О. Ф. Кабардин
С. И. Кабардина

ФИЗИКА

КНИГА ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

9 класс

Пособие для общеобразовательных учреждений

Москва «Просвещение» 2010

УДК 372.8:53
ББК 74.262.22
К12

Кабардин О. Ф.

К12 Физика. Книга для учителя. 9 класс : пособие для общеобразоват. учреждений / О. Ф. Кабардин, С. И. Кабардина. — М. : Просвещение, 2010. — 111 с. : ил. — ISBN 978-5-09-020969-4.

В пособии раскрываются основные концептуальные идеи учебника, показано, как организовать работу учителя при подготовке к каждому уроку и его проведению. С этой целью даны варианты изложения теоретического материала, рекомендации по подготовке к проведению экспериментальных заданий, примеры решения задач, варианты тестов для проверки усвоения учебного материала и т. д.

В пособии использованы материалы из работ, выполненных в ИНИМ РАО.

УДК 372.8:53
ББК 74.262.22

ISBN 978-5-09-020969-4

© Издательство «Просвещение», 2010
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2010
Все права защищены

Глава 1

Цели и задачи обучения физике в основной школе

Цели и средства обучения физике. Настоящее методическое пособие предназначено для использования при обучении физике в 9 классе по учебнику О. Ф. Кабардина. Основное внимание в нём уделено конкретным методическим рекомендациям по изучаемым темам курса физики. Проблемы выбора целей и средств обучения физике в основной школе изложены в первой главе книги для учителя «Физика, 7 класс» авторов О. Ф. Кабардина, С. И. Кабардиной. При разработке учебника «Физика, 9 класс» автором были приняты следующие исходные положения.

Актуальной задачей современной российской школы является перенос основного внимания с процесса передачи знаний на развитие интеллектуальных и творческих способностей школьников, формирование умений самостоятельного приобретения новых знаний в соответствии с жизненными потребностями и интересами учащихся. Решение этой задачи затрудняется укоренившимся в сознании многих учителей представлением о процессе обучения в школе как таком процессе, в котором учителю принадлежит ведущая роль, а ученик является объектом целенаправленного педагогического воздействия для придания этому объекту наперёд заданных свойств. Параметры этих заданных свойств вычитываются из образовательных стандартов, требований к знаниям и умениям учащихся, учебников, тестов ЕГЭ.

Подобные взгляды на процесс обучения представляются на практике обречёнными на неудачу. Принципиально неприемлем подход к ученику как к объекту целенаправленного внешнего воздействия по одинаковой для всех объектов программе. Каждый ученик как уникальная, неповторимая личность должен рассматриваться не как объект целенаправленного внешнего воздействия, а как субъект, равный по значимости любому другому человеку, в том числе и учителю. Ученик должен быть для учителя целью процесса обучения, а не объектом воздействия, не продуктом процесса.

Признав ученика целью процесса обучения, нужно осознать, что школа, учителя, учебные предметы являются средствами, служащими этой цели. Нормальная роль учителя в этой системе — это роль помощника ученика, а не контролёра.

Соответственно любой учебный предмет должен рассматриваться не как цель, которой должен достигнуть учащийся, а лишь как одно из средств школы для достижения основной цели — максимального развития индивидуальных способностей каждой личности. Учитель призван средствами своего предмета предоставлять разнообразные возможности для развития личности учащегося, отмечать все его успехи, создавая стимулы к продолжению обучения.

Для оказания помощи ученику в развитии его способностей учитель должен владеть эффективными средствами обучения. Обучение и развитие, по Л. С. Выготскому, происходят эффективно в том случае, если предлагаемые задания по уровню трудности несколько выше достигнутого уровня развития обучаемого. Это ориентация на зону ближайшего развития — на завтра, а не на вчера в развитии ребенка. Это может быть достигнуто постановкой перед учащимися на каждом уроке трудных проблем, требующих умственных усилий.

Ориентация на трудное обучение не приведёт к успеху без внутренней мотивации учащихся к процессу учения. Выбор средств мотивации к учению в основной школе небольшой. В этом возрасте немногие учащиеся задумываются о выборе жизненного пути после

окончания школы, поэтому основным средством мотивации к учению для большинства школьников может служить возбуждение интереса к изучаемому предмету.

Способности учащихся основной школы удерживать произвольное внимание весьма ограниченны, а непроизвольное внимание, возбуждённое эффектным опытом или рассказом о необыкновенном явлении, затухает через 5—10 минут.

Эффективным средством решения проблем обучения может служить использование деятельностного подхода к процессу обучения. Деятельностный подход к процессу обучения необходимо использовать не как ситуативное средство, а как одно из основных средств обучения, используемых на каждом уроке, так как процессы познания окружающего мира и развития способностей человека происходят только в процессе его индивидуальной самостоятельной и активной познавательной деятельности. В процессе подготовки к каждому уроку основной вопрос, на который должен найти ответ учитель, это не вопрос «Что я буду говорить и показывать на уроке?», а вопрос «Что ученики будут делать на этом уроке?». Если ответом на этот вопрос является утверждение, что ученики должны будут внимательно слушать объяснение учителя и затем отвечать на его вопросы, то это означает, что планируется урок с использованием метода вербального (словесного) обучения. Конечно, слушать объяснение и отвечать на вопросы — это тоже деятельность, но повседневно повторяемая на большинстве уроков и малоэффективная. Призыв к использованию деятельностного подхода в процессе обучения физике ориентирует на выбор таких видов деятельности учащихся, в которых они самостоятельно решают поставленные перед ними проблемы в процессе выполнения опытов, экспериментальных заданий, решения задач, участия в коллективном обсуждении поставленных теоретических проблем, планов выполнения экспериментов или результатов их выполнения.

Одним из мотивов к продолжению любой деятельности для человека является успешность этой деятельности. Без успехов нет желания к продолжению деятельности, без желания нет и самой деятельности, а есть лишь её имитация. Поэтому обучение должно быть успешным, победным.

Осуществление процесса обучения физике на основе деятельностного подхода с использованием методов проблемного обучения, с достижением высокого уровня внутренней мотивации учащихся к учению является весьма сложной задачей. Наибольшую трудность создаёт несоответствие между объёмом обязательного учебного материала и временем, отводимым на его изучение. Традиционная методика по схеме «прослушай — прочитай — воспроизведи» требует значительно меньших затрат времени, чем методика изучения того же материала на основе принципа проблемного обучения и деятельностного подхода.

Успешному решению задач развивающего обучения может способствовать использование принципа личностно ориентированного обучения. Согласно этому принципу объём содержания обучения и уровень его сложности в значительной мере должен определять для себя сам учащийся в соответствии со своими интересами и способностями. При этом образовательный стандарт должен рассматриваться не как перечень терминов, правил, законов и фактов для «выучивания», а как систематизированный свод материалов, предлагаемых учителю и учащимся для достижения основной цели обучения — развития познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей школьников, формирования умений самостоятельного приобретения новых знаний в соответствии с жизненными потребностями и интересами.

При таком подходе к образовательному стандарту нужны более строгий отбор обязательного материала, выделение самого главного в каждой теме.

Для осуществления деятельностного подхода к обучению на практике необходимо планировать процесс обучения таким образом, чтобы на самостоятельную познавательную и поисковую деятельность учащихся — выполнение экспериментальных заданий, опытов, решение задач — отводилось более половины учебного времени. Виды самостоятельной познавательной и поисковой деятельности учащихся на уроках

физики могут быть следующие: кратковременные экспериментальные задания или опыты почти на каждом уроке; экспериментальные задания, рассчитанные на целый урок; решение задач; самостоятельная работа над текстом учебника; участие в коллективном обсуждении проблем, поставленных учителем перед всем классом.

Самостоятельная познавательная и поисковая деятельность учащихся не должна ограничиваться только уроками физики. На каждом уроке школьникам, проявляющим интерес к изучению физики, желательно предлагать различные задания по выбору. Это могут быть экспериментальные задания для выполнения в классе или дома, задачи повышенной трудности, материалы из истории физики или о применении физики в технике и в повседневной жизни, темы для самостоятельных исследований, задания конструкторского типа.

