.

Если в результате альфа-распада атомное ядро получает избыток энергии и оказывается в возбуждённом состоянии, то затем оно переходит в основное состояние, испуская гамма-квант. В этом случае альфа-распад сопровождается гамма-излучением.

Радиоактивные превращения изображаются энергетическими диаграммами. На рисунке 24.2 представлена энергетическая диаграмма альфа-распада ядра изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$. Диаграмма показывает, что одна часть ядер распадается с испусканием альфа-частиц с энергией 4,18 МэВ, другая часть ядер распадается с испусканием альфа-частиц с энергией 4,13 МэВ и гамма-квантов с энергией 0,05 МэВ.

Бета-распад. При электронном бета-распаде внутри атомного ядра происходит самопроизвольное превращение одного из нейтронов в протон, электрон и нейтральную частицу антинейтрино $\bar{\nu}$ с очень малой (или нулевой) массой (рис. 24.3).

Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, протон остаётся в ядре. Электрон, испущенный атомным ядром, называют **бета-частицей**. В результате электронного бета-распада число протонов в ядре увеличивается на единицу, число нейтронов уменьшается на единицу, а массовое число остаётся неизменным. Продуктом электронного бета-распада оказывается ядро изотопа химического эле-

мента с атомным номером на единицу больше атомного номера исходного ядра. Например, при электронном бета-распаде ядра изотопа алюминия $^{28}_{13}\text{Al}$ образуется ядро изотопа кремния $^{28}_{14}\text{Si}$ (рис. 24.4). При этом бета-распаде ядро-продукт находится в возбужденном состоянии и затем испускает гамма-квант (рис. 24.5).

Закон радиоактивного распада. Радиоактивный распад любого атомного ядра является случайным процессом. Момент времени распада какого-либо одного ядра предсказать невозможно, вероятность распада каждого из одинаковых ядер в любой момент времени одинакова. Число A распадов радиоактивных ядер одного изотопа в единицу времени прямо пропорционально числу N ядер:

$$A = \lambda N. \quad (24.1)$$

Коэффициент пропорциональности λ в выражении (24.1) называется **постоянной распада**. Постоянная распада λ имеет смысл вероятности распада одного ядра в течение одной секунды.

Радиоактивность вещества характеризуется физической величиной, называемой **активностью**. Активностью A называется отношение числа N радиоактивных распадов к времени t , за которое произошли эти распады:

$$A = \frac{N}{t}. \quad (24.2)$$

За единицу активности в Международной системе единиц принят **беккерель** (1 Бк). 1 Бк равен активности такого вещества, в котором за 1 с происходит один распад ядра:

$$1 \text{ Бк} = \frac{1 \text{ распад}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ распад/с.}$$

Убывание со временем числа N радиоактивных ядер и активности A в веществе происходит по закону, называемому **законом радиоактивного распада**. Особенность этого закона заключается в том, что за интервал времени, называемый **периодом полураспада** изотопа, число радиоактивных ядер уменьшается в 2 раза. За следующий такой же интервал времени число радиоактивных ядер уменьшается ещё в 2 раза и т. д., процесс распада продолжается (рис. 24.6).

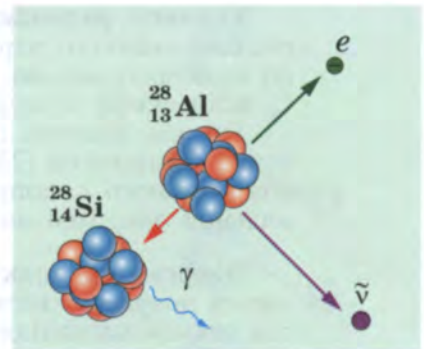


Рис. 24.4

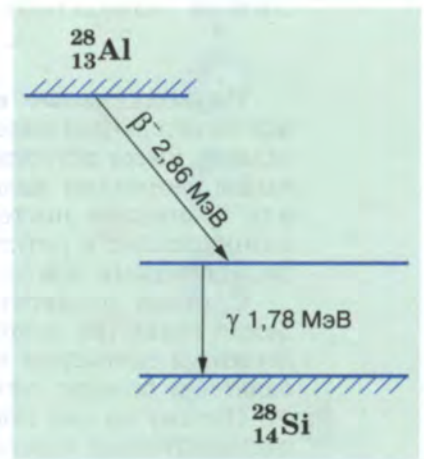


Рис. 24.5

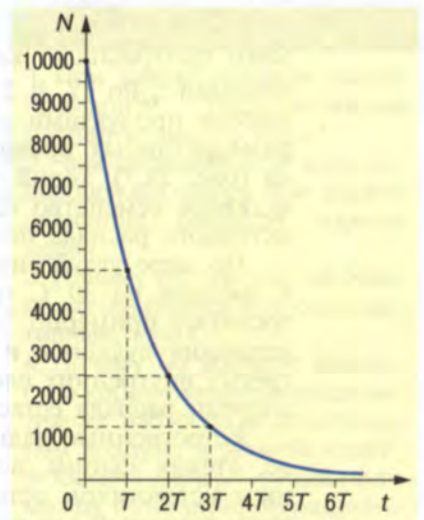


Рис. 24.6

? Вопросы

1. Что такое радиоактивность?
2. Что такое альфа-частица?
3. Как изменяется атомное ядро в результате альфа-распада?
4. Что такое гамма-излучение?
5. Как возникает гамма-излучение?
6. Как изображается процесс альфа-распада на энергетической диаграмме?
7. Что такое бета-частица?
8. Как изменяется атомное ядро в результате бета-распада?
9. Может ли возникать гамма-излучение при бета-распаде?
10. Как изображается процесс бета-распада на энергетической диаграмме?
11. По какому закону происходит радиоактивный распад атомных ядер?

Условие радиоактивного распада атомного ядра. Условие радиоактивного распада атомного ядра очень простое: данное ядро A обязательно рано или поздно самопроизвольно превратится в другое атомное ядро B с выбросом частицы C , если сумма масс ядра B и частицы C меньше массы ядра A : $m_A > m_B + m_C$.

Так как энергия покоя любого тела прямо пропорциональна его массе (уравнение Эйнштейна (23.4)), условие радиоактивного распада ядра является правилом обязательного самопроизвольного перехода атомного ядра в состояние с минимальной энергией покоя.

Энергия радиоактивного распада. При любом радиоактивном распаде выделяется энергия в виде кинетической энергии быстро движущихся частиц и квантов электромагнитного излучения. Энергию радиоактивного распада одного ядра можно вычислить по дефекту массы этого превращения. Дефект массы радиоактивного распада при превращении атомного ядра A в радиоактивное ядро B и частицу C равен разности:

$$\Delta m = m_A - m_B - m_C,$$

энергия радиоактивного распада равна:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Радиоактивные изотопы в природе. Радиоактивность не является редким и исключительным явлением в природе. Больше половины элементов таблицы Менделеева имеет естественные радиоактивные изотопы. **Естественными** радиоактивными изотопами называют такие изотопы, которые возникли в природе раньше или возникают постоянно без вмешательства человека. Радиоактивные изотопы, возникающие в результате деятельности человека, называют **искусственными** радиоактивными изотопами.

Самыми распространёнными естественными радиоактивными изотопами на Земле являются изотопы калия, урана и тория. В земной коре урана и тория содержится примерно столько же, сколько в ней имеется иода, олова, свинца, кобальта, и больше, чем серебра и ртути.

Почему до сих пор существуют самопроизвольно распадающиеся естественные радиоактивные изотопы, если возраст Земли превышает 4 млрд лет? На этот вопрос относительно урана и тория ответ очень простой: период полураспада радиоактивного изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$ равен 4,5 млрд лет, изотопа тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ — 14 млрд лет, а изотопа калия ${}_{19}^{40}\text{K}$ — 1,24 млрд лет. Поэтому за время существования Земли эти изотопы распались лишь частично.

Существование в природе таких радиоактивных изотопов с короткими периодами полураспада, как радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ ($T \approx 1600$ лет), радон ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ ($T \approx 3,82$ дня), полоний ${}_{84}^{218}\text{Po}$ ($T \approx 3$ мин) и ряда других изотопов, объясняется тем, что они являются продуктами распада урана и тория. Изотопы, возникающие в результате радиоактивных превращений урана, называются радиоактивным семейством урана (рис. 24.7), торий и продукты его радиоактивных превращений образуют радиоактивное семейство тория. Убыль ядер этих изотопов в природе в результате радиоактивного распада постоянно пополняется за счёт распадов новых ядер урана.

По мере углубления от поверхности Земли к её центру температура повышается в среднем на 30°C на каждый километр. На глубине 1000 км температура Земли достигает примерно 3000°C . Процессы движения материков и горообразования, извержения вулканов и землетрясения происходят в результате существования разогретых внутренних слоёв Земли, а разогревается Земля в значительной мере за счёт энергии распада естественных радиоактивных изотопов земных пород.

Естественные радиоактивные изотопы имеются в заметных количествах в почве, стенах зданий, воздухе, воде, пище, тканях человеческого организма. Основным источником естественной радиоактивности атмосферы является радиоактивный инертный газ радон, возникающий в результате альфа-распада радия. Радий содержится в небольших количествах практически во всех почвах, и повсюду в атмосферу выделяется радон.

В тканях растений, животных и человека в наибольшем количестве содержатся естественные радиоактивные изотопы калия и углерода. В 1 кг пшеничного хлеба за 1 мин происходит примерно 2000 распадов ядер изотопа калия $^{40}_{19}\text{K}$.

Радиоактивность углерода в биологических тканях обусловлена присутствием радиоактивного изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$. Этот изотоп с периодом полураспада 5570 лет образуется в верхних слоях земной атмосферы под действием потока быстрых заряженных частиц из космоса. Возникающий в атмосфере радиоактивный изотоп углерода усваивается растениями из воздуха. В одном грамме углерода биологического происхождения происходит примерно 15 распадов ядер радиоактивного изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ за 1 мин.

Задача 24.1. Масса ядра изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ равна 13,99995 а.е.м., масса ядра изотопа азота $^{14}_7\text{N}$ равна 13,99923 а.е.м., масса электрона равна 0,00055 а.е.м. Возможно ли самопроизвольное превращение ядра изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ в ядро изотопа азота $^{14}_7\text{N}$ путём бета-распада?

Задача 24.2. Масса ядра изотопа бора $^{10}_5\text{B}$ равна 10,01019 а.е.м., масса ядра изотопа лития ^6_3Li равна 6,01348 а.е.м., масса ядра изотопа гелия ^4_2He равна 4,00151 а.е.м. Возможно ли самопроизвольное превращение ядра изотопа бора $^{10}_5\text{B}$ в ядро изотопа лития ^6_3Li путём альфа-распада?

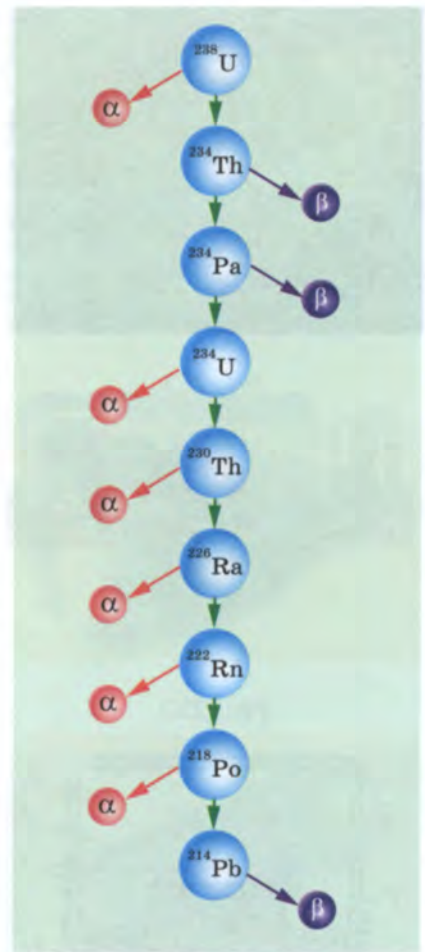


Рис. 24.7

Примеры решения задач

Задача 1. Вычислите энергию радиоактивного альфа-распада ядра изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$. Масса ядра изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$ равна 238,00032 а.е.м., масса ядра изотопа тория $^{234}_{90}\text{Th}$ равна 233,99421 а.е.м., масса ядра изотопа гелия ^4_2He равна 4,00151 а.е.м.

Решение

Найдём дефект массы этого распада:

$$\Delta m = m_{\text{U}} - m_{\text{Th}} - m_{\text{He}}$$

$$\Delta m = 238,00032 \text{ а.е.м.} - 233,99421 \text{ а.е.м.} - 4,00151 \text{ а.е.м.} = 0,0046 \text{ а.е.м.}$$

Вычислим энергию альфа-распада:

$$\Delta E = \Delta m \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \approx 4,28 \text{ МэВ.}$$

Задача 2. В 1 м³ комнатного воздуха содержится 200 млн атомов радиоактивного изотопа радона. Период полураспада радона 3,82 сут. Сколько ядер атомов радона из этого количества испытает радиоактивный распад за 7,64 сут.?

Решение

Интервал времени 7,64 сут. составляет два периода полураспада радона. За один период полураспада распадается примерно половина радиоактивных ядер, т. е. 100 млн ядер. За другой период полураспада распадается примерно половина из нераспавшихся 100 млн ядер, т. е. 50 млн ядер. Всего за 7,64 сут. испытает радиоактивный распад примерно 150 млн ядер атомов радона.

Вопросы

1. При каком условии может произойти радиоактивный распад атомного ядра?
2. Чем определяется энергия, освобождающаяся при радиоактивном распаде одного ядра?
3. Почему до сих пор на Земле не распались все радиоактивные ядра?
4. Почему не убывает количество короткоживущих радиоактивных изотопов в атмосферном воздухе, в земной коре?
5. Какая связь существует между естественной радиоактивностью и геологическими процессами на Земле?

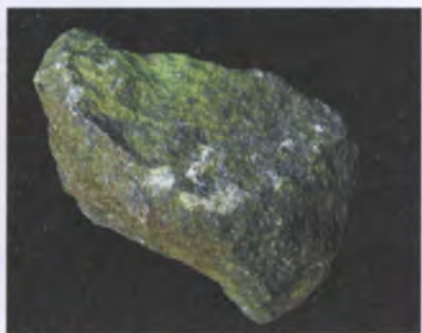


Рис. 25.1



Рис. 25.2

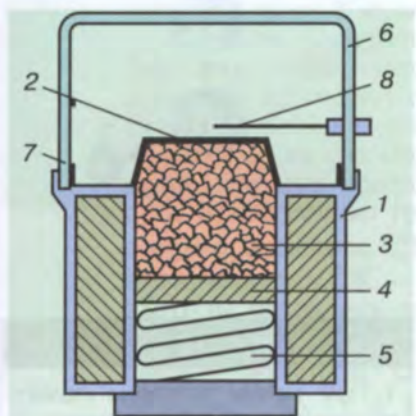


Рис. 25.3



Рис. 25.4

Фотографические эмульсии. Для регистрации ядерных излучений чаще всего используется способность частиц ионизировать и возбуждать атомы вещества. Беккерель обнаружил явление радиоактивности по воздействию радиации на *фотографические эмульсии*. Быстрые заряженные частицы при движении в фотоэмульсии ионизируют атомы и этим создают скрытые изображения следа движения. При проявлении фотоэмульсии обнаруживаются тёмные следы от воздействия частиц. На рисунке 25.1 представлена фотография куска урановой руды, положенного на фотопластинку, завернутую в чёрную бумагу, на рисунке 25.2 представлен след от воздействия радиоактивного излучения урана, обнаруженный на фотопластинке после её проявления.

Камера Вильсона. Следы движения заряженных частиц в газах наблюдают с помощью **камеры Вильсона**. Устройство одного из видов камеры для наблюдения следов частиц в газе, называемой конвекционной камерой, представлено на рисунке 25.3. Цилиндрический корпус 1 камеры изготавливается из материала с низкой теплопроводностью. В контейнер камеры загружается сухой лёд 3 (твёрдая углекислота). Пружина 5 давит на пластину 4 и прижимает сухой лёд к металлическому дну 2 камеры. На корпус камеры устанавливается прозрачная крышка 6. Стенка крышки выстилается изнутри полоской ткани 7. На дно камеры наливается немного спирта. Спирт смачивает ткань 7 и испаряется. Пары спирта конвекцией переносятся к охлаждённому до $-40 \dots -60 \text{ }^\circ\text{C}$ дну камеры. В результате охлаждения в слое воздуха толщиной несколько миллиметров над дном 2 камеры происходит переход паров спирта в пересыщенное состояние.

На конец металлического стержня 8, укрепленного в стенке крышки, наносится альфа-радиоактивное вещество. Ионы, возникающие вдоль траектории движения быстрой заряженной частицы, служат центрами конденсации пересыщенного пара. След частицы, состоящий из отдельных капелек, становится видимым невооружённым глазом.

Для улучшения условий наблюдения следов дно камеры окрашивается в чёрный цвет, камера освещается световым пучком, параллельным дну камеры.

Для очищения камеры от ранее возникших ионов в камере создаётся электрическое поле путём натирания суконкой стеклянной крышки. Внешний вид конвекционной камеры представлен на рисунке 25.4.

? Вопросы

1. Каков принцип действия конвекционной камеры?
2. Для чего в камере используется постоянное электрическое поле и как оно создаётся?
3. Возможно ли использование конвекционной камеры без твёрдой углекислоты?

Счётчик Гейгера—Мюллера. Регистрация всех видов ионизирующих излучений возможна с помощью газоразрядных счётчиков Гейгера—Мюллера (рис. 25.5). В газоразрядном счётчике имеются катод в виде цилиндра и анод в виде тонкой проволоки по оси цилиндра. Пространство между анодом и катодом заполняется специальной смесью газов при давлении около 0,1 нормального атмосферного давления. Между катодом и анодом прикладывается напряжение, немного меньшее, чем необходимо для начала самостоятельного электрического разряда в газе. Если между катодом и анодом счётчика какая-то частица ионизирует молекулы газа, то под действием электрического поля освобождённые из атомов электроны движутся к аноду, положительные ионы — к катоду. При приближении к аноду электроны в сильном электрическом поле приобретают дополнительную энергию и при столкновениях с нейтральными атомами ионизируют их. Освобождённые электроны, в свою очередь, в электрическом поле анода приобретают дополнительную энергию и ионизируют всё больше нейтральных атомов. Процесс ионизации продолжается, и развивается лавина из электронов и положительных ионов. Фотоны, испускаемые возбуждёнными атомами, освобождают с анода новые электроны и порождают новые электронные лавины до распространения электрического разряда по всему объёму счётчика. Этот процесс завершается за миллионные доли секунды. В результате нахождение через рабочий объём одной ионизирующей частицы газоразрядный счётчик отвечает импульсом электрического тока, регистрируемым электронным прибором (рис. 25.6).



Рис. 25.5



Рис. 25.6



Рис. 25.7

Сцинтилляционный метод. В сцинтилляционном методе для регистрации используются кристаллы, способные испускать свет под воздействием быстрых заряженных частиц. Вспышки света, возникающие в кристаллах сернистого цинка при ударах альфа-частиц, Резерфорд наблюдал через лупу. В современных сцинтилляционных счётчиках вспышки света в кристаллах регистрируются фотоэлектронными приборами, использующими явление вырывания электронов с поверхности тел под действием фотонов света (рис. 25.7). В приборе, называемом фотоумножителем, поток освобождённых электронов усиливается в миллионы раз и регистрируется электронным устройством. Интенсивность световой вспышки и импульс тока пропорциональны энергии регистрируемой частицы, поэтому сцинтилляционным методом можно измерять энергию частиц.

@ Найдите

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/a15.htm>
(Детекторы частиц.)

<http://extim1.narod.ru/schetch.htm>
(Трековые камеры и счётчики.)

? Вопросы

1. Как устроен счётчик Гейгера—Мюллера?
2. Каков принцип действия счётчика Гейгера—Мюллера?
3. Какое физическое явление используется при регистрации ионизирующих излучений сцинтилляционным методом?

Экспериментальное задание 25.1

Работаем в группе**Наблюдение треков альфа-частиц в камере Вильсона**

Оборудование: камера для наблюдения следов альфа-частиц, пробирка со смесью этилового спирта и воды, резиновая груша.

Подготовьте к работе камеру Вильсона и проведите наблюдение следов альфа-частиц.



Рис. 25.8

Для наблюдения треков быстрых заряженных частиц в работе применяется школьная камера Вильсона. Она состоит из пластмассового кольца с наклеенными на него с двух сторон двумя прозрачными пластинами из органического стекла. В пластмассовое кольцо вмонтирован также металлический стержень, на конце которого имеется альфа-радиоактивное вещество.

В кольцо вмонтирован штуцер, который через резиновый шланг соединён с резиновой грушей (рис. 25.8). После медленного сжатия груши и быстрого её отпускания в результате быстрого расширения воздух в камере охлаждается, пары воды и спирта становятся пересыщенными и происходит их конденсация на ионах.

Порядок выполнения задания

1. Откройте пробирку со смесью спирта и воды. Вставьте в пробирку наконечник резиновой груши, проведите несколько сжатий и расширений, для того чтобы груша заполнилась насыщенными парами смеси.

2. Соедините резиновую грушу гибким шлангом с камерой Вильсона. Произведите несколько лёгких сжатий и расширений груши для заполнения рабочего объёма камеры насыщенными парами смеси.

3. Поместите камеру Вильсона на тёмную подставку. Если освещённость на месте проведения опыта мала, включите настольную лампу и осветите камеру сверху. Для очищения рабочего объёма от ионов, возникших ранее, нужно создать внутри камеры электрическое поле. Это поле создаётся электризацией верхней плексигласовой крышки при натирании её куском шерстяной ткани.



Рис. 25.9

4. Для наблюдения следов альфа-частиц медленно сожмите грушу, а затем быстро отпустите её. Если степень сжатия окажется удачной, то на ионах, возникших вдоль траектории движения альфа-частиц, произойдёт конденсация пересыщенного пара. Капельки тумана образуют трек — видимый след движения альфа-частиц (рис. 25.9).

Если треки частиц в первом опыте не обнаружатся, то, изменяя степень сжатия, повторяйте операции сжатия и расширения воздуха до тех пор, пока не добьётесь успеха.

Содержание работы

Вылетающие из атомных ядер при радиоактивном распаде альфа- и бета-частицы обладают кинетической энергией порядка миллиона электронвольт. При движении в газе они ионизируют нейтральные атомы вещества, создавая положительные и отрицательные ионы. Если в газе имеются пары в пересыщенном состоянии, то на этих ионах происходит конденсация капель жидкости. Цепочка капель жидкости вдоль траектории движения быстрой заряженной частицы образует видимый след, называемый **треком** частицы.

Для наблюдения треков быстрых заряженных частиц в работе применяется школьная камера Вильсона. Она состоит из пластмассового кольца с наклеенными на него с двух сторон двумя прозрачными пластинами из органического стекла. В пластмассовое кольцо вмонтирован также металлический стержень, на конце которого имеется альфа-радиоактивное вещество.

Экспериментальное задание 25.2

Работаем в паре

Измерение естественного радиационного фона и исследование радиоактивности предметов

Оборудование: дозиметр-радиометр АНРИ-01-02 «Сосна».

Измерьте естественный радиационный фон и исследуйте, радиоактивны ли окружающие предметы.

Порядок выполнения задания

1. Внешний вид радиометра «Сосна» представлен на рисунке 28.2. Детекторами ионизирующей радиации в радиометре «Сосна» являются два счётчика Гейгера—Мюллера, расположенные за металлической крышкой на задней стенке прибора (рис. 25.10). Для регистрации естественного радиационного фона нужно поставить правый переключатель «Вкл.» в левое положение, а левый переключатель режима работы в положение «Т» и включить прибор нажатием на кнопку «Пуск/Стоп». Одновременно следует запустить секундомер или заметить момент включения прибора по часам. Каждая зарегистрированная ионизирующая частица будет увеличивать показания на цифровом дисплее на единицу.

Через 5 мин нажмите на кнопку «Стоп» и запишите число N_{Φ} зарегистрированных частиц.

2. Разделив число N_{Φ} зарегистрированных частиц на время t мин регистрации, вычислите скорость счёта A_{Φ}

естественного фона: $A_{\Phi} = \frac{N_{\Phi}}{t}$.

3. Поместите около счётчика предмет, который вы хотите проверить на наличие в нём радиоактивных изотопов. Включите прибор и зарегистрируйте число импульсов от счётчика Гейгера—Мюллера за 5 мин. Вычислите скорость счёта в импульсах за 1 мин. Если предмет содержит радиоактивные изотопы, то скорость счёта A_n с исследуемым предметом около счётчика должна быть выше скорости счёта A_{Φ} фона.

Нужно учитывать, что из-за случайного характера процесса радиоактивного распада регистрируемое число импульсов за одинаковое время в каждом новом опыте будет неодинаковым. При регистрации A_n импульсов за 1 мин случайные отклонения обычно не больше величины $\sqrt{A_n}$.

Поэтому можно считать, что число A_n зарегистрированных импульсов при наличии исследуемого предмета превышает число A_{Φ} импульсов фона за то же время, если выполняется условие $A_n - A_{\Phi} > 2\sqrt{A_n}$.

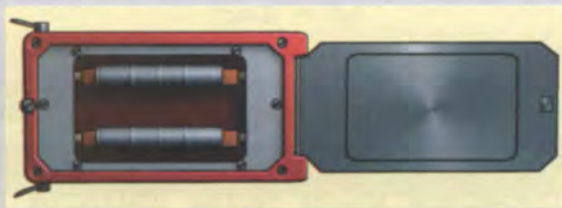


Рис. 25.10

? Вопросы

1. Что представляет собой след альфа-частицы в камере Вильсона?
2. Почему следы альфа-частиц наблюдаются только после расширения газа?
3. Для чего производится электризация крышки камеры?

? Вопросы

1. Какие частицы регистрирует счётчик Гейгера—Мюллера при отсутствии радиоактивного вещества вблизи него?
2. Опасны ли для здоровья человека излучения естественного радиационного фона, регистрируемые счётчиком Гейгера—Мюллера?
3. Для чего при использовании прибора со счётчиком Гейгера—Мюллера нужно обязательно сначала измерять скорость счёта от естественного радиационного фона?
4. При измерении естественного радиационного фона счётчик зарегистрировал 100 импульсов за 1 мин, а при наличии исследуемого предмета зарегистрировал 101 импульс за 1 мин. Можно ли на основании таких результатов с уверенностью утверждать, что от исследуемого предмета за 1 мин была зарегистрирована одна частица?



Рис. 26.1

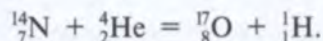
Вопросы

1. Что называется ядерной реакцией?
2. Почему для осуществления ядерных реакций заряженные частицы должны обладать высокими энергиями?
3. Почему под действием протонов ядерные реакции осуществляются только при высоких значениях их энергии, а под действием нейтронов ядерные реакции осуществляются при любых значениях энергии?
4. Что называется выходом ядерной реакции?
5. Как вычисляется выход ядерной реакции?
6. Может ли выход ядерной реакции иметь отрицательное значение?

Ядерная реакция.

Ядерной реакцией называется взаимодействие частицы или атомного ядра с другим атомным ядром, приводящее к превращению этого ядра в новое ядро.