Личностно ориентированный подход к обучению на обычных уроках можно рассматривать как мягкую форму дифференциации процесса обучения с целью выявления талантливых детей и предоставления им возможности более быстрого и успешного развития. Эта форма дифференциации, основанная только на личном интересе учащегося, не уменьшает возможностей проявления интереса к другим учебным предметам и внешкольным занятиям. Вход в эту форму дифференциации и выход из неё открыт на каждом уроке на всём протяжении обучения. Это признак реальной личностной ориентации процесса обучения.

Развитие творческих способностей учащихся неразрывно связано с положительной мотивацией обучения, формированием их познавательных интересов, умениями применять приобретённые знания на практике, излагать и обосновывать свою точку зрения по обсуждаемому вопросу, с развитием самостоятельности школьника в выборе содержания обучения и видов познавательной и творческой деятельности. Одной из форм организации учебного процесса, способствующей развитию самостоятельности школьника в выборе содержания обучения, приобретению опыта поиска информации и её систематизации, изложения и обоснования своей точки зрения по избранной теме, является подготовка школьниками докладов для выступлений на семинарах или тематических конференциях.

Исследования психологов свидетельствуют о том, что у старших школьников семинарская форма вызывает большой интерес. Учебные семинары в старших классах могут быть эффективной формой коллективной работы, если к содержанию докладов будет проявлен общий интерес и возникнет дискуссия, в процессе которой каждый следит за столкновением мнений, стремится определить собственную точку зрения.

Общий интерес к темам сообщений может возникнуть лишь в том случае, если будет выполнен ряд простых, но обязательных условий:

— в сообщении должна быть новизна, необычность;

— изложение нового должно быть ярким и доступным для понимания;

— основной целью доклада должно быть не сообщение какого-то нового научного факта (открыта 138-я элементарная частица, учёные нагрели плазму до температуры 1 000 000 К и т. д.), а рассказ о том, над решением какой научной проблемы работают учёные и каких успехов они достигли;

— в сообщении должны быть представлены и альтернативные точки зрения на излагаемую проблему с целью стимуляции обсуждения и дискуссии.

Для выполнения перечисленных условий необходима продуманная подготовка к семинару. Она начинается с предложения учащимся тем выступлений для выбора по желанию. Для начала работы по каждой теме необходимо подготовить несколько источников информации из книг, журналов и Интернета, объяснить требования к содержанию и способу представления сообщения.

Целесообразно дать сведения об источниках информации не только докладчикам, но и всем остальным участникам семинара для содержательности дискуссии.

Текст доклада или компьютерной презентации нужно обсудить за несколько дней до проведения семинара, причём не в форме прочтения с последующими замечаниями, а в форме репетиции выступления школьника. Это позволит докладчику овладеть излагаемым материалом, быть готовым к воз-

можным вопросам и возражениям. Пример дискуссии на таком учебном семинаре приведен в § 35 данного пособия.

Особенности учебника физики. Учебник для 9 класса является учебником фиксированного формата для личностно ориентированного обучения. В нём обязательный для изучения учебный материал разделен на 35 параграфов, в каждом параграфе он представлен на одном развороте учебника на двух страницах. Всё, что должно быть изучено на одном уроке, находится перед глазами учащегося, перед ним ставится обозримая проблема и вполне посильное по объёму задание. На одном развороте легко найти материал для ответа на контрольные вопросы, формулу для решения задачи.

При отборе и структурировании содержания материала по физике в 9 классе учитывались реальные возможности учащихся по усвоению новых понятий в процессе обучения. За один урок физики, как правило, планируется овладеть одним — тремя новыми понятиями. Обязательным ориентиром при отборе содержания обучения являются требования образовательного стандарта к результатам обучения.

Для создания возможностей использования деятельностного подхода к процессу обучения и методов проблемного обучения с целью развития общих познавательных и творческих способностей учащихся при изучении физики объём обязательного материала в учебнике для 9 класса сокращён примерно в 2 раза по сравнению с объёмом обязательного материала в традиционном учебнике. Это сокращение расширяет возможности для организации активной самостоятельной познавательной деятельности учащихся при выполнении опытов и экспериментальных заданий, освобождает время для занятий по интересам всем учащимся.

Для учащихся, проявляющих повышенный интерес к физике, в каждом параграфе учебника имеются ещё две дополнительные страницы для углублённого изучения теоретического материала и задания для выполнения самостоятельных экспериментов. В результате общий объём учебного материала по физике, предлагаемого учащимся основной школы для обязательного обучения и для изучения по собственному выбору, несколько превосходит обязательные требования.

Построение учебника в соответствии с принципом фиксированного формата и уменьшение числа параграфов примерно в 2 раза по сравнению с традиционным учебником сделано для того, чтобы обеспечить учителю и учащимся возможность организации систематической самостоятельной экспериментальной деятельности учащихся на уроках, реализацию принципа личностно ориентированного обучения.

Содержание обучения физике в 9 классе. Содержание обучения в 9 классе отобрано в соответствии с образовательным стандартом по физике второго поколения. Ниже представлена программа по физике для 9 класса, в соответствии с которой написан учебник. Материал, который подлежит изучению, но не включён в Требования к уровню подготовки выпускников, в программе выделен *курсивом*.

ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ

9 класс (70 ч)

Физика и физические методы изучения природы (3 ч)

Физический эксперимент. *Моделирование явлений и объектов природы. Физические законы и границы их применимости. Роль физики в формировании научной картины мира.*

Законы механического движения (20 ч)

Система отсчёта. Неравномерное движение. Мгновенная скорость. Ускорение. Равноускоренное движение. Свободное падение. Зависимость скорости и пути равноускоренного движения от времени и ускорения. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью. Первый закон Ньютона. Второй закон Ньютона. Третий закон Ньютона. Закон всемирного тяготения.

Законы сохранения (20 ч)

Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Кинетическая энергия. Потенциальная энергия взаимодействующих тел. Закон сохранения механической энергии.

Закон сохранения энергии в тепловых процессах. Принципы работы теп-

ловых машин. *Паровая турбина. Двигатель внутреннего сгорания. Реактивный двигатель.* КПД теплового двигателя. *Объяснение устройства и принципа действия холодильника.* Экологические проблемы использования тепловых машин.

Демонстрации

Устройство четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания.

Устройство паровой турбины.

Устройство холодильника.

Квантовые явления (17 ч)

Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома. Линейчатые оптические спектры. Квантовые постулаты Бора. *Поглощение и испускание света атомами.*

Состав атомного ядра. *Зарядовое и массовое числа.* Дефект массы. Ядерные силы. Энергия связи атомных ядер. Радиоактивность. Альфа-, бета- и гамма-излучения. *Период полураспада.* Методы регистрации ядерных излучений. Ядерные реакции. *Деление и синтез ядер. Источники энергии Солнца и звёзд. Ядерная энергетика. Дозиметрия.* Влияние радиоактивных излучений на живые организмы.

Демонстрации

Модель опыта Резерфорда.

Наблюдение треков частиц в камере Вильсона.

Устройство и действие счётчика ионизирующих частиц.

Лабораторные работы и опыты

Наблюдение линейчатых спектров излучения.

Измерение естественного радиоактивного фона дозиметром.

Строение Вселенной (5 ч)

Видимые движения небесных светил. *Геоцентрическая система мира. Определение расстояний до небесных тел. Гипотезы о движении Земли. Гелиоцентрическая система мира Коперника. Открытия Галилея и Кеплера. Гипотеза Джордано Бруно.* Строение Солнечной системы. Физическая природа планет и малых тел Солнечной системы. Происхождение Солнечной системы.

Физическая природа Солнца и звёзд. Строение и эволюция Вселенной.

Резерв времени (5 ч).

ТЕМАТИЧЕСКОЕ ПОУРОЧНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Физика и физические методы изучения природы

Урок 1. § 1. Методы научного познания.

Законы механического движения

Уроки 2—3. § 2. Система отсчёта и координаты точки.

Уроки 4—5. § 3. Мгновенная скорость. Ускорение.

Уроки 6—7. § 4. Путь при равноускоренном движении. Экспериментальное задание 4.1. Измерение ускорения свободного падения. Экспериментальное задание 4.2. Исследование равноускоренного движения.

Уроки 8—9. § 5. Равномерное движение по окружности. Экспериментальное задание 5.1. Определение центростремительного ускорения.

Уроки 10—11. § 6. Относительность механического движения.

Уроки 12—13. § 7. Первый закон Ньютона. Экспериментальное задание 7.1. Исследование зависимости ускорения свободного падения тел от их массы.

Уроки 14—15. § 8. Второй закон Ньютона. Экспериментальное задание 8.1. Расчёт и измерение ускорения.

Уроки 16—17. § 9. Сложение сил. Экспериментальное задание 9.1. Сложение сил, направленных под углом.

Уроки 18—19. § 10. Третий закон Ньютона. Экспериментальное задание 10.1. Измерение сил взаимодействия двух тел.

Уроки 20—21. § 11. Закон всемирного тяготения. Экспериментальное задание 11.1. Измерение массы Земли.

Уроки 22—23. § 12. Движение тел под действием силы тяжести.

Урок 24. Тестовый контроль знаний и умений. Тест 1.

Законы сохранения

Уроки 25—26. § 13. Закон сохранения импульса. Экспериментальное задание 13.1. Измерение скорости истечения струи газа из ракеты.

Уроки 27—28. § 14. Кинетическая энергия. Экспериментальное задание 14.1. Определение кинетической энергии тела.

Уроки 29—30. § 15. Работа. Экспериментальное задание 15.1. Опреде-

ление кинетической энергии и скорости тела по длине тормозного пути.

Уроки 31—33. § 16. Потенциальная энергия гравитационного притяжения тел. Экспериментальное задание 16.1. Определение потенциальной энергии тела.

Уроки 34—35. § 17. Потенциальная энергия упругой деформации тел. Экспериментальное задание 17.1. Измерение потенциальной энергии упругой деформации пружины.

Уроки 36—37. § 18. Закон сохранения механической энергии. Экспериментальное задание 18.1. Исследование превращений механической энергии.

Уроки 38—39. § 19. Закон сохранения энергии в тепловых процессах.

Уроки 40—42. § 20. Принципы работы тепловых машин.

Урок 43. Тестовый контроль знаний и умений. Тест 2.

Квантовые явления

Уроки 44—45. § 21. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома. Экспериментальное задание 21.1. Измерение элементарного электрического заряда.

Урок 46. § 22. Линейчатые оптические спектры. Поглощение и испускание света атомами. Экспериментальное задание 22.1. Наблюдение линейчатого спектра излучения.

Урок 47. § 23. Состав атомного ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядра.

Уроки 48—49. § 24. Радиоактивность.

Уроки 50—51. § 25. Экспериментальные методы регистрации заряженных частиц. Экспериментальное задание 25.1. Наблюдение треков альфа-частиц в камере Вильсона.

Уроки 52—53. § 26. Ядерные реакции.

Уроки 54—55. § 27. Ядерная энергетика.

Урок 56. § 28. Дозиметрия.

Урок 57. Тестовый контроль знаний и умений. Тест 3.

Строение Вселенной

Урок 58. § 29. Геоцентрическая система мира.

Урок 59. § 30. Гелиоцентрическая система мира. Астрономические наблюдения. Экспериментальное задание 29.1. Знакомство с созвездиями и яркими звёздами. Экспериментальное задание 29.2. Обнаружение суточного вращения звёздного неба.

Урок 60. § 31. Физическая природа планет Солнечной системы.

Урок 61. § 32. Малые тела Солнечной системы. Происхождение Солнечной системы.

Урок 62. § 33. Физическая природа Солнца и звёзд.

Урок 63. § 34. Строение и эволюция Вселенной.

Урок 64. § 35. Как и зачем делаются научные открытия.

Урок 65. Тестовый контроль знаний и умений. Итоговый тест.

Резерв времени (5 ч).

Глава 2

Физика и физические методы изучения природы. Законы механического движения

§ 1. Методы научного познания

Наука, вера и суеверия. Большинство людей, родившихся в нашей стране после 1917 г., были воспитаны в уверенности, что ответ на вопрос о соотношении между верой и наукой очень прост: разумный человек, овладевший основами современных научных знаний о мире, не может верить в существование ничего сверхъестественного. Для него нет ни Бога, ни чёрта, ни ауры, ни переселения душ, ни определяемого астрологами по гороскопу влияния расположения планет на небе на судьбу человека.

Но вот в стране изменился общественный строй — и через довольно короткое время стало очевидно, что большая часть граждан страны с теми же самыми научными знаниями о мире верит в очень многое сверхъестественное. Почти каждый знает, под каким знаком зодиака он родился, и многих интересуют советы астрологов, что можно делать сегодня тельцам, а чего делать не следует. Загружены заказами умелицы «снимать порчу» и «приворaживать», «экстрасенсы» сменяют один другого на телевизионных экранах, церковь ведёт борьбу за изменение конституции страны, стремясь ввести обязательное религиозное воспитание в школе.

Как же объясняются эти факты? Прежде всего эти факты показывают, что тот уровень научных знаний о мире и его законах, которым овладевают большинство выпускников российской общеобразовательной школы, не гарантирует их защищённости от влияния различных суеверий и шарлатанства. Не определяет он и однозначного отношения человека к вопросам, связанным с верой в Бога. Почти единодушное неверие в Бога и отрицательное отношение к суевериям на прошлом этапе развития общества были обусловлены в большей мере не уровнем умственного развития граждан, а активным воздействием государственных институтов на процессы религиозного влияния и распространения суеверий.

В настоящее время государство не только прекратило борьбу с церковью, но и активно её поддерживает. Вместе с тем государство практически сняло с себя обязанность ограждать граждан от влияния лиц, распространяющих различные суеверия с целью обмана и наживы. Какую же позицию следует занимать в этих условиях учителю физики в отношении вопросов веры и суеверий?

Отделим вопрос о вере от вопроса о суевериях и начнём с последних. Суевериями называют лишённые разумных оснований убеждения людей в том, что существуют сверхъестественные силы и что некоторые люди могут использовать эти силы, управлять ими. К числу распространённых с древности суеверий относятся представления о возможности предсказывать судьбу людей и влиять на неё какими-то сверхъестественными средствами, о возможностях бесед с душами умерших. Суеверия нового вида связаны с разговорами о встречах с пришельцами, о влияниях тёмных и светлых биополей одного человека на другого, о возможностях излечения тяжёлых болезней приложением листа бумаги с изображением целителя или какого-то магического знака и т. п. В большинстве случаев люди, распространяющие суеверия и использующие их в корыстных целях, пользуются современной научной терминологией, ссылаются на новейшие

достижения науки, которые будто бы не признаны только самыми отсталыми людьми.

Отношение науки к всевозможным суевериям однозначно: наука борется с суевериями, так как суеверия приносят только вред людям, а ссылками на научную обоснованность своих методов распространители суеверий подрывают авторитет науки.

Отношения между религией и наукой значительно сложнее, их нельзя свести к простой формуле взаимного признания или взаимного отрицания. Для лучшего понимания современного состояния отношений между наукой и религией полезно сделать экскурс в историю этих отношений, которым насчитывается более двух с половиной тысячелетий.

Существует ли борьба между наукой и верой? Представления о существовании в мире сверхъестественных сил, о существовании у человека не только смертного тела, но и бессмертной души, о вечной жизни этой души в ином, потустороннем мире зародились у людей раньше, чем были созданы первые варианты научной картины мира. Верования в сверхъестественные силы привели во всех странах к возникновению особых ритуалов поклонения им и к появлению особых людей, служащих посредниками между богами и людьми. В одних странах их называли жрецами, в других — магами, шаманами.