Первая ядерная реакция была обнаружена Резерфордом в 1919 г. Он установил, что в результате столкновения альфа-частицы с ядром азота происходит превращение ядра атома азота в ядро атома кислорода и ядро атома водорода:



На рисунке 26.1 представлена фотография следов альфа-частиц в камере Вильсона, заполненной азотом. Расходящиеся веером светлые прямые линии — это следы альфа-частиц. Более тонкий длинный след, идущий поперёк следов альфа-частиц, — это след протона, освобождённого при расщеплении ядра азота, а ядро изотопа кислорода ${}^{17}_8\text{O}$ создало короткий толстый след.

Ядерные реакции между частицами происходят только при их сближении до расстояния, на котором действуют ядерные силы притяжения. Это расстояние, называемое **радиусом действия** ядерных сил, составляет примерно $1,4 \cdot 10^{-15}$ м. На таких расстояниях кулоновские силы отталкивания между одноимёнными зарядами протонов очень велики. Поэтому ядерные реакции под действием заряженных частиц возможны только при значениях энергии частиц от нескольких мегаэлектронвольт до десятков мегаэлектронвольт. При меньших значениях энергии кулоновские силы отталкивания отбрасывают заряженные частицы от атомного ядра.

Для осуществления ядерных реакций заряженные частицы под действием электрических полей разгоняют до высоких энергий в *ускорителях заряженных частиц*.

Ядерные реакции под действием нейтронов могут происходить при любых значениях энергии нейтронов, так как нейтрон не отталкивается от ядра кулоновскими силами.

Выход ядерной реакции. При ядерной реакции энергия покоя продуктов реакции может быть больше или меньше энергии покоя частиц, вступающих в реакцию. Изменение энергии покоя частиц в результате ядерной реакции называется **выходом ядерной реакции**. Выход ядерной реакции ΔE вычисляется по разности Δm масс частиц, вступающих в реакцию, и продуктов реакции:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Если суммарная масса частиц, вступающих в ядерную реакцию, больше суммарной массы частиц продуктов реакции ($\Delta m > 0$), то выход ядерной реакции положительный — энергия выделяется.

Если суммарная масса вступающих в реакцию частиц меньше суммарной массы частиц продуктов реакции, ($\Delta m < 0$), то при осуществлении реакции энергия поглощается.

Цепные ядерные реакции. В 1938 г. было открыто, что при поглощении нейтрона ядро атома изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$ делится на две примерно одинаковые части, называемые **осколками ядра**. В результате действия кулоновских сил отталкивания между одноимёнными зарядами осколки ядра приобретают кинетическую энергию около 200 МэВ (рис. 26.2).

Процесс деления ядер урана сопровождается испусканием двух или трёх нейтронов. Эти нейтроны способны вызвать деление новых ядер урана с испусканием новых нейтронов, и процесс может продолжаться со всё большим числом новых ядер. Такой процесс называется **цепной ядерной реакцией** (рис. 26.3).

На практике цепные реакции осуществляются не так просто. Освобождающиеся при делении ядер урана нейтроны способны вызвать деление лишь ядер изотопа урана с массовым числом 235, а ядра изотопа урана с массовым числом 238 под действием этих нейтронов не делятся. В природном уране на долю изотопа ^{238}U приходится 99,3%, а на долю изотопа ^{235}U — лишь 0,7%. Поэтому в природном уране большинство нейтронов захватывается без реакции деления, цепная реакция не идёт. Возможным путём осуществления цепной реакции является получение в чистом виде изотопа ^{235}U .

Критическая масса. Из-за малых размеров атомных ядер большинство нейтронов пролетает сквозь атомы, не попав в ядро. Поэтому необходимым условием для осуществления цепной реакции является наличие достаточно большого количества урана-235, чтобы на пути нейтронов было много атомов. Минимальная масса урана, достаточная для осуществления цепной реакции, называется **критической массой**.

Термоядерные реакции. В природе ядерные реакции осуществляются в недрах звёзд и являются основным источником их энергии. Большинство звёзд состоит в основном из водорода и гелия. В центральной части температура достигает 15 миллионов градусов. При такой температуре все атомы ионизированы и вещество находится в состоянии плазмы — газа из положительных ионов и свободных электронов. Кинетическая энергия некоторых самых быстрых атомных ядер оказывается достаточной для преодоления действия кулоновских сил отталкивания одноимённо заряженных ядер и осуществления ядерной реакции соединения двух лёгких ядер в одно более тяжёлое ядро.

Ядерные реакции, осуществляющиеся за счёт высокой температуры вещества, называются термоядерными реакциями.

@ Найдите

<http://class-fizika.narod.ru/at15.htm> (Термоядерная реакция.)

<http://www.physbook.ru/index.php/> (Деление урана.)

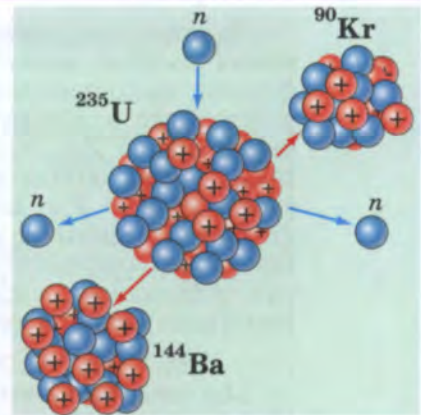


Рис. 26.2



Рис. 26.3

? Вопросы

1. Каков источник кинетической энергии осколков ядра урана при его делении под действием нейтрона?
2. Что такое цепная реакция деления?
3. Почему цепная реакция деления осуществляется в уране, но не осуществляется в большинстве других веществ?
4. Что такое термоядерные реакции?
5. Почему Солнце не взорвалось в результате осуществления термоядерных реакций синтеза гелия из водорода, а светит миллиарды лет примерно одинаково?

Законы сохранения при осуществлении ядерных реакций. Законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда, установленные в классической физике, выполняются и в любых ядерных превращениях. Любое атомное ядро A , вступающее в ядерную реакцию, содержит целое число Z_1 протонов и обладает зарядом $q_1 = Z_1 e$. Частица B , вступающая в ядерное взаимодействие с ядром A , также может обладать только электрическим зарядом q_2 , кратным элементарному заряду e , $q_2 = Z_2 e$. Каждый из продуктов ядерной реакции C и D также обладает электрическим зарядом, кратным элементарному заряду e , $q_3 = Z_3 e$ и $q_4 = Z_4 e$. По закону сохранения электрического заряда сумма электрических зарядов частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме электрических зарядов частиц-продуктов ядерной реакции:

$$q_1 + q_2 = q_3 + q_4, \quad Z_1 e + Z_2 e = Z_3 e + Z_4 e, \quad Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4.$$

Мы получили, что закон сохранения электрического заряда при осуществлении ядерных реакций можно сформулировать в очень простой форме: сумма зарядовых чисел частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядовых чисел частиц-продуктов реакции.

Это простое правило позволяет определить зарядовое число одного неизвестного продукта ядерной реакции по известным зарядовым числам частиц, вступающих в реакцию, и зарядовым числам остальных частиц-продуктов реакции.

Кроме известных в классической физике законов сохранения энергии, импульса и электрического заряда, в ядерных процессах всегда выполняется ещё один закон сохранения: при любых ядерных реакциях сохраняется число нуклонов (если не участвуют в превращениях античастицы — антипротоны и антинейтроны). Это значит, что сумма массовых чисел частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме массовых чисел частиц, являющихся продуктами ядерной реакции.

В случае образования двух частиц-продуктов ядерной реакции этот закон сохранения можно записать в виде равенства:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4.$$

В таблице 26.1 представлены два примера ядерных реакций с записью сохраняющихся величин.

Таблица 26.1

Реакция	$Z_1 + Z_2$	$Z_3 + Z_4$	$A_1 + A_2$	$A_3 + A_4$
${}^1_7\text{N} + {}^4_2\text{He} = {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$	$7 + 2 = 9$	$8 + 1 = 9$	$14 + 4 = 18$	$17 + 1 = 18$
${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} = {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	$1 + 1 = 2$	$2 + 0 = 2$	$2 + 2 = 4$	$3 + 1 = 4$

Примеры решения задач

Задача 1. Вычислите силы кулоновского взаимодействия двух половин атомного ядра урана и скажите, смогли бы вы удержать эти две половины ядра от разлетаания, если бы между ними не действовали ядерные силы притяжения? Радиус ядра урана равен примерно $1,6 \cdot 10^{-14}$ м.

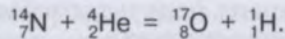
Решение

Примем, что расстояние между электрическими зарядами половин ядра урана находится на расстоянии R радиуса ядра, заряд q каждой половины равен 46 элементарным зарядам e . Применим закон Кулона для вычисления сил отталкивания:

$$F = k \frac{q \cdot q}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{46 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 46 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(1,6 \cdot 10^{-14})^2} \approx 1900 \text{ Н.}$$

Ответ: $F \approx 1900$ Н.

Задача 2. Вычислите энергетический выход первой ядерной реакции, открытой Резерфордом:



Масса ядра атома азота равна 13,99923 а.е.м., масса ядра атома кислорода равна 16,99473 а.е.м., масса ядра атома гелия равна 4,00151 а.е.м., масса ядра атома водорода равна 1,00728 а.е.м.

Решение

Для вычисления выхода ядерной реакции найдём дефект массы:

$$\Delta m = m_{\text{N}} + m_{\text{He}} - m_{\text{O}} - m_{\text{H}}, \Delta m = 13,99923 \text{ а.е.м.} + 4,00151 \text{ а.е.м.} - 16,99473 \text{ а.е.м.} - 1,00728 \text{ а.е.м.} = -0,00127 \text{ а.е.м.}$$

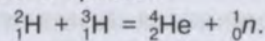
Вычислим выход ядерной реакции:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = -0,00127 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \approx -1,18 \text{ МэВ.}$$

Знак «минус» показывает, что эта реакция идёт с поглощением энергии.

Ответ: $\Delta E \approx -1,18 \text{ МэВ.}$

Задача 3. Вычислите энергетический выход ядерной реакции синтеза ядра гелия из ядер изотопов дейтерия и трития:



Масса ядра атома дейтерия ${}^2_1\text{H}$ равна 2,01355 а.е.м., масса ядра атома трития ${}^3_1\text{H}$ равна 3,01550 а.е.м., масса ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$ равна 4,00151 а.е.м., масса нейтрона ${}^1_0\text{n}$ равна 1,00866 а.е.м.

Решение

Для вычисления выхода ядерной реакции найдём дефект массы:

$$\Delta m = m_{2\text{H}} + m_{3\text{H}} - m_{4\text{He}} - m_{\text{n}},$$

$$\Delta m = 2,01355 \text{ а.е.м.} + 3,01550 \text{ а.е.м.} - 4,00151 \text{ а.е.м.} - 1,00866 \text{ а.е.м.} = 0,001189 \text{ а.е.м.}$$

Вычислим выход ядерной реакции:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0,001189 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \approx 1,1 \text{ МэВ.}$$

Это одна из ядерных реакций, за счёт осуществления которой светит Солнце.

Ответ: $\Delta E \approx 1,1 \text{ МэВ.}$

Задача 26.1. При столкновении атомных ядер изотопов водорода дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$ произошла ядерная реакция и образовались ядро изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ и какая-то частица X. Какая это частица? Чему равны массовое число A и зарядовое число Z этой частицы?

Задача 26.2. При попадании альфа-частицы в атомное ядро изотопа бериллия ${}^9_4\text{Be}$ происходит ядерная реакция с возникновением свободного нейтрона. Какое атомное ядро-продукт образуется в результате такой ядерной реакции? Чему равны массовое число A и зарядовое число Z этого ядра? Запишите эту реакцию с помощью символов.

Задача 26.3. При попадании нейтрона в какое-то атомное ядро X происходит ядерная реакция с возникновением ядер изотопа криптона ${}^{93}_{36}\text{Kr}$ и изотопа бария ${}^{140}_{56}\text{Ba}$ с освобождением трёх нейтронов. Чему равны массовое число A и зарядовое число Z ядра X? Запишите эту реакцию с помощью символов.

Задача 26.4. Вычислите энергетический выход следующих ядерных реакций:

- 1) ${}^1_1\text{H} + {}^2_1\text{H} = {}^3_2\text{He} + \gamma;$
- 2) ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} = {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{H};$
- 3) ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n};$
- 4) ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} = {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H};$
- 5) ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} = {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}.$

Массы атомных ядер

$${}^1_0\text{n} - 1,00866 \text{ а.е.м.}$$

$${}^1_1\text{H} - 1,00728 \text{ а.е.м.}$$

$${}^2_1\text{H} - 2,01355 \text{ а.е.м.}$$

$${}^3_1\text{H} - 3,01550 \text{ а.е.м.}$$

$${}^3_2\text{He} - 3,01493 \text{ а.е.м.}$$

$${}^4_2\text{He} - 4,00151 \text{ а.е.м.}$$

$${}^{27}_{13}\text{Al} - 26,97441 \text{ а.е.м.}$$

$${}^{30}_{15}\text{P} - 29,97008 \text{ а.е.м.}$$

Ядерный реактор. При делении 1 кг ядер урана выделяется примерно в 2,5 млн раз больше энергии, чем при сжигании 1 кг каменного угля. Поэтому цепные реакции деления ядер урана используются для получения энергии в ядерных реакторах на атомных электростанциях.

Для осуществления управляемой цепной реакции деления ядер урана необходимо было решить ряд сложных научных и технических проблем. Первая научная проблема заключалась в том, что цепная реакция деления ядер урана не осуществляется сама собой в природном уране. Природный уран состоит на 99,3% из атомов изотопа урана-238 и на 0,7% из атомов изотопа урана-235. Нейтроны, испущенные в процессе деления, способны вызвать деление только ядер урана-235, а ядра урана-238 после поглощения таких нейтронов не делятся. В природном уране большинство нейтронов, освободившихся при делении ядер урана-235, бесполезно поглощается ядрами урана-238, так как их в 140 раз больше, чем ядер урана-235.

Управляемая цепная ядерная реакция осуществляется в **ядерном реакторе** с использованием в качестве ядерного горючего в виде смеси изотопов урана-238 и урана-235 с повышенным содержанием изотопа урана-235. Может использоваться и природный уран. Для того чтобы нейтроны не поглощались бесполезно ядрами урана-238, в реакторах применяются **замедлители**. В качестве замедлителя нейтронов в реакторах обычно используются вещества, содержащие водород (вода), или графит. Медленные нейтроны слабо взаимодействуют с ядрами изотопа урана-238 и эффективно взаимодействуют с ядрами изотопа урана-235.

Так как размеры ядер очень малы, вероятность попадания нейтрона в ядро урана невелика. Поэтому при малом количестве урана в реакторе большинство нейтронов выходит из него, не встретив на своём пути ни одного ядра урана. Цепная реакция в реакторе может развиваться в том случае, если количество урана в нём больше некоторого минимального значения. Минимальная, но достаточная для развития цепной реакции деления масса урана называется **критической массой**. Для реакторов на природном уране значение критической массы оказывается довольно большим. Полная загрузка ядерного реактора мощностью 3 млн кВт составляет 190 т урана.

Схема устройства ядерного реактора, в котором вода является замедлителем нейтронов и теплоносителем, представлена на рисунке 27.1. Ядерное горючее, содержащее смесь изотопов урана-235 и урана-238, находится на стенках теплоделяющих элементов. Нейтроны, освобождающиеся при делении ядер урана, попадают в воду или графит, заполняющие стальной бак реактора. При столкновении с лёгкими ядрами атомов водорода или углерода нейтроны быстро теряют кинетическую энергию, их скорость уменьшается до скорости теплового движения атомов. Такие нейтроны, называемые тепловыми нейтронами, при попадании в ядра атомов изотопа урана-235 вызывают новые реакции деления.

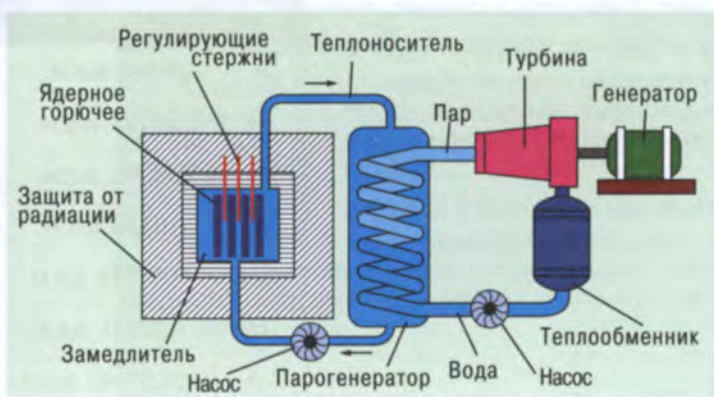


Рис. 27.1

Чтобы цепная реакция не привела к очень большому выделению энергии и взрыву реактора, необходимо непрерывно регулировать ход её развития. Управление ходом цепной реакции осуществляется с помощью регулирующих стержней, содержащих бор или кадмий. Автоматическое устройство при превышении заданного уровня мощности даёт команду на опускание управляющих стержней. Ядра атомов бора и кадмия эффективно поглощают тепловые нейтроны. Поглощение части нейтронов уменьшает число делений ядер урана в единицу времени, мощность выделения

энергии уменьшается. При снижении уровня мощности ниже заданного уровня даётся команда на поднятие управляющих стержней. Поглощение нейтронов уменьшается, число делений ядер урана в единицу времени увеличивается, мощность выделения энергии возрастает.

Кинетическая энергия осколков ядер урана-235 поглощается в стенках тепловыделяющих элементов и превращается во внутреннюю энергию. Выделяющаяся теплота передаётся теплоносителю — воде. Вода в реакторе под давлением около 100 атм нагревается до температуры около 300 °С. С помощью насоса горячая вода прокачивается по трубам через парогенератор и отдаёт полученную теплоту воде в трубах парогенератора. Эта вода в результате нагревания превращается в пар при температуре около 230 °С и давлении около 30 атм. Пар направляется на лопасти паровой турбины. Паровая турбина вращает ротор электрогенератора. Так производится электроэнергия на атомных электростанциях (АЭС).

Для защиты обслуживающего персонала от воздействия нейтронов и гамма-излучения, возникающих при работе реактора, реактор окружён толстым слоем защиты из бетона.

Пример решения задачи

Задача. Тепловая мощность современного ядерного реактора на атомной электростанции равна 3 млрд Вт. Вычислите расход урана-235 за год. Сколько природного урана нужно использовать для получения такого количества урана-235? Сколько урановой руды с содержанием 0,1% урана нужно переработать для получения такого количества урана? Выход реакции деления ядра урана равен 200 МэВ.

Решение

Выразим выход ядерной реакции деления ядра урана в джоулях:

$$E = 200 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Вычислим число ядер урана-235, делящихся в реакторе за 1 с при мощности выделения энергии в нём 3 млрд Вт:

$$n = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ Вт}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}} \approx 9,4 \cdot 10^{19} \text{ ядер/с}.$$

Число ядер, делящихся за год, равно:

$$N = nt \approx 9,4 \cdot 10^{19} \text{ ядер/с} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} \approx 3 \cdot 10^{27} \text{ ядер}.$$

Масса m ядра изотопа урана-235 в килограммах равна:

$$m \approx 235 \text{ а.е.м.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг/а.е.м.} \approx 3,90 \cdot 10^{-25} \text{ кг}.$$

Вычислим массу M урана-235, расходуемого в реакторе за год:

$$M = mn \approx 3,90 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^{27} \approx 1170 \text{ кг}.$$

Масса M_n природного урана с таким количеством урана-235 равна:

$$M_n \approx M \cdot 140 \approx 164 \text{ 000 кг}.$$

Масса руды M_p ещё в 1000 раз больше:

$$M_p \approx 164 \text{ 000 000 кг} \approx 164 \text{ 000 т}.$$



Найдите

<http://class-fizika.narod.ru/mm9/htm>

(Анимация «Работа ядерного реактора.»)



Вопросы

1. Почему в природном уране цепная реакция деления не осуществляется сама собой?
2. Для чего в ядерных реакторах используются вещества, называемые замедлителями?
3. Что замедляет замедлитель?
4. Почему на медленных (тепловых) нейтронах может происходить цепная реакция деления ядер урана-235 даже в природном уране?
5. Что такое критическая масса ядерного горючего?
6. Зачем реактору нужен теплоноситель?
7. Для чего в реакторе есть управляющие стержни?
8. Почему в управляющих стержнях используются элементы бор и кадмий?
9. Как с помощью управляющих стержней регулируется работа реактора?
10. Для чего реактору нужен прочный стальной корпус?
11. Почему для вращения паровой турбины не используется нагретая в реакторе вода, а используется вода, нагретая в теплообменнике?
12. Для чего реактор окружён толстыми стенами из бетона?

Ядерная энергетика. По оценкам экспертов, разведанных запасов нефти хватит примерно на 40 лет, а газа — на 60 лет. Близость к исчерпанию запасов нефти и газа на Земле заставляет искать альтернативные источники энергии. Одним из альтернативных источников энергии является энергия цепной реакции деления ядер урана.

1 кг природного урана по освобождаемой энергии эквивалентен 20 т угля. Поэтому в 20 тыс. раз уменьшаются расходы на транспортировку горючего и его хранение. Атомные электростанции при нормальной работе почти совсем не загрязняют атмосферу выбросами вредных веществ. Себестоимость выработанной на АЭС электроэнергии более чем в 2 раза ниже себестоимости электроэнергии при сжигании нефти и газа на тепловых электростанциях.

На начало 2005 г. в 31 стране мира находился в эксплуатации 441 блок АЭС общей мощностью 367 ГВт, из них 104 блока в США, 59 во Франции, 54 в Японии, 31 в России. На АЭС во всём мире производится примерно 16% электроэнергии, а во Франции — 78%.

Развитие ядерной энергетики во многих странах мира было приостановлено после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. В этой аварии произошёл выброс в атмосферу около 7 т ядерного топлива с радиоактивными продуктами деления ядер урана. Эти продукты привели к радиоактивному загрязнению большой площади земной поверхности в нескольких странах.

В настоящее время разработаны более надёжные ядерные реакторы и в стадии строительства в мире находятся 22 блока АЭС общей мощностью 17,6 ГВт.

Существует ещё проблема захоронения радиоактивных отходов. Необходимо создать такие хранилища радиоактивных отходов, из которых радиоактивные изотопы гарантированно не могли бы попасть в почву, реки, атмосферу Земли на протяжении столетий.



Рис. 27.2

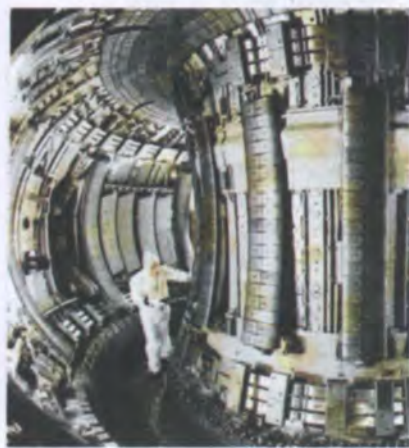


Рис. 27.3

Термоядерный синтез. Возможным альтернативным источником энергии является энергия термоядерного синтеза. Для осуществления ядерной реакции синтеза ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ необходимо нагреть водород до 100 000 000 °С, что в 7 раз выше температуры в недрах Солнца. При такой температуре атомы любого вещества ионизируются, вещество превращается в плазму — смесь свободно движущихся атомных ядер и электронов.

Одним из способов удержания плазмы от соприкосновения со стенками нагревательной камеры является использование магнитного поля. Заряженные частицы плазмы в тороидальной (в форме пустого бублика) камере (рис. 27.2) можно удерживать от столкновений со стенками камеры с помощью магнитного поля, силовые линии которого расположены окружностями внутри этого «бублика». Такое магнитное поле, создаваемое обмоткой, заставляет частицы двигаться по спиральным траекториям вокруг линий магнитного поля.

В экспериментальных установках удалось нагреть плазму до 70 000 000 °С и удерживать 1 с (рис. 27.3).

Для дальнейших исследований разработан международный проект экспериментального реактора. В нём учёные

предполагают нагреть плазму из дейтерия и трития до 100 000 000 °С и удерживать 400 с с выделением мощности 500 МВт. Камера для плазмы в этой установке будет высотой 8 м, сверхпроводящие катушки будут создавать удерживающее магнитное поле, а обмотка трансформатора будет создавать индукционный ток 20 000 000 А в плазме, как во вторичной обмотке.

Атомная бомба. Цепная реакция деления тяжёлых ядер используется в ядерном оружии. В зависимости от конструкции атомной бомбы критическая масса изотопа урана-235 может иметь значения от 15 до 50 кг. При плотности урана $19 \cdot 10^3$ кг/м³ диаметр шара из урана такой массы 12—17 см. Простейший способ осуществления цепной реакции в уране заключается в изготовлении нескольких частей из металлического урана-235, каждая массой несколько меньше критической. Цепная реакция в каждой из них в отдельности не идёт. При быстром соединении этих частей развивается цепная реакция и выделяется огромная энергия. Температура урана превышает миллион градусов, уран и все другие вещества превращаются в пар. Происходит ядерный взрыв, раскалённый шар расширяется, всё сжигая и разрушая.

Первые атомные бомбы были изготовлены в США в 1945 г. Взрывами этих бомб были уничтожены японские города Хиросима и Нагасаки. При взрыве такой бомбы происходит деление ядер урана общей массой примерно 1 кг и освобождается энергия $8,4 \cdot 10^{13}$ Дж, эквивалентная взрыву 20 000 т тринитротолуола (20 килотонн ТНТ).

Термоядерная бомба. В термоядерной бомбе основная часть энергии освобождается в процессе осуществления реакций синтеза ядер гелия из ядер изотопов водорода — дейтерия и трития. Для приведения в действие термоядерной бомбы взрывается находящаяся в ней обычная атомная бомба. При этом взрыве температура повышается до миллионов градусов. При такой температуре и высоком давлении дейтерий и тритий вступают в термоядерную реакцию синтеза с образованием ядер гелия.

Часто термоядерными бомбами называют ещё более мощные трёхступенчатые бомбы, или супербомбы. В таких бомбах используется способность атомных ядер основного природного изотопа урана-238 испытывать деление под действием быстрых нейтронов. Эти нейтроны освобождаются при осуществлении термоядерного синтеза гелия из водорода во время взрыва термоядерной бомбы. В такой бомбе может происходить деление ядер урана-238 общей массой в сотни и даже тысячи килограммов. При делении 1 т ядер урана освобождается энергия $8,3 \cdot 10^{16}$ Дж, что эквивалентно взрыву 20 млн т тринитротолуола (бомба в 20 Мт ТНТ).

Общая мощность ядерного оружия на Земле эквивалентна примерно 15 млрд т химических взрывчатых веществ, почти по 3 т взрывчатки на каждого жителя Земли. Эти запасы так велики, что возникновение войны с применением накопленного ядерного оружия приведёт к глобальной катастрофе, в которой не окажется ни победителей, ни побеждённых. Вызванные взрывами пожары могут создать столько дыма в земной атмосфере, что на несколько месяцев наступит «ядерная ночь», приводящая к понижению температуры над сушей на 30—40 °С и наступлению «ядерной зимы». Кроме гибели миллионов людей в воюющих странах, радиоактивное загрязнение поверхности планеты продуктами деления ядер урана может сделать непригодной для жизни человека всю поверхность суши на Земле.