Зарождение научных знаний о мире, в основе которых лежало отрицание влияния сверхъестественных сил на явления природы и судьбы людей, привело к столкновениям и борьбе мнений о мире. Поскольку мир уже был объяснён до зарождения физики и астрономии с помощью представлений о Боге (или богах), создавшем этот мир и управляющем им, попытки объяснить природные явления без привлечения сверхъестественных сил встретились в большинстве случаев с резким противодействием сторонников прежних взглядов.

Даже самые смелые гипотезы современных физиков, от гипотезы Большого взрыва и расширяющейся Вселенной до обсуждения возможности рождения звёзд и галактик в результате столкновения двух сверхэнергичных элементарных частиц, не удивили бы древнегреческого философа Анаксагора (V в. до н. э.), учителя выдающегося политического деятеля в Афинах Перикла. Анаксагор учил, что бесконечно не только разнообразие материальных частиц, но и каждая отдельная частица подобна целому, заключает в себе качества всего существующего и в этом смысле содержит в себе бесконечность. Таким образом, всё сущее не просто бесконечно, но бесконечно бесконечно. По представлениям Анаксагора, Вселенная непрерывно увеличивается в размерах, неограниченно расширяясь, а каждая отдельная частица может беспредельно делиться.

Анаксагора суд приговорил к смерти за то, что «афиняне признавали Солнце богом, [он] учил, что оно — огненный жернов». Заступничество Перикла спасло Анаксагора от смерти, но не от ссылки и запрещения всех сочинений.

И через две тысячи лет после суда над Анаксагором спор о природе небесных светил и месте человека в этом мире не был закончен. В 1600 г. в Италии по приговору суда инквизиции был сожжён Джордано Бруно за учение о множественности обитаемых миров, так как судьи считали такую гипотезу «неправильной».

Выдвижение гипотезы о существовании бесконечно малых частиц вещества, которые человек не может обнаружить непосредственно своими органами чувств, означало, что древнегреческие философы понимали, что одним непосредственным восприятием явлений природы с помощью органов чувств познание человеком природы не должно ограничиваться. Опираясь на показания чувств, человеческий ум должен идти дальше, глубже. От одной исходной точки возможные пути познания в форме построения гипотетических физических моделей расходятся в разные, часто противоположные стороны. Какой же из этих путей верен?

Можно ли только путём логических рассуждений доказать, что Солнце неподвижно, а Земля движется вокруг него? А можно ли доказать обратное? Может ли быть решён научный спор приговором суда?

Во времена Демокрита, Сократа, Аристотеля и затем на протяжении ещё двух тысячелетий большинство учёных считали возможным только рассуждениями доказать правоту своих гипотез

о строении мира и законах, управляющих миром. Но такое предположение оказалось заблуждением. Хотя реальный мир один, количество мыслимых, в принципе возможных миров неограниченно велико. Единственный неоспоримый довод в пользу любой научной гипотезы — это соответствие её свойствам реально существующего мира.

Для установления соответствия теории практике необходимо после выдвижения научной гипотезы, основанной на уже известных фактах, вывести из неё теоретически, логически какие-то следствия, доступные опытной проверке. Эти следствия и нужно проверить в специально спланированном эксперименте. Галилей обосновал необходимость экспериментальной проверки следствий из теории тем, что «...наши рассуждения должны быть о чувственном мире, а не о бумажном мире». Если эксперимент даёт результат, согласующийся с предсказаниями теории, то теория может считаться подтверждённой экспериментом, соответствующей реальности. При расхождении предсказаний теории с результатами эксперимента теорию нельзя признать правильной, даже если она логически безупречна.

Это значит, что от простых наблюдений того, что Природа сама демонстрирует, открывает человеку, необходимо переходить к специально спланированным экспериментам, выполняющим роль вопросов, задаваемых Природе.

Многовековой спор о том, являются ли небесные тела идеальными телами, непохожими на Землю, или они подобны Земле, Галилей разрешил экспериментальным путём, направив изготовленный им телескоп сначала на Луну, а затем на Солнце. На Луне он обнаружил горы и долины, подобные земным, а на диске Солнца — тёмные пятна. Тем самым стиралась грань между земным и небесным, Земля получала права одной из планет Солнечной системы.

Лежащая в основе многих религий гипотеза о существовании у человека бессмертной души, способной существовать после смерти человека в ином мире, о существовании таких сверхъестественных существ, как Бог (или боги), ангелы, дьяволы, не может быть ни подтверждена, ни опровергнута методами науки — ни физикой, ни химией, ни биологией, поскольку свойства души и потустороннего мира согласно гипотезе изначально недоступны научному исследованию, лежат за пределами возможностей человека этого мира. Гипотезы такого типа не относятся к числу научных гипотез в силу невозможности их проверки методами науки. Непроверяемые научными методами гипотезы называют метафизическими гипотезами.

Невозможность научного доказательства или опровержения метафизической гипотезы не лишает её права на существование. Принятие или непринятие такой гипотезы является делом веры человека в её истинность или неверия в неё.

Может показаться, что науке и религии нечего делить, они действуют как бы в различных пространствах. Пространство науки — это область достоверных, проверяемых, воспроизводимых знаний человека о мире. Пространство религии — область веры или неверия человека в существование в мире явлений, которые невозможно обнаружить, проверить методами научного знания.

На практике дело обстоит иначе. Каждая религия провозглашает своей важнейшей задачей помощь человеку в обретении вечной жизни для его души. Но на практике всякая церковь борется за право управления действиями людей в настоящей жизни, за власть над людьми. Эта борьба начиналась с того момента, как зарождалась новая религия.

В Древнем Египте веками длилась борьба за верховную власть между фараонами и жрецами, объявляющими волю богов. Римские императоры не могли принять никакого серьёзного государственного решения, не выслушав от жрецов-авгуров волю богов, которую те узнавали по крику или полёту птиц, по ударам молний. Такое двоевластие часто завершалось соединением двух видов власти — светской и духовной — в руках одного человека (фараон и он же верховный жрец, король и глава церкви).

Но почему с возникновением науки, не претендовавшей на управление людьми, на власть над людьми, религия на протяжении двух с половиной тысячелетий вела с ней непрерывную борьбу? За что подвергались гонениям Демокрит, Анаксагор, Аристарх Самосский, Галилей? За что приговорены были

к смертной казни Сократ и Джордано Бруно?

Главное обвинение против большинства философов и учёных заключалось в том, что они «богов не признают». Авторитет жрецов и других служителей религиозных верований основан на утверждении о том, что они находятся в более близких отношениях с Богом (или богами), чем обычные люди, что именно через них Бог выражает свои порицания или одобрения людям за их дела и даже помыслы. Анаксагор и другие философы, осмелившиеся в V в. до н. э. утверждать, что «...Солнце, Луна и все звёзды — горячие камни, охваченные круговращением эфира», вступали в спор с теми, кто отстаивал представления о Солнце, Луне, Венере, Марсе, Юпитере как о богах. С этим не могли смириться жрецы этих богов.

Учение Коперника о Земле, движущейся вокруг Солнца и вращающейся вокруг своей оси, противоречило картине мира, представленной в Библии — Священной книге христиан. Поэтому было запрещено распространение учения Коперника. Галилео Галилея суд инквизиции вынудил публично отречься от учения о движении Земли и отправил в ссылку, в которой он находился до своей смерти.

Наука не оспаривает права любого человека верить в то, что существует загробная жизнь, существуют боги и ангелы. Никогда учёные не приговаривали никого к смертной казни за веру в Бога, не отправляли за это в ссылки. Учёные не призывают к тому, чтобы всем людям запретить верить в Бога. Так что говорить о борьбе между наукой и религией нет оснований. Фактически на протяжении всей истории человечества борьба и преследования ведутся с одной стороны: религия борется против распространения среди людей научных взглядов о строении и происхождении мира, о природе и происхождении человека. Борьба эта обусловлена тем, что, чем больше знает человек о мире и себе самом, тем труднее ему поверить в истинность любого религиозного учения.

Никто из учёных не подавал иск в суд на служителей церкви за распространение противоречащих научным данным сведений о происхождении мира и человека. А «обезьяньи процессы», в которых от суда требовали вынести приговор о запрете распространения дарвиновского учения о происхождении животного мира и человека, происходили по инициативе церкви во многих странах. Теперь состоялся первый такой процесс и в России. Так что позиции церкви по отношению к науке не изменились: наука для церкви остается противником, мешающим осуществлению её основных функций.

Государства, в которых церковь отделена, называются светскими государствами. По Конституции РФ (Статья 14) Российская Федерация — светское государство. Поэтому в России никакая религия не может быть признана государственной или обязательной.

§ 2. Система отсчёта и координаты точки

Проекции вектора перемещения. Если в классе много учащихся, проявляющих повышенный интерес к физике, то можно подробнее рассмотреть связь вектора перемещения $\vec{s}$ точки с изменениями её координат и ввести понятие проекции вектора перемещения на координатную ось.

При перемещении материальной точки из точки *1* с координатами x_1, y_1, z_1 в точку *2* с координатами x_2, y_2, z_2 изменения координат точки равны разностям между координатами конца и начала вектора перемещения $\vec{s}$:

$$\Delta x = x_2 - x_1,\ \Delta y = y_2 - y_1,\ \Delta z = z_2 - z_1.$$

Эти разности называют проекциями вектора перемещения $\vec{s}$ на координатные оси: $s_x = x_2 - x_1$, $s_y = y_2 - y_1$, $s_z = z_2 - z_1$.

При таком определении проекции вектора перемещения на координатные оси являются скалярными величинами. Проекция вектора перемещения на координатную ось положительна, если координата конца вектора больше координаты начала вектора. В противном случае проекция отрицательна.

Можно спросить, какие из трёх проекций вектора перемещения $\vec{s}$ на коор-

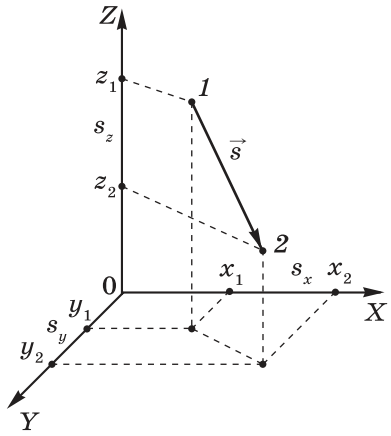

Рис. 1

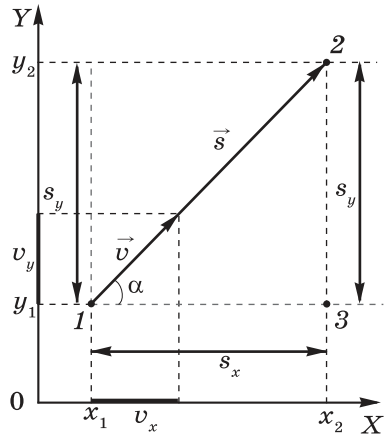

Рис. 2

динатные оси $0X$, $0Y$ и $0Z$ положительны и какие отрицательны (рис. 1).

Так как $x_2 > x_1$, $y_2 > y_1$, $z_2 < z_1$, то $s_x = x_2 - x_1 > 0$, $s_y = y_2 - y_1 > 0$, $s_z = z_2 - z_1 < 0$.

Определение вектора скорости через вектор перемещения. При желании можно познакомить учащихся с определением понятия вектора скорости равномерного прямолинейного движения через вектор перемещения.

Вектор скорости $\vec{v}$ равномерного прямолинейного движения материальной точки равен отношению вектора перемещения $\vec{s}$ к времени t её движения:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}.$$

Проекции вектора скорости на координатные оси. После введения понятия о проекциях вектора перемещения точки на координатные оси можно установить связь между проекциями вектора скорости на координатные оси и проекциями вектора перемещения материальной точки. Для этого нужно сначала решить задачу 2.1.

Задача 2.1. Решение. На рисунке 2 представлен вектор перемещения $\vec{s}$, проведённый из точки *1* в точку *2*, при равномерном прямолинейном движении материальной точки в плоскости $X0Y$ под углом α к координатной оси $0X$ со скоростью $\vec{v}$. Проекции вектора перемещения на оси $0X$ и $0Y$ по определению равны соответственно

$$s_x = x_2 - x_1,\ s_y = y_2 - y_1.$$

Из прямоугольного треугольника *123* следует:

$$s_x = s\cos\alpha,\ s_y = s\sin\alpha.$$

По определению проекция вектора скорости на координатную ось равна:

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

Заменив в этом выражении изменение координаты $x_2 - x_1$ на проекцию вектора перемещения точки s_x, получаем

$$v_x = \frac{x_2 - x_1}{t} = \frac{s_x}{t} = \frac{s\cos\alpha}{t} = v\cos\alpha.$$

Изменение координаты x за время t равно:

$$\Delta x = v_x t.$$

Аналогично можно доказать, что

$$v_y = v\sin\alpha \text{ и } \Delta y = v_y t.$$

Таким образом, мы доказали, что проекции вектора скорости на координатные оси v_x и v_y равны по модулям отрезкам осей $0X$ и $0Y$, отсекаемым перпендикулярами, восстановленными из начала и конца вектора скорости $\vec{v}$ на координатные оси.

В случае равномерного прямолинейного движения материальной точки её координаты x, y и z изменяются со временем по законам

$$x = x_0 + \Delta x = x_0 + v_x t,$$
$$y = y_0 + \Delta y = y_0 + v_y t,$$
$$z = z_0 + \Delta z = z_0 + v_z t.$$

Задача 2.2. Решение. При прямолинейном равномерном движении прой-

денный материальной точкой путь равен:

$$s = vt = 20 \text{ м/с} \cdot 5 \text{ с} = 100 \text{ м}.$$

Изменения координат Δx и Δy найдём, используя их связь с проекциями вектора скорости на эти оси:

$$\Delta x = v_x t = v \cos \alpha t \approx 20 \cdot 0{,}6 \cdot 5 \text{ м} \approx 60 \text{ м},$$

$$\Delta y = v_y t = v \sin \alpha t \approx 20 \cdot 0{,}8 \cdot 5 \text{ м} \approx 80 \text{ м}.$$

Дополнительные задачи

Задача 2.3. Материальная точка переместилась из точки *1* в точку *2*. Координаты точки *1* равны $x_1 = 12$ см, $y_1 = 10$ см, $z_1 = 14$ см, координаты точки *2* равны $x_2 = 28$ см, $y_2 = 22$ см, $z_2 = 29$ см. Определите проекции вектора перемещения на координатные оси $0X$, $0Y$ и $0Z$ и модуль $|\vec{s}|$ вектора перемещения.

Решение. Перенесём начало координат в точку с координатами x_1, y_1, z_1 так, чтобы координатные оси оставались параллельными каждая самой себе. Тогда начало координат совпадает с началом вектора перемещения $\vec{s}$, а координаты конца вектора перемещения равны разностям координат (рис. 3):

$$x = x_2 - x_1,\ y = y_2 - y_1,\ z = z_2 - z_1.$$

$$x = 28 \text{ см} - 12 \text{ см} = 16 \text{ см},$$
$$y = 22 \text{ см} - 10 \text{ см} = 12 \text{ см},$$
$$z = 29 \text{ см} - 14 \text{ см} = 15 \text{ см}.$$

Опустим перпендикуляр AB из конца вектора перемещения $\vec{s}$ на координатную плоскость $X0Y$. Через прямую AB проведём плоскости, перпендикулярные координатным осям $0X$ и $0Y$. Точки пересечения этих плоскостей с осями $0X$ и $0Y$ определяют координаты x и y конца вектора перемещения $\vec{s}$. Перпендикуляр, опущенный из конца вектора перемещения $\vec{s}$ на ось $0Z$, определяет координату z конца вектора перемещения $\vec{s}$.