Взаимодействие излучений с веществом. Частицы разных видов ионизирующих излучений неодинаково взаимодействуют с веществом. Альфа-частицы ионизируют или возбуждают почти каждый атом вещества на своём пути и растрачивают свою энергию на коротком пути. Длина пробега альфа-частиц в воздухе при нормальном атмосферном давлении составляет несколько сантиметров, в жидкостях и твёрдых телах — сотые доли миллиметра.

Бета-частицы менее эффективно взаимодействуют с атомами вещества, их пробег в воздухе при атмосферном давлении может достигать нескольких метров, в жидкостях и твёрдых телах — нескольких миллиметров.

Гамма-кванты и нейтроны имеют большую проникающую способность. Для защиты от них необходимы стены толщиной несколько десятков сантиметров или даже несколько метров.

Поглощённая доза излучения. Действие ионизирующих излучений на вещество характеризуют **поглощённой дозой излучения** D , равной отношению энергии E , переданной излучением веществу, к массе m вещества:

$$D = \frac{E}{m}.$$

Единица поглощённой дозы излучения называется *грей* (1 Гр). 1 Гр равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 кг передаётся энергия ионизирующего излучения 1 Дж: 1 Гр = 1 Дж/кг. Отношение поглощённой дозы излучения D к времени t облучения называется **мощностью дозы излучения**.

Эквивалентная доза излучения. Различные излучения при одинаковой поглощённой дозе оказывают разное биологическое действие. Биологическое действие разных излучений сравнивается с биологическим действием рентгеновского или гамма-излучения с помощью коэффициента k относительной биологической эффективности. Произведение поглощённой дозы излучения D на коэффициент k относительной биологической эффективности называется **эквивалентной дозой** H :

$$H = kD.$$

Единица эквивалентной дозы называется *зиверт* (1 Зв). Эквивалентную дозу 1 Зв вещество получает при поглощённой дозе излучения 1 Гр от излучения с относительной биологической эффективностью k , равной единице. Такой эффективностью обладают гамма- и бета-излучения. Альфа-излучение имеет значение коэффициента k , равное 20. Поэтому при поглощённой дозе 1 Гр альфа-излучение оказывает биологическое действие 20 Зв, равное действию 20 Гр гамма-излучения.

Естественный радиационный фон. Естественный радиационный фон обусловлен внешним и внутренним облучением тела человека.

Внешнее облучение создаётся космическим излучением и гамма-излучением естественных радиоактивных изотопов, содержащихся в горных породах, почве, атмосфере.

Космическое излучение состоит в основном из протонов и ядер атомов гелия с энергиями от 10^9 до 10^{15} эВ. Через каждый 1 см^2 в межпланетном пространстве около Земли проходит примерно 1 частица в секунду. В верхних слоях земной атмосферы эти частицы сталкиваются с ядрами атомов и вызывают ядерные реакции. Возникающие в результате этих ядерных реакций вторичные частицы — электроны, гамма-кванты и частицы, называемые мю-мезонами, — достигают поверхности Земли.

При удалении от поверхности Земли поглощающий излучение слой атмосферы становится всё тоньше, поэтому доза облучения от космического излучения увеличивается. На уровне моря люди получают от космического излучения эквивалентную дозу около 0,3 мЗв в год или примерно 0,03 мкЗв в час. Живущие в

горах люди получают большую дозу от космического излучения. При перелёте из Москвы во Владивосток пассажир самолёта получает от космического излучения дозу около 20 мкЗв.

Внутреннее облучение создаётся излучениями естественных радиоактивных изотопов, находящихся в тканях человеческого организма и попадающих внутрь человека при дыхании и питании (калий-40, уран, торий, радон и др.).

Уровень естественного радиационного фона в большинстве мест на Земле находится в диапазоне от 1 до 10 мЗв в год, на значительных территориях он составляет 10—20 мЗв, а в некоторых местах достигает нескольких десятков миллизиверт.

В качестве среднего значения естественного радиационного фона обычно принимают от 3 до 5 мЗв в год.

К естественному радиационному фону добавляется эквивалентная доза около 1—2 мЗв облучения человека от различных искусственных источников ионизирующей радиации, в первую очередь при рентгеновских обследованиях и лечении с применением радиации. Например, при флюорографии эквивалентная доза равна примерно 0,8 мЗв, а при рентгеноскопии лёгких — около 10 мЗв.

Среднее значение суммы естественного и искусственного радиационного фона для человека оценивается в 4—7 мЗв в год.

Предельно допустимые дозы облучения. Любое ионизирующее излучение может причинить вред здоровью человека. Зная это, многие люди испытывают панический страх при одном упоминании о радиоактивности. Нужно ли тотчас бежать от того места, где слышны щелчки прибора со счётчиком Гейгера, регистрирующего ионизирующую радиацию?

Правильный ответ на этот вопрос такой: **следует избегать по возможности всех мест с повышенным уровнем радиации.** Что значит формулировка «по возможности»? Насколько и по сравнению с чем допустимо повышение уровня радиации?

Нужно помнить, что явление радиоактивности не создано, а только открыто учёными. Радиоактивные изотопы различных химических элементов существовали на Земле до появления человека, существуют сейчас и будут существовать ещё миллиарды лет. Снизить уровень естественного фона человек не может.

Но не следует переживать по поводу существования естественного радиационного фона. Жизнь на Земле возникла в условиях его существования. Все животные и растения в процессе эволюции приспособились к воздействию этого фактора окружающей среды.

Исследованиями состояния здоровья населения регионов Земли с уровнем естественного фона на 10—20 мЗв в год выше среднего значения не обнаружено неблагоприятного влияния на здоровье людей. Поэтому признано **допустимым для населения техногенное увеличение радиационного фона в среднем на 1 мЗв в год и не более 5 мЗв за 1 год.** Это не более 20—30% от среднего уровня естественного фона радиации. Предельно допустимой дозе дополнительного облучения 5 мЗв в год соответствует мощность дозы

$$\frac{5 \text{ мЗв}}{365 \cdot 24 \text{ ч}} \approx 0,6 \text{ мкЗв/ч,}$$

т. е. 0,6 микрозиверт в час.

Для персонала АЭС и других предприятий, связанных с возможным облучением людей ионизирующей радиацией, в России установлена **предельно допустимая доза облучения 20 мЗв/год в среднем за 5 лет, но не более 50 мЗв за 1 год,** что не выходит за пределы уровня естественного фона радиации в отдельных местах Земли.

Биологическое действие ионизирующих излучений. Физическое воздействие ядерных излучений на любое вещество заключается в основном в ионизации и возбуждении атомов и молекул. В клетках живых организмов эти процессы оказываются опасными для живого существа при очень малых значениях энергии, переданной организму от излучения. Поглощённая доза гамма-излучения 7 Гр при облучении всего тела человека приводит к возникновению лучевой болезни и смерти человека. При такой дозе облучения в организме человека массой 70 кг выделяется энергия 490 Дж. Эта энергия равна количеству теплоты, получаемому всего от одной чайной ложки горячей воды. Каким образом при таком малом количестве переданной энергии ионизирующая радиация приводит к гибели человека?

Биологическое воздействие ионизирующей радиации на живой организм обусловлено химическими процессами, происходящими в живых клетках после их облучения. При дозе 6 Гр в 1 см^3 ткани происходит ионизация примерно 10^{15} молекул. Возникновение положительных и отрицательных ионов (в первую очередь молекул воды) за миллионные доли секунды приводит к осуществлению различных химических реакций с образованием химических веществ, вредных для живой клетки. Некоторые отрицательные воздействия произошедших биохимических изменений в клетках проявляются уже через несколько секунд после облучения, другие могут привести к гибели клетки или её раковому перерождению через десятилетия.

При эквивалентной дозе общего облучения менее 0,25 Зв никаких клинических признаков заболевания человека не обнаруживается. Но установлено, что любые дозы облучения увеличивают вероятность раковых заболеваний и генетических дефектов у детей облучённых родителей. Поэтому общим правилом работы с источниками ионизирующей радиации является снижение уровня радиации до возможно малого значения.

При дозе облучения 0,5 Зв обнаруживается временное изменение состава крови. При облучении всего организма человека дозой 3—5 Зв около 50% облучённых умирают от лучевой болезни. Основной причиной смерти людей при лучевой болезни является поражение клеток костного мозга, вырабатывающего лейкоциты крови. Из-за резкого снижения их количества организм человека становится беззащитным перед любыми болезнетворными микроорганизмами.

Измерение доз излучения. В приборе для измерения доз излучения, называемом ионизационной камерой, на два электрода подаётся постоянное напряжение. При облучении камеры ионизирующей радиацией в воздухе между её электродами образуются положительные и отрицательные ионы и возникает электрический ток. Сила тока в ионизационной камере пропорциональна мощности дозы излучения.

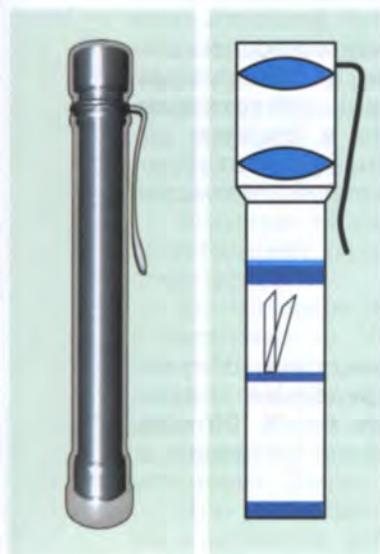


Рис. 28.1

Карманный дозиметр. В карманном дозиметре используется маленькая ионизационная камера в форме авторучки. Измерение поглощённой дозы излучения таким дозиметром производится с помощью миниатюрного электрометра, за показаниями которого можно наблюдать в небольшой микроскоп (рис. 28.1). Электрометр заряжается, и его нить отклоняется. При облучении дозиметра ионизирующей радиацией вследствие ионизации воздуха электрометр постепенно разряжается. Его показания пропорциональны поглощённой дозе.

Измерение мощности дозы внешнего облучения. Доза внешнего облучения человека рентгеновским или гамма-излучением может быть измерена с помощью ионизационной камеры по ионизирующему воздействию на воздух. Это воздействие измеряется в *рентгенах* (1 Р). При дозе 1 Р в 1 см^3 воздуха образуется $2 \cdot 10^9$ пар ионов. Дозе гамма-излучения 1 Р соответствует эквивалентная доза 8,8 мЗв. Отсюда допустимой для населения мощности эквивалентной дозы 0,6 мкЗв/ч соответствует мощность дозы в рентгенах примерно 0,07 мР/ч.

Связь дозы облучения с активностью и массой радиоактивного вещества.

Дозу облучения от радиоактивных изотопов, попавших внутрь организма человека, нельзя измерить дозиметром, но можно вычислить, если известны вид излучения и активность. Рассмотрим пример такого вычисления.

Пример решения задачи

Задача. Радиоактивный изотоп полония-210 излучает альфа-частицы с энергией 5,3 МэВ. Активность 1 г полония-210 равна $1,6 \cdot 10^{14}$ Бк, т. е. в 1 г полония-210 происходит $1,6 \cdot 10^{14}$ распадов в секунду. Какая масса полония-210 при попадании в организм человека массой 70 кг приведёт к получению смертельно опасной эквивалентной дозы облучения 7 Зв за одну неделю?

Решение

Найдём поглощённую дозу излучения D , при которой альфа-излучение создаёт эквивалентную дозу облучения H , равную 7 Зв. Коэффициент относительной биологической эффективности k для альфа-излучения равен 20, поэтому смертельно опасная эквивалентная доза облучения 7 Зв создаётся поглощённой дозой:

$$D = \frac{H}{k}, \quad D = \frac{7 \text{ Зв}}{20 \text{ Зв/Гр}} = 0,35 \text{ Гр.}$$

Вычислим энергию E , переданную альфа-излучением телу человека массой 70 кг, при поглощённой дозе 0,35 Гр: $E = mD$, $E = 70 \text{ кг} \cdot 0,35 \text{ Гр} = 24,5 \text{ Дж}$.

Выразим энергию E_1 одной альфа-частицы в джоулях:

$$E_1 = 5,3 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ} = 8,48 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Найдём число N альфа-частиц, несущих энергию 24,5 Дж:

$$N = \frac{E}{E_1} = \frac{24,5 \text{ Дж}}{8,48 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} \approx 2,9 \cdot 10^{13}.$$

Число n альфа-частиц, испускаемых 1 г полония-210 за неделю, равно:

$$n = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1} \text{ г}^{-1} \cdot 7 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 9,7 \cdot 10^{19} \text{ г}^{-1}.$$

Разделив число N альфа-частиц, создающих смертельно опасную эквивалентную дозу, на число n альфа-частиц, испускаемых 1 г полония-210 за неделю, найдём массу полония в граммах:

$$m = \frac{N}{n} = \frac{2,9 \cdot 10^{13}}{9,7 \cdot 10^{19} \text{ г}^{-1}} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ г.}$$

Ответ: $m \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ г}$.

Экспериментальное задание 28.1**Работаем самостоятельно****Измерение мощности эквивалентной дозы**

Оборудование: дозиметр АНРИ-01-02 «Сосна».

Измерьте мощность эквивалентной дозы радиоактивного фона.

Детекторами ионизирующей радиации в этом радиометре являются счётчики Гейгера—Мюллера. Для использования прибора в качестве дозиметра переключатель режима работы нужно поставить в положение «МД» и нажать кнопку «Пуск/Стоп» (рис. 28.2). В приборе включится автоматическое устройство и остановится счёт импульсов через заданный интервал времени. Этот интервал времени выбран таким, что число зарегистрированных импульсов автоматически переводится в мощность экспозиционной дозы в миллирентгенах в час (1 мР/ч). Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в миллирентгенах в час переводится в мощность эквивалентной дозы в микрозивертах в час умножением на 8,8.



Рис. 28.2

Тест 3

Тест предназначен для самоконтроля результатов изучения раздела
«Квантовые явления»

Работу над заданиями теста следует проводить так же, как рекомендовано на с. 32 для теста 1.

- A1.** В опытах Резерфорда рассеяние альфа-частиц при прохождении через тонкие слои вещества происходило в результате их взаимодействия с атомными ядрами силами
- 1) электрического взаимодействия
 - 2) магнитного взаимодействия
 - 3) гравитационного взаимодействия
 - 4) ядерного взаимодействия
- A2.** Линейчатый спектр излучения, состоящий из отдельных линий различного цвета, получается в спектроscope при разложении призмой света, испускаемого
- 1) любыми телами, нагретыми до высокой температуры
 - 2) твёрдыми телами, нагретыми до высокой температуры
 - 3) жидкими телами, нагретыми до высокой температуры
 - 4) газами, нагретыми до высокой температуры
- A3.** Согласно гипотезе Бора электромагнитное излучение испускается или поглощается атомами только при их переходах из одного стационарного состояния в другое. Энергия E кванта излучения при таком переходе равна $E = h\nu$. Что означают буквы h и ν в этой формуле?
- 1) ν — постоянная Планка, h — частота излучения
 - 2) h — постоянная Планка, ν — частота излучения
 - 3) h — постоянная Планка, ν — количество вещества в молях
 - 4) h — длина волны, ν — частота
- A4.** Явление радиоактивности было открыто Беккерелем при исследовании
- 1) рентгеновского излучения
 - 2) невидимого излучения урана
 - 3) невидимого излучения радия
 - 4) невидимого ультрафиолетового излучения
- A5.** Испускаемое атомными ядрами при радиоактивном распаде электромагнитное излучение высокой энергии называется
- 1) альфа-излучением
 - 2) бета-излучением
 - 3) рентгеновским излучением
 - 4) гамма-излучением
- A6.** Самопроизвольное превращение ядра одного химического элемента в ядро другого химического элемента
- 1) называется радиоактивным распадом
 - 2) называется ядерной реакцией
 - 3) называется ядерным взрывом
 - 4) невозможно
- A7.** В ядре атома с массовым числом 17 и зарядовым числом 8 содержится
- 1) 17 нейтронов и 8 протонов
 - 2) 17 протонов и 8 нейтронов
 - 3) 9 нейтронов и 8 протонов
 - 4) 8 нейтронов и 9 протонов
- A8.** Дефект массы, заключающийся в том, что масса атомного ядра меньше суммы масс свободных протонов и нейтронов, из которых состоит ядро ($m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$), наблюдается
- 1) у всех атомных ядер
 - 2) только у радиоактивных ядер
 - 3) только у стабильных ядер
 - 4) только у ядер урана
- A9.** После того как ядро урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ испытало альфа-распад, получилось ядро-продукт с зарядовым числом Z и массовым числом A , равными
- 1) $Z = 93, A = 238$
 - 2) $Z = 90, A = 238$
 - 3) $Z = 90, A = 234$
 - 4) $Z = 88, A = 236$
- A10.** Из трёх видов радиоактивных излучений, называемых альфа-излучением, бета-излучением и гамма-излучением, потоком электронов является
- 1) альфа-излучение
 - 2) бета-излучение
 - 3) гамма-излучение
 - 4) любое из трёх излучений

A11. Если имеется 1000 радиоактивных ядер с периодом полураспада 2 ч, то через 4 ч

- 1) распадутся все ядра
- 2) распадётся точно 250 ядер
- 3) распадётся примерно 250 ядер
- 4) распадётся точно 750 ядер
- 5) распадётся примерно 750 ядер

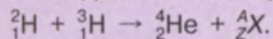
A12. Прибор со счётчиком Гейгера—Мюллера регистрирует излучение в результате возникновения под действием ионизирующей частицы

- 1) вспышки света в кристалле
- 2) следа из капель жидкости, образующихся в газе на ионах
- 3) электрического разряда в газе и протекания импульса тока
- 4) ядерной реакции

A13. Из ионизирующих излучений самой малой проникающей способностью обладает

- 1) альфа-излучение
- 2) бета-излучение
- 3) гамма-излучение
- 4) рентгеновское излучение

A14. При столкновении ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ с ядром трития ${}^3_1\text{H}$ произошла ядерная реакция с образованием ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ и освобождением частицы X:



Чему равны зарядовое число Z и массовое число A частицы X, освобожденной в этой реакции?

- 1) $Z = 1, A = 1$
- 2) $Z = 2, A = 4$
- 3) $Z = 1, A = 0$
- 4) $Z = 0, A = 1$

A15. Цепная реакция деления ядер урана оказывается возможной только в достаточно большом количестве урана (критическая масса) потому, что если масса используемого урана меньше критической, то из-за малых размеров атомных ядер

- 1) большинство осколков ядер вылетает из используемого урана, не попав ни в одно из ядер урана
- 2) большинство освобождающихся при делении альфа-частиц вылетает из используемого урана, не попав ни в одно из ядер урана
- 3) большинство освобождающихся при делении гамма-квантов вылетает из используемого урана, не попав ни в одно из ядер урана
- 4) большинство освобождающихся при делении нейтронов вылетает из используемого урана, не попав ни в одно из ядер урана

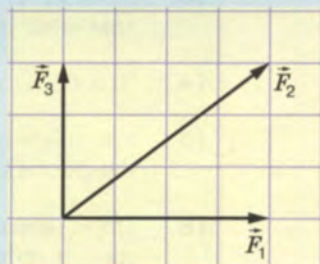
Задания для подготовки к итоговому контролю

1. Зависимость пройденного телом пути от времени при прямолинейном движении имеет вид $s = 10t + 2t^2$ (м). Чему равна начальная скорость движения тела?

2. Модуль скорости тела при прямолинейном движении изменяется со временем по закону $v = 16 + 2t$ (м/с). Чему равно ускорение тела?

3. При равномерном движении автомобиля по окружности со скоростью 10 м/с его центростремительное ускорение равно 2 м/с². Чему будет равно центростремительное ускорение автомобиля при равномерном движении по той же траектории со скоростью 5 м/с?

4. На рисунке представлены три вектора сил, лежащие в одной плоскости и приложенные к одной точке тела. Модули векторов \vec{F}_1 , \vec{F}_2 и \vec{F}_3 равны соответственно 8 Н, 10 Н и 6 Н. Найдите модуль равнодействующей этих трёх сил.



5. На автоматическую межпланетную станцию на поверхности Земли действует сила гравитационного притяжения 1600 Н. Чему будет равен модуль силы гравитационного притяжения, действующей на эту станцию на поверхности планеты, масса которой в 4 раза меньше массы Земли, а радиус в 2 раза больше радиуса Земли?
6. При начале движения поезда со стороны электровоза на вагоны общей массой 500 т действует сила $5 \cdot 10^5$ Н, при этом состав начинает двигаться с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Чему равен модуль силы трения, действующей на поезд?
7. Человек массой 50 кг прыгнул с берега в неподвижную лодку массой 200 кг. Лодка вместе с человеком стала двигаться со скоростью 1 м/с. Какой была скорость человека во время прыжка?
8. Автомобиль массой 500 кг двигался по шоссе со скоростью 20 м/с, навстречу ему двигался автомобиль массой 2 т со скоростью 10 м/с. Автомобили столкнулись и двигались далее вместе. Какое количество энергии было израсходовано на разрушение автомобилей в момент столкновения?
9. Гиря массой 0,5 кг из состояния покоя падает с высоты 2 м на пружину жёсткостью 2000 Н/м. Чему равно максимальное значение деформации пружины при полном превращении кинетической энергии гири в потенциальную энергию упругой деформации пружины?
10. При движении искусственного спутника вокруг Земли по эллиптической орбите его кинетическая энергия при минимальном расстоянии от Земли равна $8 \cdot 10^5$ Дж. В точке максимального удаления от Земли кинетическая энергия спутника уменьшается на $6 \cdot 10^5$ Дж. Как изменяются при этом потенциальная энергия спутника и его полная механическая энергия?
11. За один цикл работы двигателя внутреннего сгорания при сжигании топлива в цилиндре выделилась энергия 50 Дж и продукты сгорания передали атмосферному воздуху 30 Дж энергии. Какую механическую работу совершил поршень?
12. Как Резерфорд объяснил рассеяние небольшой доли альфа-частиц после прохождения через тонкий слой металла на большие углы от первоначального направления движения?
13. Почему спектр излучения вещества в газообразном состоянии при высокой температуре и низком давлении состоит из отдельных цветных линий?
14. Что происходит с атомным ядром при электронном бета-распаде?
15. Как изменяются зарядовое число Z и массовое число A атомного ядра при альфа-распаде?
16. Определите, какая частица X освободилась при осуществлении ядерной реакции, в которой под действием нейтрона ядро азота превратилось в ядро углерода:

$${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + X.$$
17. Вычислите энергию связи нуклонов в ядре атома изотопа водорода ${}^3_1\text{H}$. Масса m_n ядра изотопа водорода равна 3,01550 а.е.м., масса m_p свободного протона равна 1,00728 а.е.м., масса m_n свободного нейтрона равна 1,00866 а.е.м.

Строение Вселенной

29	Геоцентрическая система мира	132	33	Физическая природа Солнца и звёзд	148
30	Гелиоцентрическая система мира	136	34	Строение и эволюция Вселенной	152
31	Физическая природа планет Солнечной системы	140	35	Как и зачем делаются научные открытия	156
32	Малые тела Солнечной системы. Происхождение Солнечной системы	144			



§ 29. Геоцентрическая система мира



Рис. 29.1



Рис. 29.2



Рис. 29.3

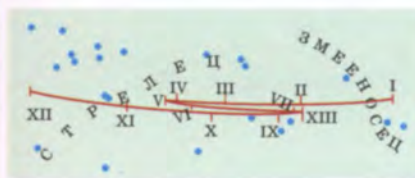


Рис. 29.4

Видимые движения небесных светил. Наблюдения за движением Солнца, Луны, планет и звёзд люди вели с глубокой древности. На основании таких наблюдений они высказывали предположения об устройстве мира. Древние индусы думали, что Землю держат четыре слона, стоящие на гигантской черепахе, плавающей в океане (рис. 29.1).

Считается, что идею о шарообразности Земли впервые высказал в VI в. до н. э. древнегреческий учёный Пифагор. Для доказательства шарообразности Земли Аристотель (384—322 гг. до н.э.) приводил тот факт, что во время лунных затмений край тени Земли на диске Луны всегда имеет форму дуги окружности. Причина такой формы тени в том, что Земля шарообразная (рис. 29.2). На основании наблюдений за небесными светилами у людей возникла мысль об отсутствии опоры под Землёй. Каждый вечер Солнце опускается за горизонт на западе, а утром поднимается с противоположной стороны Земли. Значит, под Землёй есть свободное пространство для перемещения Солнца. Но это ещё не всё. Звёзды на небе только невнимательному наблюдателю кажутся неподвижными. Наблюдениями установлено, что звёзды не изменяют взаимного расположения на небе, а движутся так, как будто они прикреплены к сфере, совершающей оборот вокруг Земли за сутки. Звёзд на небе неисчислимое множество, и каждая из них заходит на западе, проходит путь под Землёй и восходит на востоке. Если звёзды были бы укреплены на хрустальной сфере, то такая сфера снесла бы любые опоры под Землёй! Так что никаких опор под Землёй нет.

На вопрос о том, почему же Земля без опоры не падает вниз, можно ответить вопросом: а где расположен низ? А на этот вопрос обычно отвечают, что низ там, куда падают все тела. Все тела падают по направлению к центру Земли. Отсюда гипотеза об устройстве мира: все тела обладают свойством стремления к центру мира, а центр мира совпадает с центром Земли. Земле некуда падать: её центр находится в центре мира.

Геоцентрическая система мира. Так сложилась **геоцентрическая система мира** (по имени греческой богини Земли *Геи*). Согласно этой системе в центре Вселенной находится шарообразная Земля, а вокруг Земли вращаются сфера звёзд и сферы Солнца, Луны и пяти планет — Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна (рис. 29.3).

Создание геоцентрической системы мира оказалось непростой задачей. Планеты непрерывно изменяют положение относительно звёзд, и каждая планета движется по своему. Они то отстают от суточного движения звёзд, то останавливаются на одном месте среди звёзд, то движутся быстрее звёзд. На рисунке 29.4 представлен видимый путь Марса относительно звёзд.

? Вопросы

1. Какие основания были для гипотезы о шарообразности Земли?
2. Какие современные доказательства шарообразности Земли вам известны?
3. Какие основания были для гипотезы об уединённости Земли?

По представлениям древнегреческих философов, вечно может продолжаться только равномерное движение по окружности, поэтому так должны двигаться все небесные тела. Платон в IV в. до н. э. поставил перед своими учениками задачу: объяснить видимые неравномерные движения небесных светил комбинацией круговых равномерных движений. Для решения этой задачи Эвдокс разработал систему из 27 сфер. Попятные движения планет он объяснил введением дополнительных малых планетных сфер или кругов, эпициклов, центры которых вращаются по больши́м кругам (рис. 29.5).

Эту систему мира через 5 столетий усовершенствовал александрийский астроном Клавдий Птолемей (ок. 90—ок. 160), поэтому геоцентрическую систему мира часто называют **птолемеевской системой мира**. Результаты расчётов Птолемея приблизились к результатам наблюдений, но полного согласия между ними не было. Поэтому он сказал однажды: «Легче, кажется, двигать самые планеты, чем постичь их сложное движение».