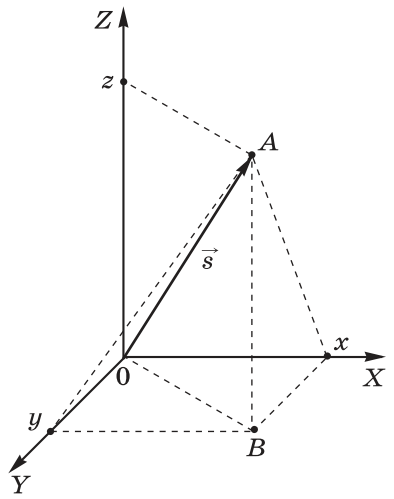

Рис. 3

Найдём длину диагонали $0B$ прямоугольника $0XBY$:

$$0B^2 = x^2 + y^2,\ 0B = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Найдём длину диагонали $0A$ прямоугольника $0ZAB$:

$$0A^2 = 0B^2 + z^2,$$

$$0A = s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}.$$

Модуль s вектора перемещения не зависит от выбора начала координат, поэтому в любой системе координат модуль s вектора перемещения равен квадратному корню из суммы квадратов разностей координат конца и начала вектора перемещения:

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

$$\Delta s = \sqrt{16^2 + 12^2 + 15^2} \text{ см} = 25 \text{ см}.$$

Задача 2.4. Докажите, что модуль скорости v равномерного прямолинейного движения связан с проекциями вектора скорости на координатные оси прямоугольной системы координат выражением

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

Решение. По определению модуль v вектора скорости равномерного прямолинейного движения равен отношению модуля s вектора перемещения материальной точки за время t к времени t движения точки:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Выразив модуль s вектора перемещения через разности координат его начала и конца, получаем

$$v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{t} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{x_2 - x_1}{t}\right)^2 + \left(\frac{y_2 - y_1}{t}\right)^2 + \left(\frac{z_2 - z_1}{t}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

Задача 2.5. Проекции вектора скорости на координатные оси прямоугольной системы координат равны $v_x = 9$ м/с, $v_y = 20$ м/с, $v_z = 12$ м/с. Определите модуль вектора скорости.

Решение. По известным проекциям вектора скорости на координатные оси прямоугольной системы координат определяем модуль вектора скорости:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{81 + 400 + 144}\ \text{м/с} = \\ = \sqrt{625}\ \text{м/с} = 25\ \text{м/с}.$$

Задача 2.6. Самолёт взлетает с взлётной полосы аэродрома по прямолинейной траектории под углом 14,5° к горизонтальной поверхности со скоростью 360 км/ч. За какое время t при таком движении он поднимется на высоту 1 км над поверхностью Земли? На какое расстояние он удалится при этом от места взлёта? На каком расстоянии от места взлёта находится точка на поверхности Земли, над которой находится самолёт в момент времени t? Земную поверхность считать горизонтальной.

Решение. При решении этой задачи можно познакомить учащихся со способом разложения вектора скорости на два или три вектора, называемых составляющими исходного вектора. Вектор скорости $\vec{v}$ самолёта можно представить как результат сложения вектора $\vec{v}_в$, направленного вертикально вверх, и вектора $\vec{v}_г$, лежащего в горизонтальной плоскости. Модуль вектора $\vec{v}_г$ равен:

$$v_г = v \cos \alpha,$$

модуль вектора $\vec{v}_в$ равен:

$$v_в = v \sin \alpha.$$

Вектор $\vec{v}_г$ называют горизонтальной составляющей вектора $\vec{v}$, вектор $\vec{v}_в$ — вертикальной составляющей вектора $\vec{v}$ (рис. 4).

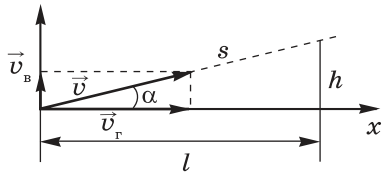

Рис. 4

Изменение высоты h самолёта над земной поверхностью со временем t происходит по закону

$$h = v_в t = v \sin \alpha \cdot t.$$

Отсюда время t подъёма самолёта на высоту, равную 1 км, равно:

$$t = \frac{h}{v \sin \alpha} = \frac{1000\ \text{м}}{100 \cdot 0{,}25\ \text{м/с}} = 40\ \text{с}.$$

Расстояние s от самолёта до места взлёта через 40 с равно:

$$s = vt = 100\ \text{м/с} \cdot 40\ \text{с} = 4000\ \text{м} = 4\ \text{км}.$$

Расстояние l от места взлёта до точки на поверхности Земли, над которой находится самолёт через 40 с после взлёта, равно:

$$l = v_г t = v \cos \alpha \cdot t \approx \\ \approx 100\ \text{м/с} \cdot 0{,}97 \cdot 40\ \text{с} \approx 3880\ \text{м}.$$

Определение географических координат на Земле. Для установления связи проблем измерения времени и координат с повседневной жизненной практикой и для развития интереса к занятиям физикой может быть полезным ознакомление с современными методами определения координат человека или какого-то объекта относительно Земли. Такое ознакомление может быть проведено путём подготовки учащимися нескольких кратких сообщений. Выступления желательно сопровождать демонстрацией схем, фотографий и рисунков. Материалы для сообщений можно найти в Интернете: Например, по адресам:
http://www.brandwatch.ru/WatchArticles/InsideWatch/SeaCrono/,
http://www.gps-forum.ru/content/view/20/35/,
http:// www.gpsportal.ru,
http://www.navizone. ru/.

§ 3. Мгновенная скорость. Ускорение

Мгновенная скорость. В учебнике использован вариант введения понятия мгновенной скорости материальной точки с раздельным определением модуля и направления вектора скорости. Модуль вектора мгновенной скорости $\vec{v}$ определяется как отношение пройденного пути Δs к интервалу времени дви-

жения Δt при условии, что этот интервал времени стремится к нулю:

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

За направление вектора мгновенной скорости $\vec{v}$ материальной точки в данной точке траектории принято направление по касательной к траектории движения, в котором она продолжает двигаться равномерно и прямолинейно в случае прекращения в данной точке действия на неё всех других тел.

Такой вариант определения понятия мгновенной скорости выбран по той причине, что отношение пройденного пути к времени движения имеет ясный физический и практический смысл средней скорости движения при любом значении интервала времени, а выбор направления вектора скорости указывает возможный способ экспериментального определения направления вектора мгновенной скорости тела.

Во многих учебниках вектор мгновенной скорости $\vec{v}$ материальной точки определяется через отношение вектора перемещения $\vec{s}$ точки к времени t перемещения точки при условии, что это время стремится к нулю (рис. 5):

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t},\ t \to 0.$$

Эти два варианта определения понятия мгновенной скорости эквивалентны. При желании можно использовать

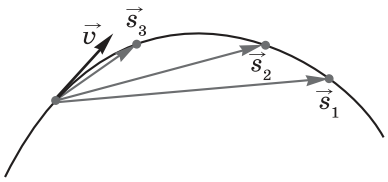

Рис. 5

и вариант определения понятия мгновенной скорости через вектор перемещения. В учебнике он не использован по той причине, что отношение вектора перемещения к времени движения при конечных значениях интервалов времени не имеет связи с привычным, житейским понятием скорости движения.

Ускорение. Понятие ускорения формально не вводилось в 7 классе, хотя обсуждалось явление свободного падения. При введении этого понятия необходимо обратить внимание на выяснение смысла новой физической величины как скорости изменения вектора скорости и на векторный характер этой величины.

Затем нужно выделить среди различных возможных видов неравномерного движения простейший вид движения с постоянным ускорением — равноускоренное прямолинейное движение.

После установления связи скорости равноускоренного прямолинейного движения с ускорением и временем движения необходимо рассмотреть графики зависимости модуля скорости равноускоренного прямолинейного движения от времени для разных вариантов направления вектора ускорения.