Определение расстояний до небесных тел и сравнение размеров Земли, Луны и Солнца. Древнегреческий учёный Аристарх (ок. 310—ок. 250 гг. до н. э.) с острова Самос первым из астрономов сумел оценить сравнительные размеры Земли, Луны и Солнца и расстояния от Земли до Луны и до Солнца. Он рассуждал так: в то время когда мы наблюдаем Луну в виде половины светлого круга, угол ЗЛС между направлениями от Луны на Солнце и на Землю равен 90° (рис. 29.6). Измерив угол ЛЗС между направлениями от Земли на Солнце и на Луну, можно из прямоугольного треугольника ЗЛС выразить длину гипотенузы ЗС через длину катета ЗЛ. По его измерениям следовало, что расстояние от Земли до Солнца примерно в 19 раз больше расстояния от Земли до Луны. Угловые размеры дисков Луны и Солнца почти одинаковы, поэтому диаметр Солнца в 19 раз больше диаметра Луны. Наблюдая размеры тени от Земли на диске Луны во время лунных затмений, Аристарх Самосский пришёл к выводу, что диаметр Земли в 3 раза больше диаметра Луны. Отсюда следовало, что диаметр Солнца в 6 раз больше диаметра Земли, а по объёму Солнце более чем в 200 раз превосходит Землю.

Точность измерений Аристарха Самосского была невелика, так как все наблюдения проводились невооружённым глазом (до изобретения телескопа оставалось почти 19 столетий!). В действительности расстояние от Земли до Солнца примерно в 400 раз больше расстояния от Земли до Луны, а диаметр Солнца в 109 раз больше диаметра Земли. Однако на основе своих наблюдений и расчётов Аристарх Самосский сделал правильные выводы об устройстве мира, опередившие время на 2000 лет.

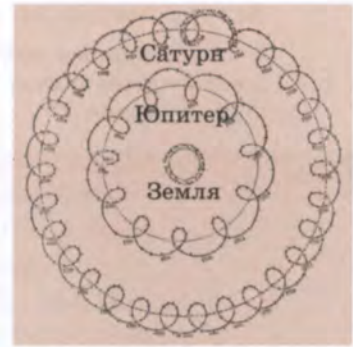


Рис. 29.5



Клавдий Птолемей



Рис. 29.6



Вопросы

1. Какие основания были для гипотезы о центральном положении Земли во Вселенной?
2. Какая система мира называется геоцентрической системой мира?
3. Какой принципиальный недостаток у геоцентрической системы мира?
4. Какие астрономические открытия сделал Аристарх Самосский?

Астрономические наблюдения

Наблюдение звёздного неба обычно проводят в тёмное время суток, поэтому рекомендуем выполнять экспериментальные задания 29.1 и 29.2 с участием взрослых членов семьи.

Экспериментальное задание 29.1

Работаем дома

Знакомство с созвездиями и яркими звёздами

Оборудование: карта звёздного неба, электрический фонарь.

Для ознакомления с созвездиями выйдите в ясную ночь на открытое место вдали от уличных фонарей. Встаньте лицом в сторону севера и раскройте звёздную карту. Отыщите на небе созвездие Большой Медведицы. Семь самых ярких звёзд этого созвездия образуют фигуру, напоминающую ковш с длинной изогнутой ручкой. Самая яркая звезда любого созвездия обозначается буквой α греческого алфавита, вторая по яркости — буквой β и т. д. Отыщите на небе звёзды α и β Большой Медведицы. Проведя мысленно прямую от звезды β к звезде α Большой Медведицы и отложив пять отрезков, равных расстоянию между этими звёздами, вы найдёте Полярную звезду.

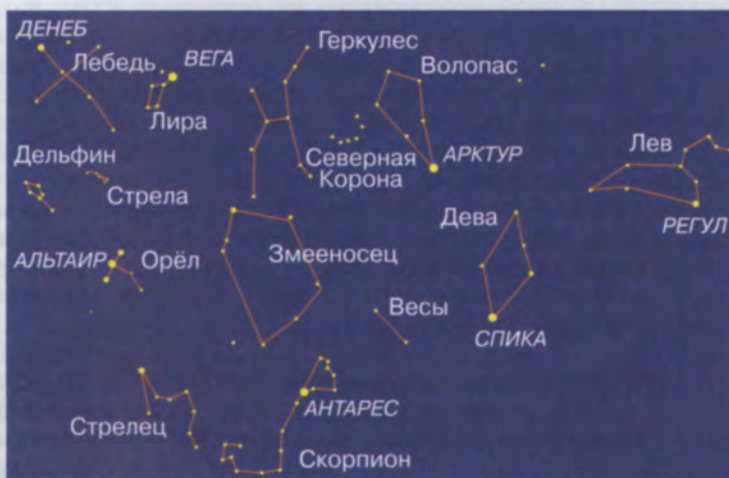
Полярная звезда — это α Малой Медведицы. Используя карту (рис. 29.7), опознайте это созвездие, семь ярких звёзд которого образуют фигуру ковша меньших размеров и с ручкой у дна ковша. Перевернув взгляд от Полярной звезды в сторону, противоположную ковшу Большой Медведицы, можно найти созвездие Цефея, четыре звезды которого образуют ромб. Вблизи созвездия Цефея по одну сторону отыщите созвездие Кассиопеи, звёзды которого образуют фигуру в форме буквы *W* латинского алфавита, по другую сторону от него отыщите созвездия Лебеда и Лиры. Звезда α Лебеда в вершине креста из звёзд называется Денеб, звезда α Лиры, расположенная рядом с небольшим параллелограммом из слабых звёзд, — Вега. Между созвездиями Большой Медведицы и Малой Медведицы и далее около другой стороны созвездия Малой Медведицы протянулась цепочка не очень ярких звёзд созвездия Дракона. Далее находится созвездие Геркулеса. В направлении, указываемом ручкой ковша Большой Медведицы, отыщите созвездия Волопаса и Северной Короны. Звезда α Волопаса называется Арктур.



Рис. 29.7. Созвездия вокруг Полярной звезды



Созвездия южной части неба в Северном полушарии зимой



Созвездия южной части неба в Северном полушарии летом

● Экспериментальное задание 29.2

Работаем дома

Обнаружение суточного вращения звёздного неба

Оборудование: лист плотной бумаги, карандаши, электрический фонарь.

Отметьте на бумаге прямой линией положение линии горизонта и напишите букву В (восток).

Выберите одно или два созвездия на востоке вблизи горизонта, зарисуйте расположение ярких звёзд относительно горизонта, отметив при этом земные ориентиры у горизонта (дерево, столб, контур крыши дома).

Выберите одно или два созвездия на западе вблизи горизонта и зарисуйте их расположение, пометив рисунок буквой З.

Затем зарисуйте созвездия вблизи горизонта на юге и на севере. Заметьте положение Полярной звезды относительно земных предметов.

Спустя один-два часа выйдите на то же место наблюдения и последовательно зарисуйте карандашом другого цвета новые положения всех выбранных звёзд на востоке, западе, юге и севере. Изменилось ли взаимное расположение звёзд? Изменилось ли расположение звёзд относительно линии горизонта и земных ориентиров? Изменилось ли положение Полярной звезды относительно земных ориентиров? Сделайте вывод о видимом движении звёзд.



Николай Коперник



Рис. 30.1



Иоганн Кеплер



Вопросы

1. В чём заключалось главное отличие системы мира Коперника от системы мира Аристотеля и Птолемея?
2. Какие возражения выдвигались против гелиоцентрической системы мира?

Гипотезы о движении Земли. Гипотезу о движении Земли высказал ещё пифагореец Экфант. Он считал, что Земля вращается вокруг своей оси, а суточное движение всех небесных светил является кажущимся движением для наблюдателей, находящихся на вращающейся Земле.

Аристарх Самосский, установивший, что Солнце значительно больше Земли, усомнился в том, что в центре мира находится сравнительно маленькая Земля, а вокруг неё с немислимо большой скоростью обращается за сутки громадное Солнце. Он сделал вывод, что центром мира является Солнце, и создал первую **гелиоцентрическую систему мира** (от греч. «гелиос» — солнце).

Однако на протяжении почти двух тысячелетий после открытий Аристарха Самосского учёные продолжали пользоваться неправильной геоцентрической системой. Им было трудно представить себе, что громадная Земля несётся вокруг Солнца в мировом пространстве с большой скоростью, а люди совершенно не ощущают этого движения. Противники гелиоцентрической системы мира указывали, что если бы Земля действительно двигалась вокруг Солнца, то положение близких звёзд в течение года изменялось бы относительно более далёких. Но таких перемещений никто не наблюдал. Ещё одной причиной неприятия гелиоцентрической системы мира было её явное противоречие с принятыми в то время представлениями о богах, создавших этот мир и управляющих им. За попытку объяснить природные явления без участия богов Аристарха Самосского обвинили в богохульстве и изгнали из Александрии.

Создание гелиоцентрической системы мира. Революция в научных представлениях об устройстве мира произошла лишь после опубликования в 1543 г. книги польского астронома Николая Коперника «Об обращении небесных кругов». В этой книге Коперник объяснил все наблюдаемые движения небесных светил на основе гелиоцентрической системы мира, в которой не Земля, а Солнце находится в центре мира. Видимые возвратные движения планет, по Копернику, лишь кажущиеся движения, наблюдаемые в периоды, когда Земля обгоняет внешнюю планету (рис. 30.1).

Таблицы положений планет, составленные на основе расчётов Коперника, оказались значительно точнее таблиц, составленных на основе использования геоцентрической системы мира. Этот факт стал самым веским доводом в пользу учения Коперника.

Но учение Коперника, переносившее человека из центра мира на одну из планет Солнечной системы, получило отрицательную оценку со стороны католической церкви как противоречащее Библии.

Тихо Браге и Кеплер. Датский астроном Тихо Браге более 20 лет вёл наблюдения за небесными телами с помощью лучших в то время астрономических инструментов. Для математической обработки результатов наблюдений за движениями планет в 1600 г. он пригласил немецкого астронома Иоганна Кеплера.

Обработав результаты наблюдений за движением Марса, Кеплер в 1609 г. сделал следующие выводы:

1. Марс движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

2. Отрезок прямой, соединяющей планету с Солнцем, описывает равные площади за равные промежутки времени.

Эти утверждения называют первым и вторым законами Кеплера. В 1619 г. Кеплер открыл третий закон планетных движений.

3. Квадраты периодов обращений планет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Открытия Галилея. Признанию гелиоцентрической системы мира способствовали открытия итальянского учёного Галилео Галилея. Галилей первым применил телескоп для астрономических наблюдений и обнаружил горы и долины на Луне (рис. 30.2), тёмные пятна на поверхности Солнца, четыре спутника, вращающиеся вокруг Юпитера, изменение фаз у Венеры.

Существование фаз у Луны и Венеры доказывало, что эти небесные тела светят отражённым светом Солнца и похожи на Землю. Наблюдая за движением пятен на Солнце, Галилей обнаружил его вращение вокруг оси, что подтверждало гипотезу о вращении Земли вокруг оси. Наблюдения движения спутников вокруг Юпитера показывали возможность обращения малых небесных тел вокруг более крупных, как это описывалось теорией Коперника.

Основные результаты исследований Галилея были опубликованы в 1632 г. в книге «Диалог о двух главных системах мира — Птолемеевой и Коперниковой». Вызванный на суд инквизиции и обвинённый в том, что он «...поддерживал ложные и противные святому божественному Писанию доктрины, будто Солнце находится в Центре мира, а не движется от востока к западу, а Земля будто движется, а не покоится...», Галилей под угрозой пытки вынужден был публично, стоя на коленях, «отречься, проклясть и возненавидеть вышесказанные заблуждения». Отречение спасло жизнь Галилею, но не дало ему возможности продолжать научные исследования. Судом инквизиции он был приговорён к домашнему аресту под надзором. Однако книги Галилея распространялись по всей Европе, учение Коперника завоёвывало всё новых приверженцев. Только спустя 340 лет, в 1982 г., папа римский Иоанн Павел II признал преследования Галилея несправедливыми и снял с него все обвинения в ереси.



Галилео Галилей



Рис. 30.2



Вопросы

1. Какие открытия Галилея и каким образом служили подтверждением учения Коперника?
2. Какие открытия доказывали правильность гелиоцентрической системы мира?
3. С какими трудностями встретились создатели геоцентрической системы мира?
4. Какие основания были для гипотезы о центральном положении Солнца во Вселенной?
5. Какие возражения выдвигались против гипотезы о вращении Земли вокруг своей оси и обращении вокруг Солнца?
6. Как вы опровергните эти возражения?



Найдите

<http://www.astrogalaxy.ru/689/html>

(О геоцентрической и гелиоцентрической системах мира.)



Джордано Бруно



Рис. 30.3

? Вопросы

1. Какими идеями Джордано Бруно дополнил учение Коперника?
2. Какие опыты доказывают существование суточного вращения Земли вокруг своей оси?
3. В каком направлении и почему отклоняются от вертикали тела, падающие на Землю?
4. В каком направлении и почему поворачивается относительно поверхности Земли плоскость качаний маятника Фуко?

Гипотеза Джордано Бруно. Итальянский монах Джордано Бруно принял учение Коперника и дополнил его новыми положениями. Бруно считал, что каждая звезда подобна Солнцу и вокруг каждого из этих солнц обращаются свои планеты, на которых обитают живые существа. В бесконечной Вселенной неисчислимо количество обитаемых миров, жизнь во Вселенной вечна.

За распространение учения о бесконечности Вселенной и множестве обитаемых миров Джордано Бруно был объявлен еретиком. Он бежал из монастыря и несколько лет скрывался от инквизиции за пределами Италии. Инквизиция обманом заманила его в Италию. Джордано Бруно был схвачен и семь лет находился в тюрьме. От него добивались публичного отречения от еретических взглядов на устройство мира, угрожая смертной казнью. Эта угроза не сломила Джордано Бруно. Его приговорили к сожжению живым на костре. Выслушав приговор, Джордано Бруно сказал судьям: «Вы произносите этот приговор с большим страхом, чем я его выслушиваю. Придёт время, когда все будут видеть то, что теперь вижу я. Я умираю мучеником добровольно».

Публичная казнь Джордано Бруно была совершена 17 февраля 1600 г. на одной из площадей Рима. Но она не остановила распространения нового учения. Сам факт добровольной смерти человека за свою идею вызывал у многих желание узнать суть идеи, за которую можно отдать свою жизнь.

Доказательства суточного вращения Земли. Настоящим торжеством гелиоцентрической системы мира было открытие Исааком Ньютоном закона всемирного тяготения и вывод законов Кеплера как следствий этого закона. Но и это не опровергло полностью все возражения против гелиоцентрической системы мира. Необходимы были прямые доказательства вращения Земли вокруг своей оси и её обращения вокруг Солнца.

В 1850 г. в Парижском пантеоне французский физик Фуко выполнил опыт с маятником длиной 67 м (рис. 30.3). Плоскость колебаний маятника поворачивалась относительно поверхности Земли в направлении видимого суточного вращения небесной сферы. В действительности плоскость качаний в пространстве неизменна, опыт доказывает вращение Земли.

Доказательствами вращения Земли являются экспериментально обнаруженное отклонение падающих тел к востоку от вертикали (в направлении вращения Земли) и сплюснутость Земли у полюсов, предсказанная Ньютоном. Экваториальный радиус Земли на 22 км больше полярного радиуса из-за вращения Земли, приводящего к возникновению центробежных сил, направленных от оси вращения. Если бы Земля остановилась, океаны и моря стекли бы из экваториальных областей в полярные области Земли.

Годичный параллакс. Многие столетия доводом против утверждения о годичном движении Земли вокруг Солнца был факт отсутствия годичного параллакса звёзд. Явление параллакса заключается в том, что при перемещении наблюдателя в пространстве близко расположенные неподвижные тела кажутся перемещающимися относительно более далёких предметов. При движении Земли вокруг Солнца близко расположенные звёзды должны в течение года перемещаться относительно более далёких звёзд. **Годичным параллаксом** называется угол p максимального кажущегося смещения звезды на небе в результате годичного движения Земли. Этот угол равен углу p , под которым

виден средний радиус земной орбиты со звезды (рис. 30.4). При точности измерений в $1''$, достигнутой Тихо Браге, из факта отсутствия годичного параллакса следовало, что расстояния до звезд превышают расстояние от Земли до Солнца более чем в 7000 раз.

Первое успешное измерение годичного параллакса было выполнено российским астрономом, основателем Пулковской обсерватории Василием Яковлевичем Струве в 1837 г. Струве измерил годичный параллакс звезды Веги. Он оказался равен $0,125''$.

Астрономические единицы длины. Расстояния в пределах Солнечной системы часто выражают в *астрономических единицах*. **Астрономической единицей** (1 а.е.) называется среднее расстояние от Земли до Солнца: $1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ км}$. Расстояния до звезд часто выражают в *парсеках* или *световых годах*.

Парсек (1 пк) — это расстояние, с которого перпендикулярный лучу зрения радиус земной орбиты виден под углом $1''$: $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$.

Световым годом называется расстояние, которое свет в вакууме проходит за один год:

$$1 \text{ св. год} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 365,26 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \approx 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м},$$

$$1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. лет}.$$

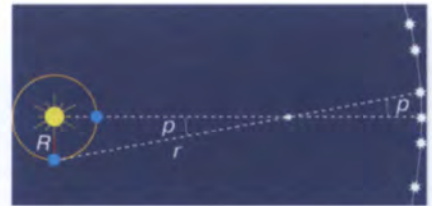


Рис. 30.4



Василий Яковлевич Струве

Пример решения задачи

Задача. Вычислите расстояние до звезды α Центавра, годичный параллакс которой равен $p = 0,762''$. Радиус земной орбиты $R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$.

Решение

Примем, что радиус R земной орбиты примерно равен длине дуги окружности радиусом r , равным расстоянию до звезды. Если дуга окружности радиусом r стягивает угол $1''$, то длина дуги R равна: $R = \frac{2\pi r}{360 \cdot 60 \cdot 60} \approx \frac{r}{206\,265}$.

Отсюда расстояние r до звезды с годичным параллаксом, равным одной угловой секунде, равно: $r \approx R \cdot 206\,265$. Расстояние r до звезды с годичным параллаксом, равным p секунд, в p раз меньше (см. рис. 30.4):

$$r \approx \frac{R}{p} 206\,265 \approx \frac{1,5 \cdot 10^{11} \cdot 206\,265}{0,762} \text{ м} \approx 3,9 \cdot 10^{16} \text{ м}.$$

Найдём время, в течение которого свет проходит такое расстояние:

$$t = \frac{r}{c} \approx \frac{3,9 \cdot 10^{16}}{3 \cdot 10^8} \text{ с} \approx 1,3 \cdot 10^8 \text{ с} \approx 4,3 \text{ года}.$$

Ответ: $r \approx 3,9 \cdot 10^{16} \text{ м}$.

Задача 30.1. Вычислите расстояние до звезды Сириус. Годичный параллакс Сириуса равен $0,375''$. Ответ выразите в метрах, парсеках и световых годах.

Творческое задание 30.1

Работаем самостоятельно

Обнаружение собственных движений Луны, Солнца и планет относительно звезд

Придумайте способы обнаружения собственных движений Луны, Солнца и планет относительно звезд и пронаблюдайте эти движения.

? Вопросы

1. Какие опыты служат доказательством годичного движения Земли вокруг Солнца?
2. Как измеряют расстояния до звезд?



Рис. 31.1



Рис. 31.2



Рис. 31.3

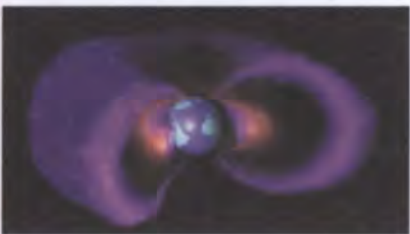


Рис. 31.4

Планеты Солнечной системы по физической природе делятся на планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс и планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Планеты земной группы твёрдые и мало отличаются друг от друга по размерам.

Меркурий. Ближайшая к Солнцу планета Меркурий имеет диаметр 0,37 диаметра Земли, оборот вокруг Солнца совершает за 88 земных суток. На дневной поверхности планета нагревается примерно до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, на ночной остывает до $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосфера Меркурия состоит из гелия, плотность её у поверхности планеты примерно равна плотности земной атмосферы на высоте 200 км. Поверхность Меркурия, покрытая метеоритными кратерами, похожа на лунную поверхность (рис. 31.1).

Венера. Вторая планета Солнечной системы Венера совершает оборот вокруг Солнца за 225 земных суток, её диаметр составляет 0,97 диаметра Земли. Существование у Венеры плотной атмосферы обнаружил в 1761 г. М. В. Ломоносов при наблюдении прохождения Венеры по краю диска Солнца. На Венере нет жидкой воды, нет морей и океанов, её атмосфера состоит в основном из углекислого газа с небольшим количеством азота и паров воды. Атмосферное давление у поверхности планеты примерно в 90 раз выше нормального атмосферного давления на Земле. Температура поверхности планеты около $480\text{ }^{\circ}\text{C}$, выше точки плавления свинца. Плотные облака в атмосфере Венеры состоят из капель серной кислоты. Изображения поверхности Венеры (рис. 31.2) впервые передала на Землю станция «Венера-13».

Земля. Земля существенно отличается от остальных планет земной группы тем, что она покрыта океаном жидкой воды и имеет атмосферу из смеси азота и кислорода. Предполагается, что при образовании Земли атмосфера содержала водород, углекислый газ и пары воды. Затем водород улетучился в космическое пространство, пары воды сконденсировались в жидкую воду и образовали Мировой океан (рис. 31.3). Углекислый газ вступил в химические реакции с образованием твёрдых веществ. Без этого процесса атмосферное давление на Земле было бы таким же, как на Венере, около 90 атмосфер. А если бы на Земле было теплее и водяной пар не сконденсировался, давление было бы 257 атмосфер. Кислорода в атмосфере Земли первоначально не было, как и у других планет. Он появился в атмосфере Земли в результате возникновения и развития биосферы.

Электрические токи в жидком металлическом ядре создают магнитное поле Земли. Захваченные магнитным полем быстрые протоны и электроны образуют вокруг Земли радиационные пояса на высоте примерно 4000 и 17 000 км. На рисунке 31.4 показано в разрезе строение радиационных поясов Земли.

Луна. Спутник Земли Луна имеет радиус почти в 4 раза меньше радиуса Земли, её масса в 81 раз меньше мас-

сы Земли. Луна обращена к Земле всегда одной стороной. На стороне Луны, обращённой к Солнцу, её поверхность нагревается до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, ночью охлаждается до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Солнечные сутки на Луне равны 29,5 земных суток.

У Луны нет атмосферы, нет на ней и жидкой воды. Ровные участки поверхности Луны назвали морями, неровные — материками (рис. 31.5). Образцы грунта с Луны оказались сходными по химическому составу с земными породами.

Марс. Более 200 лет наибольший интерес у людей вызывала четвёртая планета Марс, так как на ней казалось возможным существование жизни. Марс примерно в 2 раза меньше Земли по диаметру. Он обращается вокруг Солнца за 687 земных суток, а марсианские сутки длятся 24 ч 37 мин. На единицу поверхности Марс получает от Солнца в 2 раза меньше тепла и света, чем Земля.

В 1877 г. во время великого противостояния Марса (сближения Земли и Марса на самое короткое расстояние) итальянский астроном Скиапарелли обнаружил на Марсе сеть тонких линий, покрывающих его поверхность. Некоторые астрономы предполагали, что это каналы, прорытые марсианами для сбора и распределения воды, большинство астрономов считали каналы простым обманом зрения.

При исследованиях Марса с помощью космических аппаратов было обнаружено, что на его поверхности действительно существуют длинные узкие углубления, напоминающие русла высохших рек. Вероятно, эти реки протекали на Марсе около 4 млрд лет тому назад (рис. 31.6).

На поверхности Марса спускаемые аппараты никаких признаков жизни пока не обнаружили. Это неудивительно, так как физические условия на Марсе очень суровые. Дневная температура летом в районе марсианского экватора достигает примерно $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и опускается ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой. В районе полярных шапок температура падает до $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосфера Марса в основном состоит из углекислого газа (~95%) и азота (~3%), давление у поверхности планеты составляет лишь 0,6% нормального атмосферного давления. Зимой углекислота замерзает и выпадает у полярных шапок в виде сухого льда. Вода на Марсе, вероятно, имеется в виде слоя льда у северного полюса (рис. 31.7). Сезонные изменения окраски больших участков поверхности Марса не связаны с развитием растений, а являются следствием мощных песчано-пылевых бурь.

На поверхности планеты много старых кратеров вулканов и вулканических гор. Самая высокая из них — гора Олимп — имеет диаметр кратера 60 км и высоту 21 км (рис. 31.8).

У Марса есть два небольших спутника — Фобос и Деймос.



Рис. 31.5



Рис. 31.6



Рис. 31.7

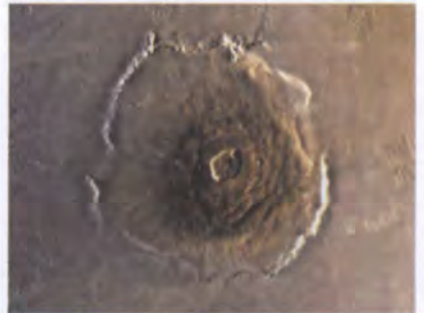


Рис. 31.8

? Вопрос

Подтвердились ли гипотезы о каналах на Марсе и о существовании жизни на Марсе?



Рис. 31.9



Рис. 31.10

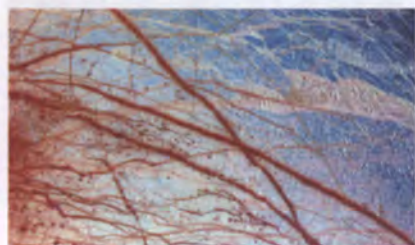


Рис. 31.11



Рис. 31.12



Рис. 31.13

Юпитер. Вторая группа планет — планеты-гиганты. Пятая планета Юпитер в 11 раз больше Земли по диаметру и в 318 раз больше по массе. Это самая большая планета Солнечной системы. Средняя плотность Юпитера составляет $1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, что близко к среднему значению плотности Солнца ($1,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Период обращения Юпитера вокруг своей оси около 9 ч 50 мин. Юпитер состоит в основном из водорода и гелия, в его атмосфере есть вода, аммиак, метан и другие химические соединения, облака в атмосфере, вероятно, состоят из капель аммиака (рис. 31. 9).

Под газовой атмосферой до глубины примерно 1/4 радиуса планеты, вероятно, находится жидкий водород и гелий. Ближе к центру планеты при давлении порядка $3 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ и температуре около $10^4 \text{ }^\circ\text{C}$ водород переходит в металлическое состояние. Температура в центральных областях Юпитера ниже необходимой для термоядерного синтеза. Поэтому при больших размерах и сходстве с Солнцем по химическому составу Юпитер — большая планета, а не маленькая звезда.

У Юпитера обнаружено 63 спутника и тонкое слабое кольцо, похожее на кольцо Сатурна. Четыре самых крупных спутника были открыты Галилеем в 1610 г. Диаметры спутников Юпитера Ио, Ганимеда и Каллисто превышают диаметр Луны.

На спутнике Ио обнаружены мощные действующие вулканы, выбрасывающие газовые струи на высоту до 300 км (рис. 31.10). Большие участки поверхности Ио покрыты жёлтыми отложениями серных соединений. Причиной вулканической активности на Ио является действие приливных сил со стороны Юпитера, периодически деформирующих и разогревающих Ио.

Спутник Европа имеет форму почти идеального шара радиусом 1569 км, возвышенности на нём не превышают 100 м. Поверхность Европы очень светлая и прорезана тысячекилометровыми трещинами (рис. 31.11). Вероятно, Европа покрыта слоем льда толщиной десятки километров, а подо льдом находится водный океан.

Крупнейший из спутников Ганимед примерно в 2 раза меньше Земли по диаметру. Видимо, он состоит из льда и твёрдых пород. На его поверхности, кроме кратеров, имеются многочисленные трещины длиной сотни километров и шириной 1—2 км (рис. 31.12).

Сатурн. Сатурн является второй по размерам планетой Солнечной системы. Химический состав и внутреннее строение Сатурна и Юпитера сходны. Самой замечательной особенностью Сатурна является его кольцо (рис. 31.13). Кольцо Сатурна, различимое при наблюдении в небольшой телескоп, расположено точно в плоскости экватора, его внешний радиус составляет примерно 140 000 км, а толщина не превышает 1—2 км.

Это кольцо не сплошное, а состоит из громадного числа небольших частиц, обращающихся вокруг планеты по различным орбитам в одной плоскости. Эти частицы, вероятно, напоминают загрязнённые комья снега размером около 1 м. У Сатурна обнаружено 22 спутника.

Уран. Планета Уран примерно в 4 раза больше Земли по диаметру, оборот вокруг Солнца совершает за 84 земных года. Ось суточного вращения планеты лежит почти точно в плоскости орбиты (рис. 31.14). Предполагается, что под холодной атмосферой из водорода и гелия у Урана имеется горячий водяной океан глубиной 8000 км, а под ним расплавленное каменное ядро радиусом около 7000 км. Уран имеет 20 спутников и несколько узких колец.

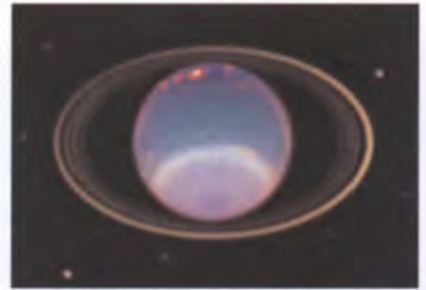


Рис. 31.14

Нептун. Нептун примерно в 2 раза больше Земли по диаметру. Он внешне сходен с Ураном, покрыт мощным облачным слоем и совершает один оборот вокруг Солнца за 165 земных лет. Имеет 8 спутников и кольца.

Нептун находится в 30 раз дальше от Солнца, чем Земля. Поэтому на Нептуне и его спутниках очень холодно. На спутнике Нептуна Тритоне температура поверхности равна примерно -235°C . При такой температуре азот не только переходит в жидкое состояние, но у полюсов азотный океан покрывается толстой коркой льда из твёрдого азота. Космическая станция «Вояджер-2», пролетавшая вблизи Нептуна, обнаружила, что весной, которая на Тритоне длится 40 земных лет, шапка азотного льда начинает таять. При этом из-под льда вырываются фонтаны жидкого азота в виде гейзеров высотой 8–10 км (рис. 31.15).



Рис. 31.15

Плутон и плутоноиды. В 1930 г. за орбитой Нептуна было открыто небесное тело, обращающееся вокруг Солнца по орбите радиусом в 40 раз больше радиуса земной орбиты. Это небесное тело назвали Плутоном. Плутон совершает оборот вокруг Солнца за 284 земных года. Средняя температура поверхности Плутона -223°C . По размерам Плутон меньше Луны и поэтому практически лишён атмосферы. На протяжении 78 лет Плутон считался девятой планетой Солнечной системы.

У астрономов были сомнения, следует ли считать Плутон девятой планетой Солнечной системы, так как его орбита частично заходит в область орбиты Нептуна.

В 2006 г. астрономы объявили об открытии десятой планеты Солнечной системы 2003 UB313, которую неофициально назвали Зеной. Диаметр этой планеты около 3000 км, расстояние от Солнца примерно в 97 раз больше расстояния от Солнца до Земли. Затем были открыты ещё более далёкие от Солнца небесные тела, подобные Плутону и планете 2003 UB313. В связи с тем что подобных небольших планет за Нептуном может быть очень много, астрономы на заседании Международного астрономического союза в 2008 г. приняли решение, что их не следует называть планетами. Такие небесные тела, как Плутон, 2003 UB313 и подобные им, теперь называют карликовыми планетами или плутоноидами.

@ Найдите

http://www.astrotime.ru/solar_system/html
(Солнечная система.)

? Вопросы

1. Чем отличаются планеты земной группы от планет-гигантов?
2. Чем объясняются существенные различия физических условий на поверхностях планет?
3. Почему Юпитер считается большой планетой, а не маленькой звездой?
4. Что представляют собой кольца Сатурна?

§ 32. Малые тела Солнечной системы. Происхождение Солнечной системы



Рис. 32.1



Рис. 32.2



Рис. 32.3

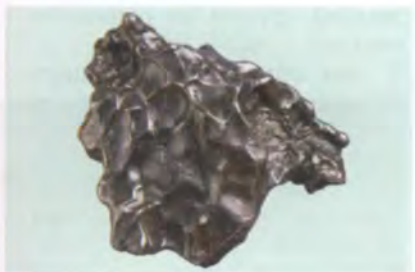


Рис. 32.4

Астероиды. Кроме больших планет, вокруг Солнца обращаются многие тысячи небольших твёрдых небесных тел, называемых **малыми планетами** или **астероидами**. Диаметр самого большого астероида Цереры составляет около 800 км. Вид поверхности астероида Гаспра размера 19 на 12 км представлен на фотографии (рис. 32.1).

Орбиты большинства астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера. Но орбиты многих небольших астероидов являются очень вытянутыми эллипсами, заходящими даже за орбиту Земли (рис. 32.2). Поэтому в принципе не исключена возможность столкновения одного из астероидов с Землёй. Исчезновение динозавров на Земле 65 млн лет тому назад, возможно, произошло в результате глобальной катастрофы при столкновении Земли с небольшим астероидом.

Метеоры и метеориты. Каждую ночь можно видеть на небе кратковременное появление светящейся прямой полосы, называемой **метеором**. Метеор вызывается вторжением в атмосферу Земли маленькой частицы твёрдого вещества из космического пространства. Эти частицы движутся в космическом пространстве по всевозможным направлениям со скоростью 30–70 км/с. При вторжении в атмосферу Земли они нагреваются до 2000–3000 °С и сгорают на высоте 5–20 км, оставляя яркий след ионизированного и нагретого газа (рис. 32.3).

Крупные метеорные тела не сгорают полностью в атмосфере и достигают земной поверхности. Упавшее на земную поверхность метеорное тело называется **метеоритом**. Большое метеорное тело при встрече с Землёй в 1908 г. вызвало у реки Подкаменной Тунгуски явление, названное Тунгусским метеоритом. Взрывом повалило деревья на площади радиусом 10–15 км.

В 1947 г. в Приморском крае упал крупный железоникелевый метеорит, на месте падения собрано 37 т его осколков (рис. 32.4). Химический состав метеоритов близок к среднему химическому составу Земли, что свидетельствует об общности их происхождения с Землёй. Один из самых больших на Земле метеоритных кратеров находится в штате Аризона (США). Диаметр этого кратера 1207 м, глубина около 174 м (рис. 32.5).

Кометы. Кометы, или «хвостатые» звёзды, долгое время считали атмосферным явлением. Тихо Браге в 1577 г., наблюдая комету, установил, что расстояние до неё больше расстояния до Луны. Следовательно, кометы являются небесными телами. При наблюдении далёкая комета сначала видна как туманное пятнышко, день за днём изменяющее своё положение относительно звёзд. С приближением к Солнцу комета увеличивается в размерах и от туманного центрального пятна, называемого **головой кометы**, в противоположную сторону от Солнца вытягивается громадный **хвост** кометы (рис. 32.6).

Головы некоторых комет превосходили размеры Солнца, длина хвоста может быть больше диаметра земной орбиты. Масса любой из комет в миллиарды раз меньше массы Земли. Поэтому кометы иногда называют «видимым ничто».

Плоскости кометных орбит располагаются под всевозможными углами к плоскости земной орбиты (рис. 32.7). По современным представлениям за границей планетной системы на расстоянии до 50 000 радиусов земной орбиты вокруг Солнца обращается не менее 100 млрд кометных ядер. Небольшая часть из них изредка приближается к Солнцу и превращается на время в красавицу-комету.

Исследованиями с помощью космических аппаратов установлено, что в центре головы кометы имеется **кометное ядро** из смёрзшихся газов диаметром 1–10 км (рис. 32.8), в это ледяное тело вкраплены мелкие твёрдые частицы. При приближении к Солнцу лёд испаряется и образуются газово-пылевые голова и хвост кометы.

Хвост вытягивается в сторону от Солнца под действием солнечного ветра — потока быстрых частиц, испускаемых Солнцем.

Связь между астероидами, кометами, метеорами и метеоритами. В некоторые дни года на небе наблюдается настоящая звёздный фейерверк — метеорный поток. При этом все метеорные следы кажутся исходящими из одной точки неба (рис. 32.9). Метеорные потоки называют по наименованиям созвездий, из которых они кажутся исходящими. Метеорный поток из созвездия Персея (ежегодно 12 августа) называют Персеидами, метеорный поток из созвездия Льва (16 ноября) называют Леонидами. Частицы метеорных потоков — это остатки распавшихся комет, постепенно рассеивающиеся вдоль всей траектории её движения (см. рис. 32.7). В день наблюдения метеорного потока Земля при своём движении вокруг Солнца пересекает орбиту распавшейся кометы. Падающие на Землю железные и каменные метеориты — это куски астероидов или маленькие астероиды.



Рис. 32.5



Рис. 32.6



Рис. 32.7



Рис. 32.8



Рис. 32.9

@ Найдите

<http://www.solsys.rumaalyetela.htm>
(Малые тела Солнечной системы.)

? Вопросы

1. Чем отличаются астероиды от больших планет?
2. Что такое метеор?
3. Что такое метеорит?
4. Чем отличается движение комет от движения планет?

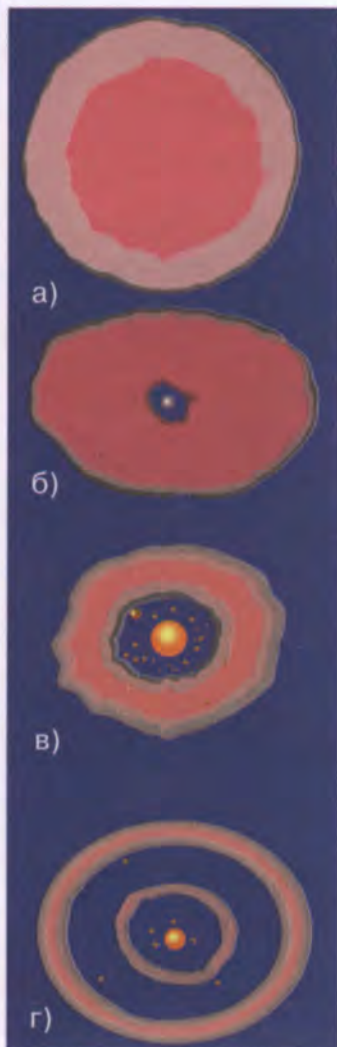


Рис. 32.10

Происхождение планетной системы. Первыми попытками ответить на вопрос о происхождении мира были древние мифы о сотворении Земли и Неба богами. Для научного ответа на вопрос о происхождении Солнечной системы нужно объяснить основные особенности физической природы планет и их движения.

Главными особенностями Солнечной системы являются вращение всех планет вокруг Солнца в одном направлении, расположение плоскостей орбит всех планет почти в одной плоскости, деление планет на две группы: твёрдые планеты типа Земли и газовые планеты-гиганты.

Согласно современной гипотезе Солнце и планеты образовались совместно из протопланетного газопылевого облака, имевшего форму диска радиусом больше радиуса орбиты Плутона (рис. 32.10, а). В этом облаке около 98% приходилось на водород и гелий и около 2% на все остальные элементы. Твёрдые пылевые частицы размером в микрометры составляли около 1% по массе.

Под действием гравитационных сил происходила постепенная концентрация основной массы вещества в протозвезду (рис. 32.10, б). Когда в результате сжатия температура вещества превысила примерно 15 млн градусов, начались термоядерные реакции синтеза водорода в гелий. Примерно 100 млн лет формирующееся Солнце не только очень интенсивно светило, но и выбрасывало часть своего вещества в окружающее пространство. Световое излучение расплавляло и испаряло большую часть пылинок. Под действием мощного потока света и заряженных частиц атомы лёгких элементов выметались из окрестностей Солнца до орбиты будущей планеты-гиганта Юпитера (рис. 32.10, в).

После выброса Солнцем в окружающее пространство около половины вещества интенсивность его излучения уменьшилась. В пространстве вокруг Солнца до орбиты Юпитера в этот период температура резко понизилась и произошла конденсация вещества из газообразной фазы в твёрдые частицы. Первыми сконденсировались пары тугоплавких металлов и их соединений. В процессе конденсации образовались различные химические соединения, содержащие молекулы воды. Из этих частиц сформировались планеты Меркурий, Венера, Земля и Марс. Формирование Земли произошло примерно 4,6 млрд лет тому назад. Этот процесс длился примерно 100 млн лет. Выделяющаяся при ударах падающих частиц энергия разогрела Землю до 80—130 °С. Разогрев ядра Земли до температуры в несколько тысяч градусов произошёл в основном за счёт энергии, выделяющейся при радиоактивном распаде изотопов урана, тория и калия.

На более далёких расстояниях от Солнца в облаке сохранились ледяные частицы из замёрзшей воды, метана, твёрдой углекислоты с примесями пыли из тугоплавких веществ. Такой состав имеют кометные ядра. Это остатки того материала, из которого сформировались большие планеты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (рис. 32.10, г).

При столкновениях частицы протопланетного облака слипались в комки всё больших размеров и концентрировались вблизи средней плоскости протопланетного диска. При формировании планет-гигантов, вероятно, сначала

образовались плотные ядра из твёрдых частиц и ледяных комков, затем эти ядра собрали вокруг себя газовые оболочки. Это объединение длилось более 100 млн лет.

При большой массе зарождающейся планеты падение частиц приводит к сильному разогреванию вещества. Температура Юпитера на этом этапе его формирования достигала нескольких тысяч градусов. При такой температуре из зоны формирования ближних спутников Юпитера были вытеснены газы, включая и пары воды. Поэтому самые близкие спутники Юпитера — Ио и Европа состоят из твёрдых веществ без воды и льда, а более далёкие — Ганимед и Каллисто примерно наполовину состоят из водяного льда.

Менее массивный Сатурн разогревался меньше, поэтому в его кольцах и в составе спутников есть водяной лёд.

Юпитер быстрее всех остальных планет увеличивал свою массу по той причине, что именно на расстоянии радиуса его орбиты поглощение светового излучения Солнца в облаке и ослабление его из-за увеличения расстояния привели к такому понижению температуры вещества протопланетного облака, что в нём происходила кристаллизация газообразных соединений. Кристаллические частицы легко объединялись во всё более крупные образования. В результате в пространстве между орбитами Марса и Юпитера материала осталось так мало, что из него не смогла образоваться ещё одна планета. Так образовался пояс астероидов.

Одинаковое направление вращения спутников с направлением вращения планеты и близость плоскостей их орбит к плоскости экватора планеты, вероятно, являются следствием их совместного образования из газовой-пылевой дисков. Исключением является спутник Нептуна Тритон, вращающийся противоположно направлению вращения планеты. Это может быть следствием иного пути его возникновения или результатом какого-то сильного внешнего воздействия.

Многочисленные кратеры на поверхностях планет и спутников, не имеющих атмосферы, являются следами процессов образования планет из протопланетного вещества (рис. 32.11). Такой же метеоритной и кометной бомбардировке подвергалась и Земля на стадии своего формирования, но большинство следов этой бомбардировки стёрто под влиянием атмосферных и геологических процессов.

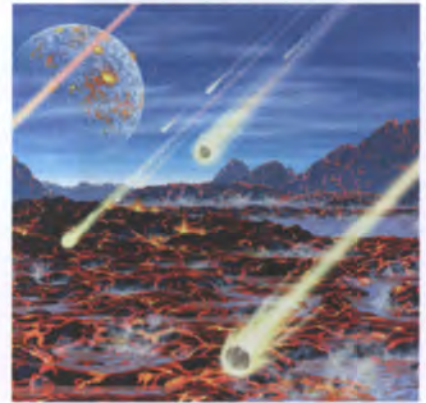


Рис. 32.11



Вопросы

1. Какие особенности Солнечной системы должны быть объяснены гипотезой о происхождении Земли и планет?
2. Как возникла Солнечная система?
3. Как объясняются существенные различия по химическому составу и по массе между планетами земной группы и планетами-гигантами?
4. Каков возраст Земли?
5. Каков источник энергии внутреннего тепла Земли?



Найдите

<http://www.astrogalaxy.ru/043.html>

(Солнечная система. Происхождение Солнечной системы.)

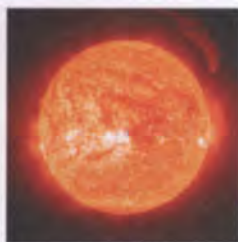


Рис. 33.1



Рис. 33.2



Рис. 33.3

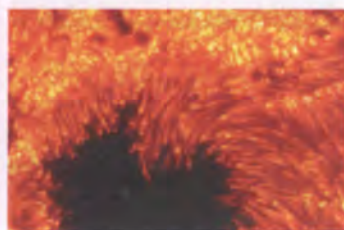


Рис. 33.4



Рис. 33.5

Солнце. Солнце — газообразное небесное тело с температурой поверхностного видимого слоя — **фотосферы** — около $5500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 33.1). Изучение спектра Солнца показало, что оно на 71% состоит из водорода, на 28% — из гелия и около 1% приходится на остальные элементы. Значительная часть звёзд имеет примерно такой же химический состав.

Над фотосферой находится тонкий слой с температурой около $20\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, называемый **хромосферой**. Выше хромосферы простирается очень разреженная оболочка с температурой около 1 млн $^{\circ}\text{C}$, называемая **солнечной короной**. Хромосферу и корону можно увидеть во время полных солнечных затмений, когда излучение фотосферы закрыто диском Луны (рис. 33.2).

Из-за очень высокой температуры из солнечной короны происходит истечение протонов и электронов. Этот поток частиц называется **солнечным ветром**. Около Земли скорость частиц солнечного ветра равна примерно 500 км/с , плотность потока — около 10 частиц/см^3 . Под действием магнитного поля Земли заряженные частицы солнечного ветра обтекают земной шар за пределами атмосферы. При этом солнечный ветер «сжимает» магнитное поле Земли со стороны Солнца и «вытягивает» с ночной стороны (рис. 33.3).

Солнечная активность. Происходящие на Солнце изменения называют солнечной активностью. Важнейшее проявление солнечной активности связано с солнечными пятнами — активными областями выхода сильных магнитных полей. Эти поля мешают движению заряженных частиц и уменьшают поток энергии из глубины Солнца. Поэтому в местах их выхода на поверхность температура понижается примерно на $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 33.4). Обычно одно пятно от зарождения до исчезновения существует несколько недель. Число пятен на Солнце изменяется в среднем с периодом 11,1 лет.

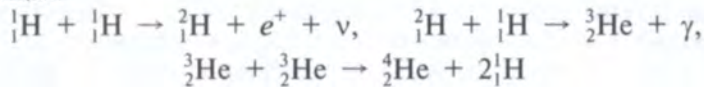
Активность Солнца проявляется возникновением **протуберанцев**, имеющих вид облаков (рис. 33.5; Земля представлена для сравнения размеров), и солнечных вспышек. При солнечных вспышках происходят выбросы мощных потоков быстрых протонов и электронов. Вблизи Земли эти частицы под действием магнитного поля движутся по спиральным траекториям вокруг силовых линий и вторгаются в верхние слои атмосферы вблизи полюсов, вызывая изменения магнитного поля Земли — магнитные бури — и полярные сияния (рис. 33.6). Воздействие потоков заряженных частиц на верхние слои атмосферы приводит к изменениям путей перемещения циклонов и другим процессам в атмосфере.

Все виды солнечной активности связаны с числом пятен на Солнце и их общей площадью.

Физические характеристики звёзд. Из-за удалённости от Земли звёзды видны на ночном небе как блестящие точки. В действительности звёзды — это раскалённые газовые шары, сравнимые по размерам с Солнцем. Многие звёзды значительно меньше Солнца, но встречаются и та-

кие гиганты, как звезда Бетельгейзе в созвездии Ориона. Радиус этой звезды-гиганта больше радиуса орбиты Марса. На рисунке 33.7 представлены для сравнения размеры Бетельгейзе и Солнечной системы.

Источники энергии звёзд. Температура в центральной части таких звёзд, как Солнце, достигает примерно 12–15 млн °С, плотность вещества примерно 10^5 кг/м³, а давление 10^{15} Па. При таких условиях становится возможным осуществление термоядерных реакций синтеза ядер гелия из ядер водорода. Наиболее вероятной цепочкой реакций, осуществляющихся в недрах Солнца, является следующая:



Эта цепочка реакций с превращением четырёх протонов в одно ядро гелия называется **протон-протонным циклом**.

Но даже при такой высокой температуре кинетическая энергия большинства ядер атомов водорода — протонов — оказывается недостаточной для преодоления кулоновского барьера. Поэтому только очень небольшая доля самых быстрых протонов изредка вступает в ядерные реакции синтеза, в результате которых из четырёх протонов синтезируется одно ядро атома гелия. В результате Солнце не взорвалось, а постепенно расходует свои запасы водорода на протяжении более 4,5 млрд лет.

Эволюция звёзд. По современным представлениям звёзды зарождаются обычно группами или скоплениями из туманностей. На рисунке 33.8 представлена фотография газово-пылевого облака в созвездии Ориона. В этой туманности идёт процесс формирования новых звёзд. Этапы эволюции звезды с массой, примерно равной массе Солнца, представлены на рисунке 33.9.

При конденсации из газово-пылевого облака под действием сил гравитационного притяжения (рис. 33.9, а) звезда сначала светится за счёт энергии гравитационного сжатия газа (рис. 33.9, б). За несколько миллионов лет звезда сжимается примерно до размеров Солнца, и в её недрах начинается процесс термоядерного синтеза. Этот процесс протекает около 10 млрд лет (рис. 33.9, в). После израсходования всего водорода в центральной части звезды термоядерные реакции синтеза прекращаются, температура в недрах звезды понижается, звезда сжимается силами тяготения. В результате сжатия в центральной области звезды плотность вещества достигает около $3,5 \cdot 10^8$ кг/м³ и температура повышается до 25–40 млн °С. Вокруг выгоревшего звёздного ядра образуется тонкий слой вещества толщиной около 0,1% радиуса звезды, в котором продолжается процесс термоядерного синтеза. По мере расходования водорода радиус звезды увеличивается, средняя плотность уменьшается, температура поверхности понижается. Звезда становится красным гигантом (рис. 33.9, г).

После исчерпания всех запасов водорода температура звезды понижается, давление уменьшается, внешняя обо-



Рис. 33.6

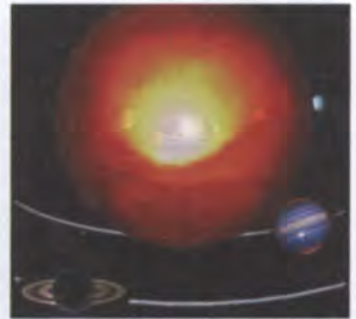


Рис. 33.7



Рис. 33.8



Вопросы

1. Каковы основные физические параметры Солнца?
2. Какова температура солнечной фотосферы?
3. Почему горячее вещество солнечной фотосферы не расширяется неограниченно в пустое космическое пространство?

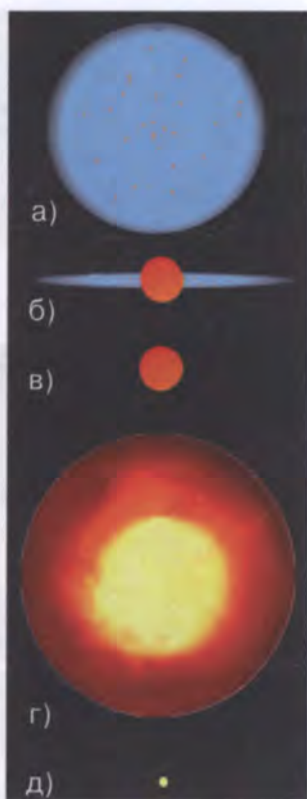


Рис. 33.9



Рис. 33.10

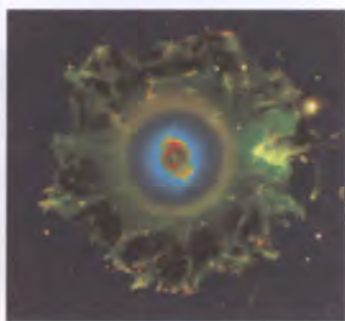


Рис. 33.11

лочка падает к центру звезды и сжимает вещество внутренних областей. В результате сжатия температура и давление во внутренних областях повышаются до таких значений, при которых становится возможен термоядерный синтез углерода из гелия. Такие процессы повторяются до синтеза ядер железа. Далее процесс термоядерного синтеза поддерживать существование звезды не может, так как при синтезе более тяжёлых ядер энергия не выделяется, а поглощается.

Если масса центральной части звезды не превышает примерно 1,4 массы Солнца, то процесс сжатия выгоревшего ядра звезды прекращается при достижении средней плотности вещества порядка 10^9 кг/м³. Это значит, что масса одного кубического сантиметра вещества такой звезды равна 1 т. Звезда становится **белым карликом** размером с Землю и светимостью примерно в 1000 раз меньше светимости Солнца (рис. 33.9, д). При таком уровне излучения и столь высокой плотности вещества белый карлик может постепенно остывать многие миллиарды лет.

Остатки внешней газовой оболочки звёздный ветер сбрасывает во время яркой вспышки на последнем этапе существования звезды, светящей за счёт осуществления реакций термоядерного синтеза. Создаётся красивая расширяющаяся оболочка газа и пыли, называемая **планетарной туманностью**. На рисунке 33.10 представлена фотография ближайшей к Земле планетарной туманности *Улитка*. Она находится на расстоянии 700 св. лет от нас в направлении созвездия Водолея, её поперечник около 3 св. лет.

Фотография другой планетарной туманности под названием *Кошачий Глаз* представлена на рисунке 33.11. Эта туманность находится на расстоянии 3000 св. лет от Земли.

Нейтронные звёзды. Расчёты показывают, что процесс сжатия выгоревшей звезды массой от 1,4 до 2—3 солнечных масс может привести к тому, что под действием сил гравитационного притяжения выгоревшее вещество будет сжато до такой степени, что электроны атомных оболочек окажутся втиснутыми в атомные ядра. Протоны захватят электроны и превратятся в нейтроны. Так образуется нейтронная звезда с плотностью ядерного вещества, равной примерно $2 \cdot 10^{17}$ кг/м³. Если бы Солнце превратилось в нейтронную звезду, то его диаметр уменьшился бы с 1 400 000 до 25 км, а период вращения уменьшился бы с 27 земных суток до 0,00074 с.