Усвоение новых изученных физических понятий нужно проверить как на уровне понимания их физического смысла, так и на уровне применения новых знаний для решения физических задач практического содержания.

Решение задачи по кинематике начинают с анализа её условия, выбора тела отсчёта и системы координат, связанной с ним. Относительно выбранной системы отсчёта можно записать уравнения движения тела, т. е. выразить зависимость координат и проекций скорости тела от времени. Эти уравнения дают возможность по заданным начальным условиям и ускорению определять координаты и скорость тела в любой момент времени. Если в полученных уравнениях число неизвестных превышает число уравнений движения, дополнительные уравнения можно составить, исходя из геометрических соотношений или специальных условий, оговоренных в тексте задачи. Если же в условии задачи дана зависимость координат тела от времени, то можно определить скорость и ускорение его движения в любой момент времени.

Расчёты в задачах нужно проводить в единицах СИ.

Сначала полезно подставлять в формулы все числа с наименованиями величин и производить преобразования наименований. После приобретения учащимися таких навыков можно перейти к более краткой и простой форме записи, при которой в формулу записываются значения всех физических величин в основных единицах СИ (без записи наименований величин) и результат вы-

числений автоматически получается выраженным числом в основных единицах вычисляемой величины.

Задача 3.1. Решение. График на рисунке 3.4 учебника показывает, что при изменении времени t модуль v скорости движения не изменяется. Следовательно, зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = \text{const}$ или $v = 10$ м/с.

Задача 3.2. Решение.

$v_0 = 36$ км/ч $= 10$ м/с,

$v = 72$ км/ч $= 20$ м/с,

$t = 1$ мин 40 с $= 100$ с.

$v = v_0 + at$,

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

$a = \frac{20 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}}{100 \text{ с}} = 0{,}1 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.3. Решение.

$v_0 = 0$,

$a \approx 9{,}8$ м/с^2,

$t = 20$ с.

$v = at$, $v \approx 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot 20 \text{ с} \approx 196 \text{ м/с} \approx$ ≈ 706 км/ч.

Задача 3.4. Решение.

$v_0 = 108$ км/ч $= 30$ м/с,

$v = 0$,

$a = 3$ м/с^2,

$t_1 = 5$ с.

$v = v_0 - at$,

$t = \frac{v_0 - v}{a}$, $t = \frac{30 \text{ м/с} - 0}{3 \text{ м/с}^2} = 10$ с.

$v_1 = v_0 - at_1$,

$v_1 = 30 \text{ м/с} - 3 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ с} = 15$ м/с.

Задача 3.5. Решение. Графиком равноускоренного движения (рис. 3.10 учебника) является прямая, пересекающая ось ординат, по которой отсчитываются значения модуля скорости, в точке со значением начальной скорости $v_0 = 5$ м/с. Зависимость модуля скорости такого движения от времени выражается формулой:

$$v = v_0 + at.$$

Из этой формулы найдём ускорение, используя данные графика — значение модуля начальной скорости $v_0 = 5$ м/с и значение модуля скорости $v = 15$ м/с для момента времени $t = 5$ с:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{15 \text{ м/с} - 5 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2.$$

Формула зависимости модуля скорости равноускоренного движения с таким ускорением имеет вид $v = 5 + 2t$.

Задача 3.6. Решение. Графиком равноускоренного движения (рис. 3.11 учебника) является прямая, пересекающая ось ординат в точке со значением начальной скорости $v_0 = 15$ м/с. Так как модуль скорости убывает со временем, вектор ускорения направлен противоположно вектору скорости. Зависимость модуля скорости такого движения от времени выражается формулой

$$v = v_0 - at.$$

Из этой формулы найдём ускорение, используя данные графика — значение модуля начальной скорости $v_0 = 15$ м/с и значение модуля скорости $v = 5$ м/с для момента времени $t = 5$ с:

$$a = \frac{v_0 - v}{t} = \frac{15 \text{ м/с} - 5 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2.$$

Формула зависимости модуля скорости равноускоренного движения с таким ускорением имеет вид $v = 15 - 2t$.

Задача 3.7. Решение. Графиком модуля скорости равноускоренного прямолинейного движения из состояния покоя является прямая, проходящая через начало координат. Следовательно, координаты одной точки графика известны: $t_1 = 0$ с, $v_1 = 0$ м/с. Координаты второй точки по условию задачи: $t_2 = 10$ с, $v_2 = 40$ м/с. Отметим эти точки и проведём через них прямую (рис. 6).

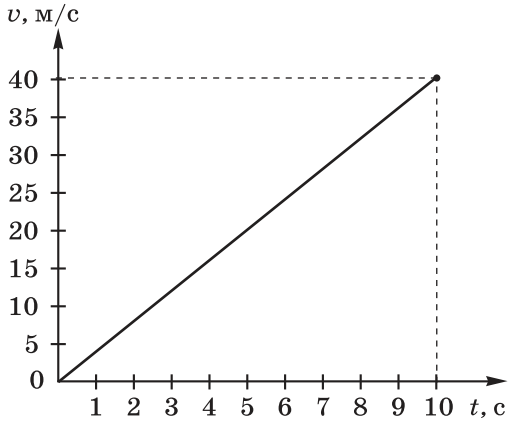

Рис. 6

Задача 3.8. Решение. Сначала выразим данные из условия задачи в единицах СИ:

$v_1 = 36$ км/ч $= 10$ м/с,

$v_2 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,

$t = 1$ мин 40 с $= 100$ с.

$v = v_0 + at$.

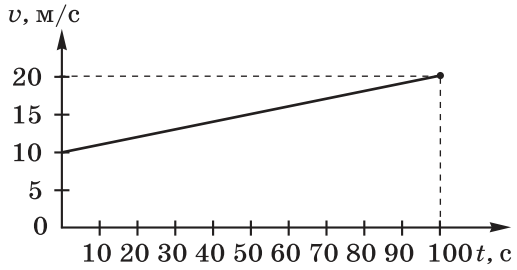

Рис. 7

Графиком модуля скорости равноускоренного прямолинейного движения с начальной скоростью 10 м/с и конечной скоростью 20 м/с является прямая, проходящая через точки с координатами $t_1 = 0$ с, $\upsilon_1 = 10$ м/с и $t_2 = 100$ с, $\upsilon_2 = 20$ м/с. Отметим эти точки и проведём через них прямую (рис. 7).

Задача 3.9. Решение.

$\upsilon_0 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,

$a = 4$ м/с^2,

$t_1 = 10$ с.

При формальном решении этой задачи по формуле получается следующий результат: $\upsilon = \upsilon_0 - at$, $\upsilon = 20$ м/с – – 4 м/с^2 · 10 с = –20 м/с.

Так как мы вычисляем модуль скорости автомобиля, отрицательное значение –20 м/с не имеет физического смысла. Такой результат свидетельствует о том, что формула для вычисления модуля скорости была применена в случае, где её нельзя использовать. Другими словами, формула для вычисления модуля скорости применима лишь для равноускоренного движения.

Чтобы решить эту задачу, нужно сначала вычислить время, в течение которого автомобиль движется равноускоренно при торможении до остановки.

Решение.

$\upsilon_0 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,

$a = 4$ м/с^2,

$\upsilon_2 = 0$.

$\upsilon_2 = \upsilon_0 - at$,

$$t = \frac{\upsilon_0 - \upsilon_2}{a} = \frac{20 \text{ м/с} - 0}{4 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ с}.$$

Так как автомобиль остановился через 5 с, то его скорость и через 10 с после начала торможения остаётся равной нулю.

Дополнительные задачи

Задача 3.10. С каким ускорением двигалась ракета при равноускоренном прямолинейном движении при увеличении скорости от 2 до 8 км/с за 2 мин?

Решение.

$\upsilon_0 = 2$ км/с $= 2000$ м/с,

$\upsilon = 8$ км/с $= 8000$ м/с,

$t = 2$ мин $= 120$ с.