Предположение о существовании нейтронных звёзд было долгое время лишь научной гипотезой. Но в 1967 г. в Кембридже (Великобритания) были обнаружены радиосигналы из одного места звёздного неба, повторявшиеся строго периодически через тысячные доли секунды. Источники импульсного радиоизлучения назвали **пульсарами**. Это явление настолько отличалось от всего известного ранее, что высказывалась даже гипотеза о «маленьких зелёных человечках», посылающих в космос сигналы о своём существовании. Но нашлось более простое объяснение.

При сжатии выгоревшей звезды до нейтронной звезды магнитное поле сжимается вместе с ней. Магнитное поле

вращается вокруг оси звезды с частотой в тысячи оборотов в секунду. Движение электронов вокруг силовых линий такого магнитного поля сопровождается излучением радиоволн. Направление этого излучения изменяется с периодом вращения звезды подобно лучу вращающегося прожектора (рис. 33.12). В результате на Земле радиоизлучение принимается в виде коротких, периодически повторяющихся импульсов.

Чёрные дыры. Если масса выгоревшего ядра звезды превышает 2–3 солнечных массы, то после исчерпания запасов ядерного топлива действию гравитационных сил не могут противостоять никакие другие силы и происходит процесс, называемый **гравитационным коллапсом**. При гравитационном коллапсе процесс сжатия становится неудержимым и необратимым. Место, в котором происходит гравитационный коллапс, назвали **чёрной дырой**. В чёрной дыре всё исчезает бесследно и безвозвратно, даже свет не может вырваться из неё.

Новые и сверхновые звёзды. Некоторые звёзды обнаруживают способность внезапно увеличивать свой блеск в несколько сотен или даже в миллионы раз. Такие звёзды, раньше не видимые невооружённым глазом, астрономы назвали новыми звёздами. Их вспышки происходят в близко расположенных двойных звёздах, из которых одна является белым карликом, а другая — обычной звездой. Израсходовавшая запасы водорода звезда-карлик своим сильным гравитационным полем притягивает к себе газ из разреженной оболочки обычной звезды-соседки (рис. 33.13). Этот газ с большим содержанием водорода накапливается и уплотняется вокруг белого карлика до достижения критического значения, затем происходит гигантский термоядерный взрыв. При взрыве освобождается столько энергии, сколько Солнце излучает за 100 000 лет, и выбрасывается газовая оболочка массой около 0,01 массы Солнца со скоростью около 1000 км/с.

Самые мощные взрывы в мире звёзд называются вспышками сверхновых звёзд. Мощность излучения сверхновой в максимуме сравнима с мощностью излучения всех звёзд галактики. При такой вспышке звезда превращается в нейтронную звезду или в чёрную дыру. На месте взрыва образуется громадная газовая туманность, расширяющаяся со скоростью до 10 000 км/с. Примером такой туманности диаметром около 10 св. лет может служить туманность *Краб* в созвездии Тельца (рис. 33.14). Эта туманность возникла на месте вспышки сверхновой, наблюдавшейся в 1054 г.

Задача 33.1. Мощность излучения Солнца равна $4 \cdot 10^{26}$ Вт. Такой выход энергии обеспечивается синтезом в недрах Солнца 600 млн т гелия из водорода за 1 с. Сравните массу расходимого Солнцем за 1 млрд лет водорода с массой Земли и с массой Солнца. Сделайте вывод: долго ли ещё может светить Солнце?

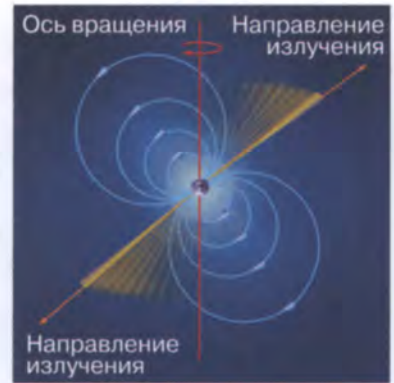


Рис. 33.12



Рис. 33.13



Рис. 33.14



Вопросы

1. Что такое нейтронная звезда?
2. Что такое пульсар?
3. Что такое чёрная дыра?
4. Как происходит вспышка новой звезды?
5. Каковы источники энергии звёзд?



Вильям Гершель

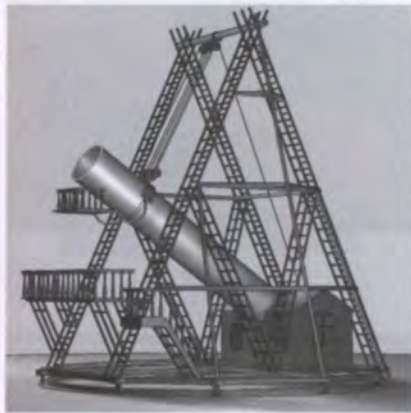


Рис. 34.1

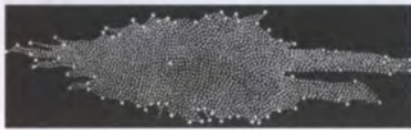


Рис. 34.2

Развитие представлений о строении звёздной системы. До конца XVIII в. астрономия занималась только исследованиями небесных тел Солнечной системы, о телах за её пределами высказывались лишь гипотезы. Новый этап в познании Вселенной начался благодаря открытиям одного из выдающихся астрономов всех времён Вильяма Гершеля. В 1781 г. Гершель открыл планету Уран, не видимую невооружённым глазом и движущуюся за орбитой Сатурна. Это открытие расширило границы Солнечной системы. Гершель после этого открытия получил материальную возможность полностью посвятить свою жизнь астрономии. Зеркало самого большого из телескопов, сделанных самим Гершелем, имело диаметр 1 м 22 см, длина трубы была более 12 м, масса зеркала была около 900 кг (рис. 34.1). Создание самых совершенных в то время телескопов и разработка исключительно удачного плана исследований позволили Вильяму Гершелю за 47 лет систематических наблюдений сделать столько важных астрономических открытий, сколько не сделал ни один астроном ни до него, ни после него.

До работ Гершеля звёзды считались недоступными для экспериментального изучения. Гершель положил начало систематическому изучению движений звёзд, строения звёздных систем, эволюции звёзд и других небесных объектов вне Солнечной системы. Он сделал подсчёты звёзд на различных участках неба, видимых в поле зрения телескопа. Сделав 1083 таких «черпка», Гершель впервые дал приблизительный ответ, сколько звёзд находится в каком направлении, и тем самым получил ответ на вопрос об устройстве нашей звёздной системы — Галактики, называемой Млечным Путём. По результатам исследований Гершеля наша Галактика имеет строение, представленное на рисунке 34.2.

Сравнив наблюдаемые координаты ярких звёзд с их координатами по каталогам древнегреческих астрономов, Гершель обнаружил относительные движения звёзд. При этом оказалось, что в созвездии Геркулеса звёзды кажутся разбегающимися относительно одной точки, а относительно противоположной точки на небесной сфере — сбегающимися к одной точке. Это явление Гершель объяснил движением нашей звезды — Солнца — относительно других звёзд. Как пассажиру движущегося автомобиля кажется, что впереди предметы разбегаются, а позади сбегаются, так и всем «пассажирам» Солнечной системы в направлении движения Солнца звёзды кажутся разбегающимися. Скорость движения Солнца относительно близких звёзд, по современным данным, равна примерно 20 км/с. Гершель сделал три полных обзора неба и составил каталоги с описанием 2500 разнообразных туманностей, большинство из которых до него не наблюдал никто.

Значительную часть туманностей его телескопы разложили на множество слабых звёзд. Они оказались звёздными скоплениями, находящимися очень далеко от Земли. Но многие туманности не разлагались на звёзды, и в некоторых из них были звёзды. Гершель предположил, что здесь наблюдаются различные стадии зарождения и развития звёзд из рассеянного вещества.

Состав и структура Галактики. Современные исследования подтвердили правильность основных выводов Гершеля о строении звёздной системы. Галактика, в которой находится Солнце, является скоплением звёзд в форме диска. При взгляде на неё с большого расстояния можно было бы увидеть звёздную систему из закрученных спиральных рукавов с плотным ядром в центральной части, подобную туманности Андромеды (рис. 34.3). Все звёзды Галактики, имея собственные хаотически направленные скорости, участвуют в общем вращательном движении вокруг центра Галактики. Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики равна 220 км/с, расстояние от Солнца до центра Галактики примерно 25 000 св. лет.

Количество звёзд в нашей Галактике оценивается примерно 200 млрд, диаметр диска Галактики равен примерно 200 000 св. лет. Средние расстояния между звёздами в Галактике порядка 10^{14} км, их диаметры порядка 10^6 км. Звёзды Галактики, уменьшенные до размеров теннисных мячей, при таком же уменьшении расстояний между ними окажутся на расстояниях 10 000 км друг от друга. При таких больших относительных расстояниях и очень малых по отношению к расстояниям скоростях столкновений между звёздами практически не происходит.

Газовые туманности. Млечный Путь на ночном небе представляет вид нашей Галактики изнутри при расположении наблюдателя вблизи плоскости галактического диска. На фотографии Млечного Пути видны многочисленные тёмные полосы и пятна (рис. 34.4). Эти тёмные места оказались не пустотами среди звёзд, а огромными облаками межзвёздной пыли и газа. Обширные газовые и газопопылевые облака называют **туманностями**. Если вблизи туманностей имеются яркие звёзды, то атомы газа переизлучают свет звёзд и наблюдаются как светлые туманности (рис. 34.5). Туманности выглядят как тёмные облака, если они находятся на пути света от более далёких звёзд (рис. 34.6). Массы газопопылевых туманностей составляют от десятых долей массы Солнца до тысяч солнечных масс. Плотность газа в туманностях составляет 10—1000 атомов/см³. Такой низкой плотности газа в лабораториях не удаётся достигнуть с применением лучших вакуумных установок. Общая масса межзвёздного газа и пыли в Галактике не превышает 2—5% массы всех звёзд.



Рис. 34.3



Рис. 34.4



Рис. 34.5



Рис. 34.6

? Вопросы

1. Как Гершель смог выяснить структуру Млечного Пути?
2. Как были обнаружены собственные движения звёзд и Солнца?
3. Что такое Галактика?
4. Каковы состав и строение Галактики?
5. Что входит в состав Галактики, кроме звёзд?
6. Как движутся звёзды?
7. Часто ли происходят столкновения звёзд?



Эдвин Хаббл



Рис. 34.7



Рис. 34.8



Рис. 34.9

Внегалактические туманности. Первые сведения о существовании небесных объектов за пределами нашей Галактики были получены американскими астрономами Гебером Кертисом и Джорджем Ричи в 1917 г. Они обнаружили в нескольких спиральных туманностях вспышки новых звёзд и сделали вывод, что это не газовые туманности, а далёкие от нас галактики. В 1924 г. американские астрономы Эдвин Хаббл и Джордж Ричи с помощью самого большого в то время телескопа с диаметром зеркала 2,5 м впервые получили такую фотографию туманности Андромеды, на которой было видно, что она состоит из множества звёзд. Эта туманность оказалась другой звёздной системой, лежащей за пределами нашей Галактики. Она находится так близко от нашей Галактики, что её видно невооружённым глазом в созвездии Андромеды. Расстояние до туманности Андромеды оказалось равным примерно 2 млн св. лет. Это всего 10 диаметров диска нашей Галактики. По размерам и массе туманность Андромеды примерно в 1,5 раза больше нашей Галактики.

Более половины от общего числа галактик похожи на нашу Галактику и состоят из нескольких спиралей, закрученных вокруг галактического ядра. Галактики такого типа называются спиральными галактиками (рис. 34.7). Кроме спиральных галактик, встречается несколько других типов галактик (рис. 34.8). Общее число галактик в доступной для наблюдений Вселенной оценивается в 50 млрд.

Относительно своих размеров галактики расположены близко друг к другу, многие из них образуют взаимосвязанные группы. Более крупные галактики часто захватывают и поглощают меньших соседей. На фотографии (рис. 34.9) показана галактика M51, или Водоворот, в спиральных рукавах которой из газовой-пылевой туманностей интенсивный процесс звездообразования, вероятно, вызван столкновением с соседней галактикой. При столкновениях галактик редко расположенные звёзды не сталкиваются друг с другом, но газово-пылевые туманности испытывают сильнейшие взаимные воздействия (рис. 34.10).

Галактики образуют группы различных размеров. Однако в областях пространства поперечником более $3 \cdot 10^{24}$ м в любой части Вселенной находится примерно одинаковое число галактик.

Расширяющаяся Вселенная. В 1910 г. американский астроном Весто Слайфер обнаружил смещение спектральных линий к красному концу спектра в спектре туманности Андромеды, затем в спектрах ещё 14 спиральных туманностей. Такое смещение могло быть объяснено удалением туманностей от нас со скоростями около 300 км/с. В 1929 г. Эдвин Хаббл обнаружил, что красное смещение в спектрах любых галактик прямо пропорционально расстоянию до них. Эту зависимость назвали **законом Хаббла**. Хаббл предположил, что красное смещение объясняется разбеганием галактик. Это не значит, что наша Галактика находится в центре Вселенной. Все галактики удаляются друг от друга, т. е. расширяется вся Вселенная. Понять это можно на упрощённом примере. Нарисуем на

резиновом шаре галактики. При надувании шара все они удаляются друг от друга (рис. 34.11).

Из закона Хаббла следует, что отношение расстояния r от Земли до галактики к её скорости v для всех галактик одно и то же и равно примерно 15 млрд лет. Его можно понимать как время от начала разбегания галактик или возраст Вселенной.

Большой взрыв. В 1946 г. русский физик Георгий Гамов высказал гипотезу о том, что примерно 15 млрд лет тому назад вся Вселенная находилась в бесконечно малом объёме и обладала бесконечно большой плотностью и температурой. В результате Большого взрыва сначала возникли простейшие элементарные частицы, затем через 10^{-6} с начался процесс соединения этих частиц в протоны, нейтроны и другие частицы. Плотность электромагнитного излучения сначала была примерно в миллиард раз выше плотности вещества.

К концу первой секунды температура упала до 10^{10} °С, плотность уменьшилась до 10^7 кг/м³, что меньше плотности ядерного вещества, а радиус Вселенной достиг 10^{15} м, что в 100 раз меньше расстояния до ближайших от Солнца звёзд. При температуре около 900 млн °С начался процесс синтеза ядер гелия из протонов и нейтронов.

Через 1 млн лет радиус Вселенной достиг значения порядка 10^{24} м, что примерно в 100 раз меньше её современных размеров, температура упала до 3000 °С. При такой температуре стало возможным удержание электронов около атомных ядер и начался процесс образования атомов водорода и гелия. Вещество Вселенной оказалось состоящим из водорода ($\approx 74\%$) и гелия ($\approx 26\%$). На долю всех остальных химических элементов приходится менее 1%.

Далее расширение Вселенной привело к дальнейшему её охлаждению, и начался процесс образования звёзд, туманностей, галактик. К настоящему времени, через 12–15 млрд лет после Большого взрыва, радиус Вселенной достиг значения около 10^{26} м, средняя плотность вещества $\sim 6 \cdot 10^{-27}$ кг/м³, что соответствует среднему содержанию четырёх атомов водорода в 1 м³, температура межгалактического электромагнитного излучения упала до -270 °С.



Рис. 34.10



Рис. 34.11

Пример решения задачи

Задача. По известным значениям расстояния от Солнца до центра Галактики $r = 2,8 \cdot 10^{20}$ м и скорости $v = 220$ км/с движения Солнца вокруг центра Галактики оцените возраст Земли в галактических годах.

Решение

Галактический год — период обращения вокруг центра Галактики — равен:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \approx \frac{2\pi \cdot 2,8 \cdot 10^{20}}{2,2 \cdot 10^5} \text{ с} \approx 8 \cdot 10^{15} \text{ с} \approx 250 \text{ млн лет.}$$

Разделив возраст Земли 4,6 млрд лет на период обращения Солнца вокруг центра Галактики, получаем возраст Земли около 18 галактических лет. По галактическим меркам Земля довольно молода.

? Вопросы

1. Что такое красное смещение и каково его возможное объяснение?
2. В чём смысл закона Хаббла?
3. Каково возможное объяснение закона Хаббла?
4. На каком основании сделан вывод о существовании других звёздных систем — галактик?
5. Взаимодействуют ли галактики между собой?
6. В чём заключается гипотеза Большого взрыва?



Вильгельм Рентген

Открытие рентгеновских лучей

Как не упустить счастливый случай?

Прошлый, XX век часто называют атомным веком, так как в этом столетии были открыты сложное внутреннее строение атомов, состав и строение атомного ядра, явление радиоактивного распада, ядерные силы и ядерные реакции. В результате этих открытий человечество получило возможность использовать громадные запасы энергии, скрытые в атомных ядрах. От того, насколько разумно будет использована эта возможность, предоставленная открытиями физиков, теперь зависит будущее всего человечества.

Как же делаются такие важные научные открытия в физике, от которых зависят судьбы всех людей на Земле? Однозначного ответа на этот вопрос, конечно, нет. Но можно познакомиться с историей некоторых выдающихся открытий в области физики атома. За одно из таких открытий немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген в 1901 г. получил Нобелевскую премию. Это была первая Нобелевская премия по физике.

Поздно вечером 8 ноября 1895 г. Рентген работал в своей лаборатории. Он начинал исследования в новой для него области физики электрического разряда в разреженных газах. В его распоряжении было самое простое оборудование, с каким уже несколько лет работали другие физики в десятках лабораторий. Основными приборами были стеклянная трубка с двумя металлическими электродами внутри и трансформатор. Из трубки был выкачан почти весь воздух, и при подаче высокого напряжения между электродами возникал электрический разряд (рис. 35.1).

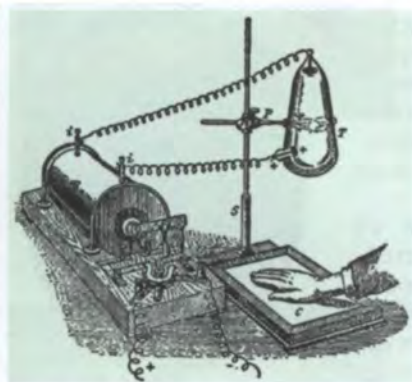


Рис. 35.1

Закончив работу около одиннадцати часов, Рентген выключил свет. В наступившей темноте он заметил на лабораторном столе светящееся пятно. Не включая света, он подошёл к столу и обнаружил, что светятся лежащие на столе кристаллы соединения бария. Рентген знал, что эти кристаллы способны светиться короткое время после их освещения солнечным светом. Но здесь они светились в темноте без предварительного освещения. Осмотревшись вокруг, Рентген заметил, что он забыл отключить напряжение на газоразрядной трубке на соседнем столе. При отключении напряжения свечение кристаллов прекратилось. При подаче напряжения кристаллы вновь засветились.

Рентген продолжал опыты до утра. А утром он распорядился принести в лабораторию походную кровать, хотя его спальня находилась в том же доме этажом выше. Окна лаборатории были завешены чёрными шторами. Людям, приносящим пищу в лабораторию, было запрещено разговаривать.

Рентген продолжал опыты пятьдесят суток и 28 декабря представил сообщение об открытии лучей, способных проходить через непрозрачные для света материалы и давать на фотопластинке изображение внутренних органов человека (рис. 35.2).



Рис. 35.2

Итак, научное открытие — дело счастливого случая? Не забудь Рентген отключить напряжение на трубке, не будь случайно оказавшихся особым кристаллом на соседнем столе, мы бы и сегодня не знали о существовании

рентгеновского излучения, не имели рентгеновских аппаратов для медицинских обследований и лечения? Конечно, нет. Случай лишь немного приближает или отдаляет момент открытия. Нужно понять, что Рентген случайно заметил лишь свечение кристаллов. Но это не есть научное открытие, это лишь случайное наблюдение. Подобные странные явления, происходящие вблизи работающих газоразрядных трубок, наблюдали несколько учёных до Рентгена и даже сообщали о своих наблюдениях в заметках в научных журналах. Но никто из них не понял, что Природа предоставляет им редкий случай сделать значительное научное открытие. А Рентген сразу понял важность случайного наблюдения и целенаправленными экспериментами выяснил природу нового физического явления.

Рентген обнаружил способность нового излучения действовать на фотопластинку и сделал первые рентгеновские снимки руки человека, открыл способность нового излучения разряжать заряженный электроскоп, исследовал проникающую способность излучения и многие другие его свойства. За пятьдесят суток почти непрерывных экспериментов он настолько глубоко и полно исследовал все основные свойства нового излучения, что на протяжении десятков лет после публикации его трёх коротких статей десяткам учёных, исследовавших новое явление, не удалось опровергнуть, исправить или дополнить сформулированные Рентгеном тридцать два тезиса о свойствах нового излучения.

В возможность столь исчерпывающего исследования совершенно нового явления одним человеком за столь короткое время было очень трудно поверить. Рассказывают, что знаменитый американский учёный и изобретатель Томас Эдисон, узнав об открытии Рентгена, несколько дней и ночей без отдыха проработал в своей лаборатории, повторяя опыты Рентгена. Он подтвердил все открытия Рентгена, но найти что-то ещё существенно новое в этой области ему не удалось.

Сегодня обследование человека с использованием рентгеновских аппаратов позволяет обнаруживать опухоли, повреждения внутренних органов для назначения необходимого лечения или хирургической операции. При исследовании на современном рентгеновском аппарате — компьютерном томографе — пациент лежит на столе, медленно перемещающемся внутри вращающегося кольца (рис. 35.3). На одной стороне кольца находится рентгеновская трубка, а на другой стороне — матрица детекторов ионизирующего излучения. После одного оборота рентгеновского излучателя и детекторов вокруг стола на экране компьютера появляется изображение одного поперечного среза исследуемого органа. Сделав серию таких последовательных срезов, получают объёмную картину.

Открытие радиоактивности

Пути от гипотезы к открытию

Всякое открытие есть находка. Чтобы что-то найти, нужно искать. Но как искать нечто никому не известное и неизвестно где находящееся?



Рис. 35.3



Анри Беккерель

Первый помощник на этом пути — гипотеза, предположение о существовании какого-то физического явления или связи между какими-то явлениями. Гипотеза может оказаться правильной и получить экспериментальное подтверждение. Гипотеза может оказаться неправильной, и открытие не состоится. И наконец, гипотеза может оказаться неправильной, но в процессе её проверки будет обнаружено новое явление и сделано неожиданное открытие. Примером открытия по последнему из возможных вариантов может служить открытие радиоактивности французским физиком Анри Беккерелем.

Беккерель заинтересовался новым физическим явлением, открытым Рентгеном, — возникновением проникающего излучения в газоразрядных трубках. Было известно, что рентгеновские лучи излучаются из того места газоразрядной трубки, в котором наблюдается свечение стекла. Это свечение, называемое фосфоресценцией, вызывалось действием катодных лучей. В беседе с Беккерелем его коллега Анри Пуанкаре высказал предположение, что рентгеновские лучи, возможно, возникают в процессе фосфоресценции стекла. Если это предположение верно, то рентгеновское излучение должно наблюдаться и в случае фосфоресценции, вызванной другими причинами.

Беккерель знал, что соли урана обладают способностью фосфоресцировать — светиться некоторое время после облучения солнечным светом. Он решил проверить, излучают ли урановые соли в процессе фосфоресценции не видимое глазом проникающее излучение, способное проходить сквозь чёрную бумагу и засвечивать фотопластинку. Для этого он в тёмной комнате обернул фотопластинку двойным слоем чёрной бумаги, поверх бумаги насыпал урановую соль и выставил завёрнутую пластинку с солью на яркий солнечный свет. Через четыре часа он проявил пластинку и обнаружил на ней потемнение против тех мест, где находилась урановая соль. Он повторил опыт несколько раз и получил те же самые результаты. По-видимому, подтверждалось предположение о том, что фосфоресценция сопровождается испусканием рентгеновских лучей. Об этом открытии Беккерель сделал предварительное сообщение 24 февраля 1896 г. на заседании Академии наук. Но уже через пять дней он сделал новое открытие, опровергавшее первую гипотезу.

Четыре дня были пасмурными, и не было возможности облучить соли урана солнечным светом. Приготовленная для опыта фотопластинка вместе с солями урана пролежала всё это время в тёмном ящике стола. 1 марта 1896 г. был солнечный день. Беккерель хотел вынести приготовленную фотопластинку на солнечный свет, но вдруг почему-то передумал и решил её проявить без освещения солей. Как объяснял позднее Беккерель, такой контрольный опыт был у него запланирован на будущее, но он решил воспользоваться этим случаем сейчас. И не пожалел о своём решении: на пластинке обнаружились тёмные пятна против мест расположения урановой соли. Первоначальная гипотеза была опровергнута. Обнаруженное им проникающее излучение не было связано ни с рентгеновскими лу-

чами, ни с фосфоресценцией. Было открыто совершенно новое физическое явление.

Беккерель обнаружил, что любые соединения урана являются источником нового вида проникающего излучения, но больше всего излучает чистый уран. Следовательно, источником невидимого излучения являются атомы последнего химического элемента таблицы Менделеева — урана.

Следующий шаг в раскрытии загадки радиоактивности был сделан Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри. Их исследования начинались с выдвижения гипотезы о том, что открытое Беккерелем явление самопроизвольного испускания невидимого излучения может быть присуще не только атомам урана, но и атомам других химических элементов. Для проверки этой гипотезы нужно было проверить все известные химические элементы на способность испускать такое излучение.

Для регистрации излучения Мария Кюри использовала электроскоп, изготовленный Пьером Кюри. При помещении урана на пластину заряженного электроскопа под действием «урановых лучей» происходила ионизация воздуха. Ионы нейтрализовали заряд электроскопа. Однако в сотнях опытов со всеми другими химическими элементами и их соединениями, выполненных Марией Кюри, электроскоп не разряжался. Так продолжалось до опытов с торием.

Торий и его соединения разряжали электроскоп. Гипотеза о существовании других химических элементов, обладающих способностью испускать невидимые проникающие лучи, получила первое подтверждение. Мария Кюри не прекратила на этом своих исследований. Когда были испытаны все известные химические элементы, она высказала новое предположение: может быть, в природе есть ещё неизвестные химические элементы, которые обладают свойствами, подобными свойствам урана и тория?

Но как можно проверить эту гипотезу, если сами эти элементы ещё не открыты? Мария Кюри решила искать их в природных минералах по способности разряжать электроскоп. Были исследованы сотни минералов из различных коллекций. Но если некоторые из них обнаруживали способность разряжать электроскоп, то химический анализ обнаруживал в этих минералах соединения урана или тория.

Только в 1898 г. пришёл долгожданный успех: были обнаружены два минерала, которые разряжали электроскоп быстрее, чем чистый уран. Теперь нужно было выделить из этих минералов неизвестный активный химический элемент. Мария и Пьер Кюри выделили новый элемент и назвали его полонием в честь родины Марии Кюри — Польши. Затем был выделен ещё один новый химический элемент, названный радием. Радий испускал невидимые излучения примерно в 900 раз интенсивнее урана.

Открытия Марии и Пьера Кюри могут служить примером того, как смелая научная гипотеза в сочетании с настойчивыми планомерными исследованиями может привести к важным открытиям.



Мария Кюри



Пьер Кюри



Вопросы

1. Чем определяются границы применимости физических теорий и законов?
2. Что такое физическая картина мира?
3. Даёт ли современная физическая картина мира точное описание всех физических явлений и законов Природы?
4. Как можно доказать соответствие современной физической картины мира свойствам реально существующего мира?

Зачем делаются научные открытия?

Не всем интересно знать, *как делаются научные открытия*. Сегодня многих людей больше интересует вопрос, *зачем делаются открытия*. Такой вопрос задают люди, опасаящиеся отрицательных последствий новых открытий. Сомнения в пользе науки не являются достижением Новейшего времени. Отношение к учёным как к опасным колдунам было характерно и для древнего времени, и для Средних веков. Учёных сжигали на кострах за попытку узнать, что находится за пределами Земли, как устроено тело человека.

И у современников Майкла Фарадея были сомнения в пользе его научных исследований. Рассказывают, что лабораторию Фарадея, состоявшего на службе в Королевском институте, посетил однажды министр финансов и задал вопрос о том, будет ли какая-то польза Её Величеству от проводимых исследований. Фарадей ответил, что он не знает, какая именно польза будет людям от его открытий, но он уверен, что следующий министр финансов обязательно обложит налогом в пользу Её Величества то, что получится из этих открытий. Фарадей не мог представить себе в то время, как изменится мир техники и повседневная жизнь людей благодаря открытию явления электромагнитной индукции, породившему электрогенераторы, электродвигатели, радио и многое другое. Сейчас у большинства людей нет сомнений в пользе медицины и электричества, но в пользу открытия атомного ядра, космических исследований сомневаются многие. Эти сомнения вызваны известными фактами отрицательных последствий использования ядерной энергии и космических ракет.

Однако необходимо осознать, что приобретение новых знаний о мире и использование добытых знаний на практике не одно и то же. Открытие радиоактивности и атомного ядра не принесло вреда ни одному человеку на Земле. Оно открыло новые возможности, а как эти возможности использовать, решают сами люди.

Большинство учёных осознают возможность отрицательных последствий неразумного применения сделанных ими открытий и стремятся предотвратить их, часто рискуя собственной жизнью. Так было открыто отрицательное воздействие радиоактивных излучений на организм человека.

Беккерелю для демонстрации на лекции свойств радиоактивных излучений был нужен радиоактивный препарат высокой активности. Такой препарат радия был приготовлен Пьером и Марией Кюри и передан Беккерелю в закрытой стеклянной ампуле. Эту ампулу Беккерель положил в карман жилета. Там препарат находился несколько часов. Демонстрации прошли успешно. А вечером Беккерель почувствовал жжение на коже напротив того места, где находился в кармане радиоактивный препарат, кожа на этом месте покраснела. Болезненные симптомы продолжались довольно долго. Об этом случае Беккерель сообщил Пьеру Кюри, сказав при этом: «Радий я люблю, но я на него сердит».

Пьер Кюри не стал сердиться на радий, а подготовил эксперимент для исследования биологического действия радиоактивных излучений на человека. Он взял радиоактивный препарат в несколько раз большей мощности, чем

тот, каким пользовался Беккерель, и привязал его к своей руке. Затем он предупредил всех окружающих о том, что он проводит эксперимент по определению действия радиоактивного излучения на человека, и просил в том случае, если он потеряет сознание, не применять никаких лекарств, для того чтобы наблюдать результаты воздействия излучения в чистом виде. Он сам вёл подробные наблюдения за своим состоянием, проводя необходимые измерения, записывал все симптомы новой болезни. Так был описан первый случай лучевой болезни. Хотя поражение организма было довольно тяжёлым, Пьер Кюри выздоровел.

Его эксперимент послужил первым серьёзным предупреждением о возможной опасности радиоактивного излучения для человека. Но сами исследователи радиоактивности узнали об этом поздно. Мария Кюри, много лет проработавшая с радиоактивными препаратами высокой активности, умерла от рака крови, вызванного чрезмерными дозами облучения.

Можно привести много примеров научных открытий, полезных для всего человечества. Однако по отношению к наукам, изучающим основные законы природы, вместо вопроса: «Зачем учёные делают открытия?» — правильнее задать вопрос: «Почему учёные делают научные открытия?» Ответ на этот вопрос очень прост: открытия делаются потому, что человек любопытен. Именно любопытство позволило предкам человека выделиться из всего остального животного мира, научиться использовать открываемые свойства мира. И выжил человек в этом мире не благодаря острым зубам или физической силе, а благодаря своему уму. Любое открытие может принести новые опасности, но без дальнейшего познания мира у человека нет шансов на выживание. Учёные являются «разведчиками» человечества в этом мире. Наукой они занимаются потому, что для них попытка узнать у Природы что-то до сих пор никому не известное, есть самое интересное в жизни занятие.

Если вы задумываетесь над вопросом, не заняться ли наукой, то задайте себе вопрос, действительно ли вам это занятие интереснее всех остальных возможных занятий в жизни. Человек, чьё любопытство к познанию мира непреодолимо, может стать учёным и сделать новые открытия.

Секреты открытий

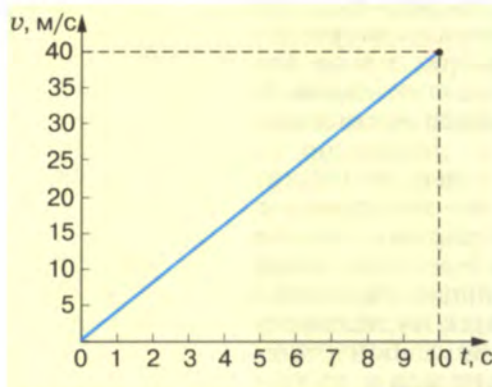
Открытие Колумба. Один из секретов научного открытия — **смелая гипотеза** и настойчивый поиск доказательств её правоты. Во времена Колумба всем было известно, что в богатую страну Индию из Европы можно попасть, двигаясь по суше на восток. В отличие от большинства современников Колумб считал, что Земля шарообразна. Поэтому он предположил, что в Индию можно попасть морским путём, двигаясь из Европы на запад через Атлантический океан. Гипотеза Колумба позднее подтвердилась, но сам он при попытке достигнуть Индии открыл новый континент — Америку.

И для открытий в физике нужны смелые гипотезы и настойчивые поиски их доказательств.

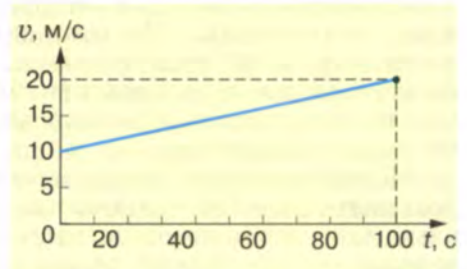
2.2. $s = vt = 20 \text{ м/с} \cdot 5 \text{ с} = 100 \text{ м}$, $\Delta x = v_x t = v \cos \alpha t \approx 20 \cdot 0,6 \cdot 5 \text{ м} \approx 60 \text{ м}$,
 $\Delta y = v_y t = v \sin \alpha t \approx 20 \cdot 0,8 \cdot 5 \text{ м} \approx 80 \text{ м}$.

3.1. $v = \text{const}$ или $v = 10 \text{ м/с}$. 3.2. $v = v_0 + at$, $a = \frac{v - v_0}{t}$, $a = \frac{20 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}}{100 \text{ с}} = 0,1 \text{ м/с}^2$. 3.3. $v = at$, $v \approx 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 20 \text{ с} \approx 196 \text{ м/с} \approx 706 \text{ км/ч}$. 3.4. $v = v_0 - at$,
 $t = \frac{v_0 - v}{a}$, $t = \frac{30 \text{ м/с} - 0 \text{ м/с}}{3 \text{ м/с}^2} = 10 \text{ с}$, $v_1 = v_0 - at_1$, $v_1 = 30 \text{ м/с} - 3 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ с} = 15 \text{ м/с}$.
 3.5. $a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{15 \text{ м/с} - 5 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2$, $v = 5 + 2t$. 3.6. $a = \frac{v_0 - v}{t} = \frac{15 \text{ м/с} - 5 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2$,
 $v = 15 - 2t$.

3.7.



3.8.



3.9. $v_2 = v_0 - at$, $t = \frac{v_0 - v_2}{a} = \frac{20 \text{ м/с} - 0 \text{ м/с}}{4 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ с}$. Так как автомобиль остановился
 через 5 с, то его скорость и через 10 с после начала торможения остаётся равной нулю.

4.1. $s = \frac{at^2}{2}$, $s = \frac{0,2 \text{ м/с}^2 \cdot (120)^2 \text{ с}^2}{2} = 1440 \text{ м}$. 4.2. $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$, $v = v_0 - at = 0$,

$t = \frac{v_0}{a}$, $s = v_0 \frac{v_0}{a} - \frac{a \left(\frac{v_0}{a} \right)^2}{2} = \frac{v_0^2}{2a}$, $s = \frac{(30)^2 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 3 \text{ м/с}^2} = 150 \text{ м}$. 4.3. $y = y_0 + v_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2}$,

$v_y = v_{0y} + a_y t$, $y_0 = 0$, $v_{0y} = v_0$, $a_y = -g$, $y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$. В момент $t_2 = 4 \text{ с}$ падения
 мяча на землю $y = 0$ и выполняется равенство $v_0 t_2 - \frac{gt_2^2}{2} = 0$, $v_0 = \frac{gt_2}{2}$,

$v_0 = \frac{10 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ с}}{2} = 20 \text{ м/с}$. В момент времени t_1 достижения мячом высшей точки
 траектории модуль проекции скорости мяча на ось OY равен нулю, $v_y = 0$:

$0 = v_0 - gt_1$, $t_1 = \frac{v_0}{g} = \frac{20 \text{ м/с}}{10 \text{ м/с}^2} = 2 \text{ с}$, $h = y_{\text{max}} = v_{0y} t_1 - \frac{a_y t_1^2}{2} = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}$,

$h = \frac{(20 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 20 \text{ м}$, $s = 2h = 40 \text{ м}$. 4.4. $s_2 = v_0 t_2 - \frac{at_2^2}{2}$, $v_2 = v_0 - at_2 = 0$, $t_2 = \frac{v_0}{a}$,

$s_2 = v_0 \frac{v_0}{a} - \frac{a \left(\frac{v_0}{a} \right)^2}{2} = \frac{v_0^2}{2a}$, $v_1 = v_0 - at_1$, $a = \frac{v_0 - v_1}{t_1}$, $s_2 = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0^2 t_1}{2(v_0 - v_1)}$,

$$s_2 = \frac{(20 \text{ м/с})^2 \cdot 2 \text{ с}}{2 \cdot (20 - 10) \text{ м/с}} = 40 \text{ м. } \mathbf{4.5.} \quad s_1 = \frac{gt_1^2}{2} = h, \quad t_2 = t_1 - 1, \quad s_2 = 0,25h, \quad s_1 = 4s_2,$$

$$\frac{gt_1^2}{2} = 4 \frac{g(t_1 - 1)^2}{2}, \quad t_1^2 = 4(t_1 - 1)^2, \quad t_1 = 2(t_1 - 1), \quad t_1 = 2 \text{ с}, \quad h = \frac{gt_1^2}{2} = \frac{10 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ с}^2}{2} = 20 \text{ м.}$$

$$\mathbf{5.1.} \quad v = \frac{2\pi R}{T}, \quad v \approx \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 384 \ 000 \ 000}{2 \ 358 \ 720} \text{ м/с} \approx 1023 \text{ м/с} \approx 1 \text{ км/с}, \quad a = \frac{v^2}{R},$$

$$a \approx \frac{(1023)^2}{384 \ 000 \ 000} \text{ м/с}^2 \approx 0,0027 \text{ м/с}^2 \approx 0,27 \text{ см/с}^2.$$

$$\mathbf{5.2.} \quad v = \frac{2\pi R}{T}, \quad v \approx \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 150 \ 000 \ 000 \ 000}{31 \ 557 \ 600} \text{ м/с} \approx 29 \ 865 \text{ м/с} \approx 30 \text{ км/с},$$

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad a \approx \frac{(29 \ 865)^2}{150 \ 000 \ 000 \ 000} \text{ м/с}^2 \approx 0,006 \text{ м/с}^2 \approx 0,6 \text{ см/с}^2.$$

$$\mathbf{5.3.} \quad a = \frac{v^2}{R}, \quad v = \sqrt{Ra}, \quad v = \sqrt{6 \ 400 \ 000 \cdot 9,8} \text{ м/с} = 7920 \text{ м/с} \approx 7,9 \text{ км/с. } \mathbf{5.4.} \quad R = R_3 + h,$$

$$R = 6400 \text{ км} + 250 \text{ км} = 6650 \text{ км} = 6 \ 650 \ 000 \text{ м}, \quad v = \frac{2\pi R}{T},$$

$$v = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 6 \ 650 \ 000}{5364} \text{ м/с} \approx 7790 \text{ м/с} \approx 7,8 \text{ км/с}, \quad a = \frac{v^2}{R}, \quad a \approx \frac{(7790)^2}{6 \ 650 \ 000} \text{ м/с}^2 \approx 9,125 \text{ м/с}^2.$$

$\mathbf{5.5.} \quad a = \frac{v^2}{R}, \quad R = \frac{v^2}{a}, \quad R = \frac{400}{10} \text{ м} = 40 \text{ м. } \mathbf{5.6.}$ Модуль вектора скорости \vec{v}_1 в точке 1 уменьшается, модуль вектора скорости \vec{v}_2 в точке 2 увеличивается.

$$\mathbf{5.7.} \quad a_{\text{ис}} = \frac{v_A^2}{r} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2}{T^2} R \cos \varphi, \quad \text{на экваторе } a_3 = \frac{4 \cdot (3,14)^2}{(24 \cdot 3600)^2} 6 \ 400 \ 000 \text{ м/с}^2 \approx$$

$$\approx 0,034 \text{ м/с}^2, \quad \text{на широте } 56^\circ \quad a_M = a_3 \cdot \cos 56^\circ \approx 0,034 \text{ м/с}^2 \cdot 0,56 \approx 0,019 \text{ м/с}^2.$$

$$\mathbf{6.1.} \quad t_1 = \frac{s}{v}, \quad t_1 = \frac{0,4 \text{ км}}{5 \text{ км/ч}} = 0,08 \text{ ч} = 4,8 \text{ мин}, \quad t_2^2 (v_1^2 - v_0^2) = 0,4^2,$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{0,4^2}{5^2 - 3^2}} \text{ ч} = \frac{0,4}{4} \text{ ч} = 0,1 \text{ ч} = 6 \text{ мин. } \mathbf{6.2.}$$
 В системе отсчёта, связанной с одним

из пловцов, второй пловец движется к первому со скоростью 1 м/с. $t = \frac{s}{v}$,

$$t = \frac{600}{1} \text{ с} = 600 \text{ с} = 10 \text{ мин. } \mathbf{6.3.} \quad y_1 = h + vt - \frac{gt^2}{2}, \quad y_2 = h - ut - \frac{gt^2}{2},$$

$$l = y_1 - y_2 = (v + u)t, \quad t = \frac{l}{v + u}, \quad t = \frac{20 \text{ м}}{4 \text{ м/с} + 6 \text{ м/с}} = 2 \text{ с. } \mathbf{6.4.}$$
 В системе отсчёта

второго велосипедиста скорость \vec{v} первого велосипедиста относительно второго равна сумме векторов \vec{v}_1 и $-\vec{v}_2$: $v = v_1 - v_2$, $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$, $v = \sqrt{9 + 16} \text{ (м/с)} = 5 \text{ м/с}$,

$$s = vt, \quad s = 5 \text{ м/с} \cdot 600 \text{ с} = 3000 \text{ м} = 3 \text{ км. } \mathbf{6.5.} \quad v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha,$$

$$a_x = 0, \quad a_y = -g, \quad v_x = v_0 \cos \alpha, \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt, \quad x = v_0 t \cos \alpha, \quad y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2},$$

$$y_1 = v_0 t_1 \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} = 0, \quad t_1 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}, \quad t_1 = \frac{2 \cdot 40 \cdot 0,8}{10} \text{ с} = 6,4 \text{ с}, \quad x_1 = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t_1,$$

$$x_1 \approx 40 \cdot 0,6 \cdot 6,4 \text{ м} \approx 153,6 \text{ м. } l = x_1 - x_0 = 153,6 \text{ м.}$$

$$7.1. \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}, \quad a_2 = a_1 \frac{m_1}{m_2}, \quad a_2 \approx 0,0027 \cdot \frac{7,35 \cdot 10^{22}}{6 \cdot 10^{24}} \text{ м/с}^2 \approx 0,000033 \text{ м/с}^2. \quad 7.2. \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1},$$

$$a_1 = a_2 \frac{m_2}{m_1}, \quad a_1 = 0,2 \cdot \frac{100}{200} \text{ м/с}^2 = 0,1 \text{ м/с}^2.$$

$$8.1. F = ma, \quad F = 0,008 \text{ кг} \cdot 600\,000 \text{ м/с}^2 = 4800 \text{ Н}. \quad 8.2. F_{\text{тр}} = \mu mg, \quad F_{\text{тр}} = ma,$$

$$a = \frac{F_{\text{тр}}}{m} = \frac{\mu N}{m} = \frac{\mu mg}{m} = \mu g, \quad a \approx 0,5 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \approx 5 \text{ м/с}^2. \quad 8.3. F = ma, \quad m = \frac{F}{a},$$

$$m = \frac{10 \text{ Н}}{2 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ кг}. \quad 8.4. F_p = F - F_T, \quad F_p = ma, \quad a = \frac{F_p}{m} = \frac{F - F_T}{m} = \frac{F - mg}{m} = \frac{F}{m} - g,$$

$$a \approx \frac{100 \text{ Н}}{5 \text{ кг}} - 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 10,2 \text{ м/с}^2. \quad 8.5. F_p = ma, \quad a = \frac{F_p}{m} = \frac{F + F_T}{m} = \frac{F + mg}{m} = \frac{F}{m} + g,$$

$$a \approx \frac{100 \text{ Н}}{5 \text{ кг}} + 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 29,8 \text{ м/с}^2. \quad 8.6. F_p = F - F_T = F - mg = ma,$$

$$F = m(g + a), \quad m = \frac{F}{g + a}, \quad m \approx \frac{2500 \text{ Н}}{10 \text{ м/с}^2 + 40 \text{ м/с}^2} \approx 50 \text{ кг}.$$

$$8.7. F_p = F - F_c = ma, \quad a = \frac{F - F_c}{m}, \quad a \approx \frac{900 \text{ Н} - 500 \text{ Н}}{100 \text{ кг}} = 4 \text{ м/с}^2.$$

$$9.1. \text{ Вектор } \vec{F}_2 \text{ является равнодействующей векторов } \vec{F}_3 \text{ и } \vec{F}_1. \quad 9.3. F_{\text{уп}} \cos \alpha - F_{\text{тр}} =$$

$$= ma, \quad a = \frac{F_{\text{уп}} \cos \alpha - F_{\text{тр}}}{m}, \quad F_{\text{тр}} = \mu N, \quad N = mg - F_{\text{уп}} \sin \alpha, \quad F_{\text{тр}} = \mu(mg - F_{\text{уп}} \sin \alpha),$$

$$a \approx \frac{100 \cdot 0,5 - 0,12 \cdot (30 \cdot 10 - 100 \cdot 0,87)}{30} \text{ м/с}^2 \approx 0,81 \text{ м/с}^2, \quad s = \frac{at^2}{2}, \quad s \approx \frac{0,81 \cdot 25}{2} \text{ м} \approx 10 \text{ м}.$$

$$9.4. \text{ При движении бруска вверх } a_1 = \frac{F + F_{\text{тр}}}{m}, \quad a_1 = \frac{mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha}{m} = g(\sin \alpha + \mu \cos \alpha),$$

$$t_1 = \frac{v_0}{a_1}, \quad s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{a_1 \frac{v_0^2}{a_1^2}}{2} = \frac{v_0^2}{2a_1}. \quad \text{При движении бруска вниз}$$

$$a_2 = \frac{F - F_{\text{тр}}}{m} = \frac{mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha}{m}, \quad a_2 = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha),$$

$$s_1 = \frac{a_2 t_2^2}{2}, \quad t_2 = \sqrt{\frac{2s_1}{a_2}} = \sqrt{\frac{2v_0^2}{2a_1 a_2}} = \frac{v_0}{\sqrt{a_1 a_2}},$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{v_0 \sqrt{a_1 a_2}}{a_1 v_0} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{g(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}} = \sqrt{\frac{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}}, \quad \frac{t_1}{t_2} \approx \sqrt{\frac{0,5 - 0,35 \cdot 0,87}{0,5 + 0,35 \cdot 0,87}} \approx 0,5.$$

$$9.5. F = F_T \operatorname{tg} \alpha = mgt \operatorname{tg} \alpha, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{h} = \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} = \frac{18}{24} = 0,75, \quad F = 0,05 \cdot 10 \cdot 0,75 \text{ Н} = 0,375 \text{ Н}.$$

$$10.5. a_1 = \frac{F_1}{m_1}, \quad a_2 = \frac{F_2}{m_2}, \quad a_1 m_1 = a_2 m_2, \quad a_2 = a_1 \frac{m_1}{m_2}, \quad a_2 = 1 \frac{0,1}{0,2} \text{ м/с}^2 = 0,5 \text{ м/с}^2$$

$$10.6. \vec{F} = \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_1 = m\vec{a}, \quad F = F_{\text{тр}} - F_1 = \mu mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = ma,$$

$$\mu = \frac{ma + mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \frac{a + g \sin \alpha}{g \cos \alpha}, \quad \mu = \frac{1 + 10 \cdot 0,3}{10 \cdot 0,95} \approx 0,42. \quad \mathbf{10.7.} \quad s = \frac{a_2 t_2^2}{2}, \quad t_2 = \sqrt{\frac{2s}{a_2}},$$

$$a_2 = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha), \quad a_1 = g(\sin \alpha + \mu \cos \alpha), \quad s = v_0 t_1 - \frac{a_1 t_1^2}{2} = a_1 t_1^2 - \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{a_1 t_1^2}{2},$$

$$a_1 = \frac{2s}{t_1^2}, \quad a_1 = \frac{11}{1} \text{ М/с}^2 = 11 \text{ М/с}^2, \quad \mu = \frac{a_1 - g \cdot \sin \alpha}{g \cdot \cos \alpha}, \quad \mu = \frac{11 - 10 \cdot 0,8}{10 \cdot 0,6} = 0,5,$$

$$a_2 = 10(0,8 - 0,5 \cdot 0,6) \text{ М/с}^2 = 5 \text{ М/с}^2, \quad t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 5,5}{5}} \text{ с} \approx 1,48 \text{ с}.$$

$$\mathbf{11.1.} \quad F_{\text{л}} = F_3 \cdot \frac{(3,7)^2}{81} \approx 8100 \cdot \frac{13,7}{81} \text{ Н} \approx 1370 \text{ Н}. \quad \mathbf{11.2.} \quad 400 \text{ Н}. \quad \mathbf{11.3.} \quad F_1 = mg = 1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ М/с}^2 =$$

= 10 Н. Убывание действующей на тело силы до 2,5 Н означает убывание в 4 раза. Для такого убывания расстояние должно увеличиться в 2 раза. Расстояние от центра Земли убывает в 2 раза при удалении тела на расстояние одного земного радиуса от земной поверхности. **11.4.** Решение аналогично решению задачи **11.3.**

$$\mathbf{11.5.} \quad F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}, \quad m_1 = \rho V_1 = \rho \frac{4}{3} \pi r_1^3, \quad m_2 = \rho V_2 = \rho \frac{4}{3} \pi r_2^3.$$

$$F = G \frac{\rho \frac{4}{3} \pi r_1^3 \cdot \rho \frac{4}{3} \pi r_2^3}{R^2} = G \frac{16 \pi^2 \rho^2 r_1^3 \cdot r_2^3}{9 R^2},$$

$$F \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{16 \cdot 9,87 \cdot 1,3 \cdot 10^8 \cdot 1,56 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} \text{ Н} \approx 5,9 \cdot 10^{-8} \text{ Н}. \quad \mathbf{11.6.} \quad a = g.$$

$$\mathbf{11.7.} \quad F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}, \quad F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{6 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^9}{(234)^2} \text{ Н} = 44 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$\mathbf{12.1.} \quad F = ma, \quad G \frac{mM}{r^2} = ma = m \frac{v^2}{r}, \quad M = \frac{rv^2}{G}, \quad v = \frac{2\pi r}{T}, \quad M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2},$$

$$M \approx \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot (2,346)^3 \cdot 10^{21}}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (1,263 \cdot 24 \cdot 3600)^2} \text{ кг} \approx 6,4 \cdot 10^{23} \text{ кг}. \quad \mathbf{12.2.} \quad a = g, \quad \frac{v^2}{R} = g, \quad v = \frac{2\pi R}{T},$$

$$\frac{4\pi^2 R}{T^2} = g, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{6\,400\,000}{9,8}} \text{ с} \approx 5,08 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 1,41 \text{ ч}.$$

$$\mathbf{12.3.} \quad F = ma = m \frac{v^2}{R} = m \frac{\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R} = m \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad \frac{F}{mg} = \frac{4\pi^2 R}{g \cdot T^2}, \quad \frac{F}{mg} \approx \frac{4\pi^2 \cdot 0,2}{9,8 \cdot (0,05)^2} \approx 322.$$

$$\mathbf{12.4.} \quad \vec{F} = \vec{F}_{\text{вып}} + m\vec{g}, \quad F = F_{\text{вып}} - mg, \quad F_{\text{вып}} = F + mg, \quad P = F_{\text{вып}} = F + mg,$$

$$\frac{P}{mg} = \frac{F}{mg} + 1, \quad F = ma, \quad a = \frac{v^2}{R}, \quad \frac{P}{mg} = \frac{mv^2}{Rmg} + 1 = \frac{v^2}{Rg} + 1, \quad v = 360 \text{ км/ч} = 100 \text{ М/с},$$

$$g \approx 10 \text{ М/с}^2, \quad \frac{P}{mg} = \frac{(100 \text{ М/с})^2}{250 \text{ М} \cdot 10 \text{ М/с}^2} + 1 = 5.$$

$$\mathbf{13.1.} \quad m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = 0, \quad m_1 v_1 - m_2 v_2 = 0, \quad v_2 = \frac{m_1}{m_2} v_1, \quad v_2 = \frac{50}{200} 8 \text{ М/с} = 2 \text{ М/с}.$$

$$\mathbf{13.2.} \quad m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_3 \vec{v}_3, \quad m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_3 v_3, \quad v_3 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_3},$$

$$v_3 = \frac{10\,000 \cdot 0,3 + 15\,000 \cdot 0,2}{25\,000} \text{ м/с} = 0,24 \text{ м/с.} \quad \mathbf{13.3.} \quad a = \frac{F}{M}, \quad F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v, \quad a = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{v}{M},$$

$$a = 3250 \cdot \frac{4000}{1000000} \text{ м/с}^2 = 13 \text{ м/с}^2.$$

14.1. $V = \frac{mv}{M}$, $\frac{MV^2}{2} = M \frac{m^2 v^2}{2M^2} = \frac{m}{M} \cdot \frac{mv^2}{2}$, $\frac{MV^2}{2} \neq \frac{mv^2}{2}$. **14.2.** Импульс искусственного спутника Земли за половину оборота с постоянной по модулю скоростью вокруг Земли по круговой орбите изменяется по направлению, а кинетическая энергия остаётся неизменной. **14.3.** $mv_2 = 2mv_1$, $v_2 = 2v_1$, $\frac{mv_2^2}{2} = \frac{m \cdot 4v_1^2}{2} = 4 \frac{m \cdot v_1^2}{2}$.

14.4. $\frac{mv^2}{2} = 20 \text{ Дж}$, $m \cdot v = 10 \text{ Н} \cdot \text{с}$, $m = \frac{10}{v} \text{ кг}$, $\frac{mv^2}{2} = \frac{10 \cdot v^2}{2} = 5v = 20 \text{ Дж}$, $v = 4 \text{ м/с}$.

14.5. $E_k = \frac{mv_3^2}{2}$, $E_k = \frac{1000 \cdot (20)^2}{2} \text{ Дж} = 200\,000 \text{ Дж}$. **14.6.** $\Delta E_{\text{кз}} = E_2 - E_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$,

$$\Delta E_{\text{кз}} = \frac{1000 \cdot (40)^2}{2} \text{ Дж} - \frac{1000 \cdot (20)^2}{2} \text{ Дж} = 600\,000 \text{ Дж}, \quad \Delta E_{\text{ка}} = E_4 - E_3 = \frac{mv_4^2}{2} - \frac{mv_3^2}{2},$$

$$\Delta E_{\text{ка}} = \frac{1000 \cdot (20)^2}{2} \text{ Дж} - \frac{1000 \cdot (0)^2}{2} \text{ Дж} = 200\,000 \text{ Дж.} \quad \mathbf{14.7.} \quad \eta Q = \Delta E_{\text{к}}, \quad \eta m_{\text{с}} r = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$m_{\text{с}} = \frac{m(v_1^2 - v_0^2)}{2\eta r}, \quad m_{\text{с}} = \frac{1000 \cdot (900 - 0)}{2 \cdot 0,4 \cdot 45000000} \text{ кг} = 0,025 \text{ кг} = 25 \text{ г.} \quad \mathbf{14.8.} \quad Q = \Delta E_{\text{к}},$$

$$m_{\text{к}} r = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}, \quad m_{\text{к}} = \frac{m(v_1^2 - v_0^2)}{2r}, \quad m_{\text{к}} = \frac{80 \cdot (7900)^2}{2 \cdot 43\,000\,000} \text{ кг} \approx 58 \text{ кг}.$$

15.1. $A = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$, $A = \frac{5 \cdot 100}{2} \text{ Дж} - \frac{5 \cdot 0}{2} \text{ Дж} = 250 \text{ Дж}$.

15.2. $A = \Delta E_{\text{к}} = E_{\text{к}} - E_{\text{к}0} = E_{\text{к}}$, $A = F \cdot h = mgh$, $E_{\text{к}} = A = 80 \cdot 5 \cdot 10 \text{ Дж} = 4000 \text{ Дж}$.

15.3. $A = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$, $A = \frac{2000 \cdot 900}{2} \text{ Дж} - \frac{2000 \cdot 0}{2} \text{ Дж} = 900\,000 \text{ Дж}$.

15.4. $A = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$, $A = \frac{1000 \cdot 1600}{2} \text{ Дж} - \frac{1000 \cdot 400}{2} \text{ Дж} = 600\,000 \text{ Дж}$.

15.5. $A_1 = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$, $A_2 = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$, $\frac{A_1}{A_2} = \frac{mv_1^2 - mv_0^2}{mv_2^2 - mv_1^2} = \frac{v_1^2 - v_0^2}{v_2^2 - v_1^2}$,

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{25}{100 - 25} = \frac{1}{3}. \quad \mathbf{15.6.} \quad A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} s = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2},$$

$$A_{\text{тр}} = \frac{80 \cdot (100 - 400)}{2} \text{ Дж} = -12\,000 \text{ Дж.} \quad \mathbf{15.7.} \quad \Delta E_{\text{к}} = A = F \cdot s \cdot \cos \alpha = -F \cdot s,$$

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{Ft^2}{2m}, \quad \Delta E_{\text{к}} = -\frac{F^2 t^2}{2m}, \quad \Delta E_{\text{к}} = -\frac{100 \cdot 25}{2 \cdot 2} \text{ Дж} = -625 \text{ Дж}.$$

16.1. Не изменяется. **16.2.** $\Delta E_k = -\Delta E_n$, $\Delta v_1 = \Delta v_2$, $v_0 = 0$, $v_1 = v_2$, $v_1/v_2 = 1$.

Время t_1 свободного падения с высоты 5 м равно $h = \frac{gt_1^2}{2}$, $t_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$, $t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{10}}$ с = 1 с.

Время t_2 равноускоренного движения по наклонной плоскости длиной $l = 10$ м с той же высоты 5 м без трения равно $t_2 = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{2l}{g \sin \alpha}}$, $t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{10 \cdot 0,5}}$ с = 2 с, $t_1/t_2 = 0,5$.

16.3. $A = \Delta E_n = \Delta E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{2 \cdot 100}{2}$ Дж = 100 Дж. **16.4.** $\vec{F} = \vec{F}_1 + m\vec{g}$, $F = F_1 - mg$,

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F_1 - mg}{m} = \frac{F_1}{m} - g, \quad a = \frac{40}{2} \text{ м/с}^2 - 10 \text{ м/с}^2 = 10 \text{ м/с}^2, \quad s = \frac{at^2}{2}, \quad s = \frac{10 \cdot 1}{2} \text{ м} = 5 \text{ м},$$

$$A = F_1 s = 40 \cdot 5 \text{ Дж} = 200 \text{ Дж}, \quad \Delta E_n = mgh = mgs = 2 \cdot 10 \cdot 5 \text{ Дж} = 100 \text{ Дж},$$

$\Delta E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(at)^2}{2}$, $\Delta E_k = \frac{2 \cdot (10 \cdot 1)^2}{2}$ Дж = 100 Дж. Работа, совершённая силой F_1 , равна сумме изменений кинетической и потенциальной энергии тела.

$$\mathbf{17.1.} \quad E_n = \frac{kx^2}{2}, \quad E_n = \frac{6 \cdot 0,01}{2} \text{ Дж} = 0,03 \text{ Дж.} \quad \mathbf{17.2.} \quad E_n = \frac{kx^2}{2}, \quad k = \frac{F}{x}, \quad E_n = \frac{F \cdot x^2}{2} = \frac{Fx}{2},$$

$$A = E_n = \frac{40 \cdot 0,08}{2} \text{ Дж} = 1,6 \text{ Дж.} \quad \mathbf{17.3.} \quad A_1 = E_{n1} = \frac{kx_1^2}{2}, \quad k = \frac{F}{x}, \quad E_{n1} = \frac{F \cdot x_1^2}{2} = \frac{Fx_1^2}{2},$$

$$A_1 = \frac{100 \cdot 0,0004}{2 \cdot 0,05} \text{ Дж} = 0,4 \text{ Дж}, \quad E_{n2} = \frac{kx_2^2}{2}, \quad k = \frac{F}{x}, \quad E_n = \frac{F \cdot x_2^2}{2} = \frac{Fx_2^2}{2},$$

$$E_{n2} = \frac{100 \cdot 0,0016}{2 \cdot 0,05} \text{ Дж} = 1,6 \text{ Дж.} \quad \mathbf{17.4.} \quad E_{n2} = \frac{kx_2^2}{2} = 4 \frac{kx_1^2}{2} = 4E_{n1}. \quad \mathbf{17.5.} \quad E_{n2} = \frac{kx_2^2}{2},$$

$$E_{n1} = \frac{kx_1^2}{2}, \quad k = \frac{2E_{n1}}{x_1^2}, \quad E_{n2} = \frac{2E_{n1} \cdot x_2^2}{x_1^2} = E_{n1} \frac{x_2^2}{x_1^2}, \quad E_{n2} = 10 \cdot \frac{0,0004}{0,0025} \text{ Дж} = 1,6 \text{ Дж.}$$

$$\mathbf{17.6.} \quad k = \frac{F}{x}, \quad k = \frac{4}{0,05} \text{ Н/м} = 80 \text{ Н/м}, \quad E_n = \frac{kx_1^2}{2}, \quad E_n = \frac{80 \cdot 0,01}{2} \text{ Дж} = 0,4 \text{ Дж.}$$

$$\mathbf{19.1.} \quad \frac{mv^2}{2} = cm\Delta t + \lambda m, \quad v = \sqrt{2(cm\Delta t + \lambda)}, \quad v = \sqrt{2(130 \cdot 300 + 25000)} \text{ м/с} \approx 358 \text{ м/с.}$$

$$\mathbf{19.2.} \quad mgh = cm\Delta t + rm, \quad h = \frac{c\Delta t + r}{g}, \quad h = \frac{4200 \cdot 75 + 2256000}{9,8} \text{ м} \approx 262 \text{ 000 м} \approx 262 \text{ км.}$$

$$\mathbf{23.1.} \quad F_k = k \frac{e \cdot e}{r^2}, \quad F_t = G \frac{m_p \cdot m_p}{r^2}, \quad \frac{F_t}{F_k} = \frac{Gm_p \cdot m_p}{k \cdot e \cdot e}, \quad \frac{F_t}{F_k} \approx \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (1,67)^2 \cdot 10^{-54}}{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6)^2 \cdot 10^{-38}} \approx 10^{-36}.$$

23.2. $\Delta m = 2 \cdot 1,00728 \text{ а.е.м.} + 2 \cdot 1,00866 \text{ а.е.м.} - 4,00151 \text{ а.е.м.} \approx 0,03037 \text{ а.е.м.}$,
 $\Delta E = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \cdot 0,03037 \text{ а.е.м.} \approx 28,3 \text{ МэВ.}$ **23.3.** $E = \Delta mc^2$, $\Delta m = 7m_p +$
 $+ 7m_n - m_N$, $\Delta m = 7 \cdot 1,00728 \text{ а.е.м.} + 7 \cdot 1,00866 \text{ а.е.м.} - 13,99923 \text{ а.е.м.} =$
 $= 0,11235 \text{ а.е.м.}$, $\Delta E = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \cdot 0,11235 \text{ а.е.м.} \approx 104,6 \text{ МэВ,}$
 $f \approx 7,48 \text{ МэВ/нуклон.}$ **23.4.** $m_{\text{He}} = 4,00151 \text{ а.е.м.} = 4,00151 \text{ а.е.м.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг/а.е.м.} =$

$$= 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad N = \frac{m}{m_n}, \quad N \approx \frac{1 \text{ кг}}{6,64 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 1,5 \cdot 10^{26}, \quad E = N \cdot \Delta E$$

$$E \approx 1,5 \cdot 10^{26} \cdot 28,3 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ} \approx 6,8 \cdot 10^{14} \text{ Дж},$$

$\frac{E}{mq} \approx \frac{6,8 \cdot 10^{14} \text{ Дж}}{1 \text{ кг} \cdot 44\,000\,000 \text{ Дж/кг}} \approx 1,5 \cdot 10^7$. При синтезе 1 кг гелия из протонов и нейтронов выделяется в 15 млн раз больше энергии, чем при сжигании 1 кг бензина.

23.5. $m_{\text{Al}} = 26,974409 \text{ а.е.м.} = 26,974409 \text{ а.е.м.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг/а.е.м.} = 44,8 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$,
 $\Delta E = \Delta mc^2$, $\Delta m = 13m_p + 14m_n - m_{\text{Al}}$, $\Delta m \approx 13 \cdot 1,00728 \text{ а.е.м.} + 14 \cdot 1,00866 \text{ а.е.м.} -$
 $- 26,974409 \text{ а.е.м.} \approx 0,24 \text{ а.е.м.}$, $\Delta E = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \cdot 0,24 \text{ а.е.м.} \approx 223,56 \text{ МэВ}$,

$$N = \frac{m}{m_{\text{Al}}}, \quad N \approx \frac{0,001 \text{ кг}}{44,8 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 2,2 \cdot 10^{22}, \quad E = N \cdot \Delta E,$$

$$E \approx 2,2 \cdot 10^{22} \cdot 223,56 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ} \approx 7,87 \cdot 10^{11} \text{ Дж},$$

$$mq = E, \quad m = \frac{E}{q}, \quad m \approx \frac{7,87 \cdot 10^{11} \text{ Дж}}{30\,000\,000 \text{ Дж/кг}} \approx 2,6 \cdot 10^4 \text{ кг} = 26 \text{ т}.$$

24.1. $m_{6\text{C}}^{14} = 13,99995 \text{ а.е.м.}$, $m_{7\text{N}}^{14} + m_e = 13,99923 \text{ а.е.м.} + 0,00055 \text{ а.е.м.} =$
 $= 13,99978 \text{ а.е.м.}$, $m_{6\text{C}}^{14} > m_{7\text{N}}^{14} + m_e$, распад возможен.

24.2. $m_{5\text{B}}^{10} = 10,01019 \text{ а.е.м.}$ $m_{3\text{Li}}^6 + m_{2\text{He}}^4 = 6,01348 \text{ а.е.м.} + 4,00151 \text{ а.е.м.} =$
 $= 10,01499 \text{ а.е.м.}$, $m_{5\text{B}}^{10} < m_{3\text{Li}}^6 + m_{2\text{He}}^4$, распад невозможен.

26.1. Нейтрон. **26.2.** ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^{12}_6\text{C}$. **26.3.** ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{93}_{36}\text{Kr} + {}^{140}_{56}\text{Ba} + 3{}^1_0\text{n}$.

26.4. 1) $\approx 5,5 \text{ МэВ}$; 2) $\approx 4,02 \text{ МэВ}$; 3) $\approx 17,6 \text{ МэВ}$; 4) $\approx 12,8 \text{ МэВ}$; 5) $\approx -2,6 \text{ МэВ}$.

Тест 3

№ ответа	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15
1	×					×		×					×		
2			×							×					
3							×		×			×			
4		×			×									×	×
5											×				

Ответы к вопросам (с. 94)

1. В экспериментах выполняют повторные измерения для того, чтобы убедиться, что при одинаковых условиях опыта получаются одинаковые результаты. Это называется воспроизводимостью результатов эксперимента. Вторая причина — для уменьшения влияния случайных погрешностей на результаты измерений.

2. Случайные ошибки при измерениях бывают как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения от истинного значения. Поэтому среднее арифметическое значение из результатов нескольких измерений имеет меньшую случайную погрешность измерений, чем большинство одиночных измерений.

Ответы к задачам (с. 94)

1. Время движения катера по озеру равно $t_1 = \frac{2s}{v_1}$, $t_1 = \frac{1200}{3} \text{ с} = 400 \text{ с}$.

Время движения катера по реке против течения равно

$$t_2 = \frac{s}{v_1 - v_2}, t_2 = \frac{600}{2} \text{ с} = 300 \text{ с}.$$

Время движения катера по реке по течению равно $t_3 = \frac{s}{v_1 + v_2}$, $t_3 = \frac{600}{4} \text{ с} = 150 \text{ с}$.

Общее время движения катера по реке равно $t_4 = t_2 + t_3 = 450 \text{ с}$.

2. $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$, если $v_0 \geq at$. Условие остановки автомобиля: $v_0 = at$.

$$t = \frac{v_0}{a} = \frac{20}{4} \text{ м/с}^2 = 5 \text{ с}.$$

Пройденный путь до остановки равен $s = 20 \cdot 5 \text{ м} - \frac{4 \cdot 25}{2} \text{ м} = 50 \text{ м}$.

3. $s_2 = \frac{at_2^2}{2} - \frac{at_1^2}{2} = \frac{a \cdot 4}{2} - \frac{a \cdot 1}{2} = \frac{3}{2}a = 3 \text{ (м)}$, $a = 2 \text{ м/с}^2$, $s_1 = \frac{at_1^2}{2} = \frac{a \cdot 1}{2} = \frac{2 \cdot 1}{2} \text{ м} = 1 \text{ м}$.

4. Только масса.

5. $a = \frac{mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha}{m} = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$.

Монета будет скользить вниз по доске при выполнении неравенства $\sin \alpha - \mu \cos \alpha > 0$.

Подставляем данные задачи: $0,8 - 0,5 \cdot 0,6 = 0,5 > 0$. Монета будет скользить. Вычисляем ускорение $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = 10 \cdot 0,5 \text{ м/с}^2 = 5 \text{ м/с}^2$.

6. $G \frac{m \cdot M_3}{(54R_3)^2} = G \frac{m \cdot M_{\text{Л}}}{(x - 54R_3)^2}$, $\frac{81M_{\text{Л}}}{(54R_3)^2} = \frac{M_{\text{Л}}}{(x - 54R_3)^2}$, $81 \cdot (x - 54R_3)^2 = (54R_3)^2$,

$$9x = 10 \cdot 54R_3, x = 60R_3.$$

$$7. m_1 \Delta v_1 = m_2 \Delta v_2, \quad \Delta v_2 = \frac{m_1 \Delta v_1}{m_2} = \frac{32000}{8000} \Delta v_1 = 4 \Delta v_1,$$

$$\frac{kx^2}{2} = \frac{m_1 \Delta v_1^2}{2} + \frac{m_2 \Delta v_2^2}{2} = \frac{m_1 \Delta v^2}{2} + \frac{m_2 \cdot 16 \Delta v_1^2}{2}, \quad \Delta v_1^2 = \frac{kx^2}{m_1 + 16m_2}, \quad \Delta v_1 = \sqrt{\frac{kx^2}{m_1 + 16m_2}},$$

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{1600 \cdot 0,01}{32000 + 16 \cdot 8000}} \text{ м/с} = 0,01 \text{ м/с}, \quad \Delta v_2 = 0,04 \text{ м/с}.$$

Ответы к экспериментальным заданиям (с. 94)

Эксп. з. 1. Эксперимент по исследованию зависимости периода колебаний шара на нити от его начального отклонения (амплитуды колебаний) легко выполнить, если изготовить маятник такой длины, при которой период колебаний маятника совпадает с периодом биения сердца.

Эксп. з. 2. Скорость v движения воды в струе, вытекающей из водопроводного крана диаметром D , можно определить, измерив время t , за которое из крана вытекает некоторый объём V воды: $V = S \cdot l = S \cdot v \cdot t$, $v = \frac{V}{S \cdot t}$, $S = \frac{\pi D^2}{4}$.

Эксп. з. 3. По длине s тормозного пути при известном значении силы трения можно найти работу A силы трения: $A = -Fs$. Эта работа равна изменению кинетической энергии монеты: $-Fs = 0 - \frac{mv^2}{2} = -\frac{mv^2}{2}$. Отсюда скорость v монеты

перед началом торможения равна $v = \sqrt{\frac{2Fs}{m}}$. Сила трения на горизонтальной

поверхности равна $F = \mu mg$, поэтому $v = \sqrt{2\mu gs}$, где μ — коэффициент трения; g — ускорение свободного падения.

Коэффициент трения можно найти, изменяя высоту h наклонной плоскости так, чтобы её значение, при котором действие составляющей вектора силы тяжести, направленной вдоль наклонной плоскости, уравновешивалось действием силы трения скольжения: $mgs \sin \alpha = F = \mu N = \mu mg \cos \alpha$.

Из последнего равенства следует, что коэффициент трения равен $\mu = \tan \alpha$.

Тангенс угла наклона плоскости можно вычислить, измерив высоту h наклонной плоскости и длину a её основания: $\mu = \tan \alpha = h/a$.

Ответы к заданиям

для подготовки к итоговому контролю (с. 129)

1. 10 м/с. 2. 2 м/с². 3. 0,5 м/с². 4. 20 Н. 5. 100 Н. 6. 250 000 Н. 7. 5 м/с.
8. 180 000 Дж. 9. 0,1 м. 10. Потенциальная энергия увеличивается на $6 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия не изменяется. 11. 20 Дж. 12. Внутри атома имеется положительно заряженное ядро малых размеров с большой массой и сильным электрическим полем. 13. Атомы вещества не взаимодействуют друг с другом. Энергия любого атома может изменяться лишь определёнными порциями, квантами. При переходе атома из одного квантового состояния в другое испускается свет определённой частоты. 14. Происходит самопроизвольное превращение ядра с выбросом одного электрона. 15. Зарядовое число уменьшается на 2, массовое число уменьшается на 4. 16. Протон. 17. 8,48 МэВ.

- Альфа-распад **108**
 Альфа-частица **96**
 Антинейтрино **108**
Аристарх Самосский **136**
 Аристотель **132**
 Астероид **144**
 Атом **96**
 Атомная бомба **123**
 — единица массы **106**
 Атомное ядро **104**
- Беккерель Анри* **158**
 Беккерель **109**
 Бета-распад **108**
 Бета-частица **108**
 Большой взрыв **155**
Бор Нильс **100**
Бруно Джордано **138**
- Вес **55**
 Вечный двигатель **87**
 Вселенная **154**
 Высота светила **15**
 Выход ядерной реакции **116**
- Галактика **153**
Галилей Галилео **7, 137**
 Гамма-излучение **108**
 Гамма-квант **108**
 Гелиоцентрическая система мира **136**
 Геоцентрическая система мира **132**
Гершель Вильям **152**
 Гипотеза
 — метафизическая **7**
 — научная **7**
 — псевдонаучная **7**
 — фантастическая **7**
 Годичный параллакс **138**
 Гравитационная постоянная **50**
 Грей **124**
- Двигатель внутреннего сгорания **88**
 — газотурбинный **89**
 — Дизеля **89**
 — ракетный **90**
 — турбореактивный **90**
 Движение механическое **12**
 — прямолинейное **18**
 — равноускоренное **17**
 — реактивное **62**
 Дефект массы **104**
 Доза излучения **124**
 Дозиметр **126**
 Дозиметрия **124**
 Доплера эффект **19**
- Закон всемирного тяготения **50**
 — Гука **38**
 — инерции **34**
 — механики второй **38**
 — — первый **34**
 — Ньютона второй **38**
 — — третий **46**
 — радиоактивного распада **109**
 — сохранения импульса **60**
 — сохранения и превращения энергии **85**
 — сохранения механической энергии **80**
 — термодинамики первый **85**
 Законы сохранения при ядерных
 реакциях **118**
 Звезда
 — источник энергии **149**
 — нейтронная **150**
 — новая **151**
 — сверхновая **151**
 — эволюция **149**
 Зиверт **124**
- Изотоп **106**
 Импульс **60**
 Инертность **34**
- Кавендиш Генри* **51**
 Камера Вильсона **112**
 Катодные лучи **98**
 Квант **102**
Кеплер Иоганн **136**
 Комета **144**
 Координаты точки **12**
 — географические **14**
Коперник Николай **136**
Королёв С. П. **90**
 Коэффициент упругости **39**
 КПД теплового двигателя **86**
Кюри Мария **159**
Кюри Пьер **159**
- Леонардо да Винчи* **87**
- Масса **34**
 Массовое число **104**
 Масс-спектрограф **106**
 Материальная точка **12**
 Метеор **144**
 Метеорит **144**
 Методы регистрации ядерных
 излучений **112**
 Механический эквивалент теплоты **84**
Менделеев Д. И. **106**
 Млечный Путь **152**
 Модель
 — атома Томсона **96**
 — Резерфорда **96**

- атомного ядра 97
- Мощность дозы облучения 124
- Небесный экватор 14
- Невесомость 55
- Нейтрон 104
- Нуклон 104
- Ньютон Исаак* 50
- Ось мира 14
- Относительность движения 13
- Падение свободное 17
- Паровая турбина 88
- Перегрузка 55
- Планеты 140, 146
- Планк Макс* 102
- Поглощённая доза излучения 124
- Постоянная Планка 102
- распада 109
- Постулаты Бора 100
- Предельно допустимая доза облучения 125
- Проекция вектора скорости 13
- Протон 104
- Птолемей* 133
- Путь
 - при равноускоренном прямолинейном движении 20
 - тормозной 69
- Равнодействующая сил 42
- Радиоактивность 108
- Радиационный фон естественный 124
- Ракета 82, 90
- Расширение Вселенной 154
- Резерфорд Эрнест* 96
- Рентген Вильгельм* 156
- Рентгеновские лучи 156
- Сила 38
 - инерции 48
- Система отсчёта 42
 - инерциальная 37
 - неинерциальная 40
- Скорость мгновенная 16
 - вторая космическая 54, 83
 - первая космическая 54
 - угловая 26
- Созвездие 152
- Солнечная активность 148
- Солнечная система 140
- Солнечный ветер 148
- Солнце 148
- Спектр линейчатый 100
- Струве В. Я.* 139
- Счётчик Гейгера—Мюллера 113
- Сцинтилляционный счётчик 113
- Термоядерная бомба 123
- Термоядерный синтез 122
- Тихо Браге* 136
- Томсон Дж. Дж.* 96, 98
- Точка материальная 12
- Траектория движения 12
- Туманность внегалактическая 154
 - газовая 153
- Турбина паровая 88
- Уравнение Эйнштейна 105
- Ускорение 16
 - свободного падения 17
 - центростремительное 24
- Фарадей Майкл* 98
- Фотон 102
- Холодильник компрессионный 90
- Хронометр 15
- Чёрная дыра 151
- Эквивалентная доза излучения 124
- Эксперимент 6
- Электрон 98
- Элементарный электрический заряд 99
- Эллипс 54
- Энергия 64
 - кинетическая 65
 - потенциальная гравитационного взаимодействия 72
 - упругой деформации 76
 - покоя 105
 - связи атомного ядра 105
 - удельная 105
- Эйнштейн Альберт* 102
- Ядерная модель 96
 - реакция 116
 - энергетика 120, 122
 - энергия 121
- Ядерные реакции синтеза 119
 - — цепные 116
- Ядерные силы 104
- Ядерный реактор 120
- Ядро атомное 104

Предисловие	3
Физика и физические методы изучения природы	
§ 1. Методы научного познания	6
Законы механического движения	
§ 2. Система отсчёта и координаты точки	12
§ 3. Мгновенная скорость. Ускорение	16
§ 4. Путь при равноускоренном движении	20
§ 5. Равномерное движение по окружности	24
§ 6. Относительность механического движения	28
Тест 1	32
§ 7. Первый закон Ньютона	34
§ 8. Второй закон Ньютона	38
§ 9. Сложение сил	42
§ 10. Третий закон Ньютона	46
§ 11. Закон всемирного тяготения	50
§ 12. Движение тел под действием силы тяжести	54
Законы сохранения	
§ 13. Закон сохранения импульса	60
§ 14. Кинетическая энергия	64
§ 15. Работа	68
§ 16. Потенциальная энергия гравитационного притяжения тел	72
§ 17. Потенциальная энергия при упругой деформации тел	76
§ 18. Закон сохранения механической энергии	80
§ 19. Закон сохранения энергии в тепловых процессах	84
§ 20. Принцип работы тепловых машин	88
Тест 2	92
Квантовые явления	
§ 21. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома	96
§ 22. Линейчатые оптические спектры. Поглощение и испускание света атомами	100
§ 23. Состав атомного ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядра	104
§ 24. Радиоактивность	108
§ 25. Экспериментальные методы регистрации заряженных частиц	112
§ 26. Ядерные реакции	116
§ 27. Ядерная энергетика	120
§ 28. Дозиметрия	124
Тест 3	128
Строение Вселенной	
§ 29. Геоцентрическая система мира	132
§ 30. Гелиоцентрическая система мира	136
§ 31. Физическая природа планет Солнечной системы	140
§ 32. Малые тела Солнечной системы. Происхождение Солнечной системы	144
§ 33. Физическая природа Солнца и звёзд	148
§ 34. Строение и эволюция Вселенной	152
Как и зачем делаются научные открытия	156
Ответы к задачам	162
Коды правильных ответов на задания тестов	169
Предметно-именной указатель	172