$\upsilon = \upsilon_0 + at$,

$$a = \frac{\upsilon - \upsilon_0}{t} = \frac{8000 \text{ м/с} - 2000 \text{ м/с}}{120 \text{ с}} = 50 \text{ м/с}^2.$$

Задача 3.11. Мотоциклист начал двигаться равномерно и прямолинейно из состояния покоя с ускорением 2 м/с^2. Через 10 с, продолжая прямолинейное движение, он начал торможение с ускорением 1 м/с^2. Начертите график зависимости модуля скорости мотоциклиста от момента начала движения до остановки.

Решение. Для построения графика сначала нужно вычислить скорость мотоциклиста через 10 с после начала равноускоренного прямолинейного движения с ускорением 2 м/с^2 из состояния покоя:

$$\upsilon = at_1,\ \upsilon = 2 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ с} = 20 \text{ м/с}.$$

Затем нужно вычислить время t_2 равноускоренного прямолинейного движения с ускорением 1 м/с^2 при торможении мотоциклиста с начальной скоростью 20 м/с до остановки:

$$\upsilon = \upsilon_0 - at_2,$$

$$t_2 = \frac{\upsilon_0 - \upsilon}{a},\ t_2 = \frac{20 \text{ м/с} - 0 \text{ м/с}}{1 \text{ м/с}^2} = 20 \text{ с}.$$

Теперь можно построить график зависимости модуля скорости мотоциклиста от момента начала движения до остановки (рис. 8).

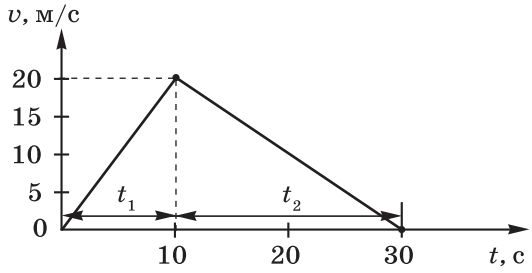

Рис. 8

Задача 3.12. Ударом ракетки теннисному мячу сообщена скорость 180 км/ч в направлении вертикально вверх. С какой скоростью будет двигаться мяч через 9 с после начала движения? Влияние воздуха на движение мяча принять

пренебрежимо малым, ускорение свободного падения 10 м/с^2.

Решение.

$v_0 = 180$ км/ч $= 50$ м/с,

$g = 10$ м/с^2,

$t_1 = 9$ с.

При формальном решении этой задачи по формуле получается следующий результат:

$$v_1 = v_0 - gt_1,$$

$$v_1 = 50 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}^2 \cdot 9 \text{ с} = -40 \text{ м/с}.$$

Так как мы вычисляем модуль скорости мяча, отрицательное значение –40 м/с не имеет физического смысла. Такой результат свидетельствует о том, что формула для вычисления модуля скорости была применена в случае, где её нельзя использовать. Для решения задачи нужно вычислить время t_2 равноускоренного движения мяча вверх до остановки, затем время t_3 его равноускоренного движения вниз:

$g = 10$ м/с^2,

$v_2 = 0$,

$v_2 = v_0 - gt_2$,

$$t_2 = \frac{v_0 - v_2}{g} = \frac{50 \text{ м/с} - 0}{10 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ с},$$

$t_3 = t_1 - t_2 = 9$ с $- 5$ с $= 4$ с,

$v_3 = gt_3$, $v_3 = 10$ м/с$^2 \cdot 4$ с $= 40$ м/с.

Явление Доплера. Метод измерения скорости движения тел, основанный на использовании явления Доплера, в настоящее время широко применяется не только в астрономии, космонавтике, авиации и мореплавании, но и в повседневной практике для контроля за скоростью движения автомобилей.

Сущность явления Доплера заключается в следующем: если неподвижный радиопередатчик через равные промежутки времени T посылает радиосигналы и они отражаются от неподвижного автомобиля, то неподвижный радиоприёмник будет принимать эти сигналы через такие же промежутки времени T.

Если же автомобиль движется к приёмнику со скоростью v, то за период T электромагнитной волны расстояние от приёмника до автомобиля уменьшается на величину $\Delta\lambda = vT$, длина электромагнитной волны λ_1 по направлению движения автомобиля оказывается меньше длины волны λ_0, отражённой от неподвижного автомобиля, на величину vT. При удалении автомобиля от приёмника длина волны λ_2 отражённого сигнала больше λ_0 на величину vT:

$$\lambda_1 = \lambda_0 - vT,$$

$$\lambda_2 = \lambda_0 + vT.$$

Период колебаний радиоволн, отражённых от приближающегося автомобиля, уменьшается на величину

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda}{c} = \frac{vT}{c},$$

где c — скорость распространения радиоволн; v — скорость автомобиля; T — период колебаний отправленной волны. Это значит, что отражённые от автомобиля радиоволны приходят к приёмнику не через период времени T, а через меньший период:

$$T_1 = T - \Delta T = T - \frac{vT}{c} = T\left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

Частота ν_1 радиоволн, отражённых от приближающегося автомобиля, больше частоты ν радиоволн, отражённых от неподвижного автомобиля, на величину

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} = \frac{1}{T\left(1 - \frac{v}{c}\right)} - \frac{1}{T} =$$

$$= \frac{1}{T}\left(\frac{c}{c - v} - 1\right) = \nu\frac{v}{c - v}.$$

При удалении автомобиля от приёмника изменение частоты отражённых сигналов равно $\Delta\nu = \nu_1 - \nu = \nu\frac{v}{c + v}$.

Так как скорость v движения автомобиля во много раз меньше скорости

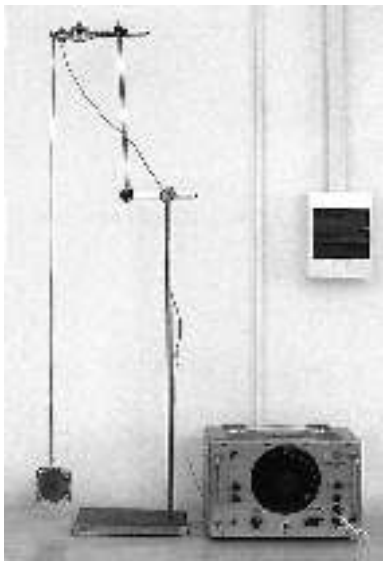

Рис. 9

распространения радиоволн ($v \ll c$), то изменения частоты отражённых радиоволн можно вычислять приблизительно по формуле $\Delta\nu = \nu \frac{v}{c}$.

При желании можно продемонстрировать эффект Доплера на звуковых волнах, используя звуковой генератор и небольшой динамик, подвешенный на длинных проводах (рис. 9). При свободных колебаниях динамика частота звука, воспринимаемого неподвижным наблюдателем, повышается при приближении динамика и понижается при удалении динамика.

§ 4. Путь при равноускоренном движении

При изучении этой темы основное внимание следует уделить установлению связи пути, пройденного при равноускоренном прямолинейном движении, с временем движения, начальной скоростью, конечной скоростью и ускорением. Если в классе мало учащихся, проявляющих повышенный интерес к изучению физики, то можно ограничиться выводом формул (4.1) и (4.2), принимая связь пройденного пути со средним арифметическим значением скорости равноускоренного движения:

$$s = \frac{v_0 + v}{2} t$$

за очевидное утверждение. Далее путём алгебраических преобразований получают формулы (4.3) — (4.9) для вычислений пути, скорости, ускорения и времени равноускоренного прямолинейного движения. Особое внимание учащихся следует обратить на тот факт, что все эти формулы применимы не для любого равноускоренного движения, а только для равноускоренного прямолинейного движения в одном направлении. Ознакомление с геометрическим способом вывода формул (4.1) и (4.2) можно предложить для самостоятельного изучения по желанию учащихся.

В классе с большим числом учащихся, проявляющих повышенный интерес к изучению физики, геометрический способ вывода формул (4.1) и (4.2) можно использовать при объяснении на уроке, но не требовать воспроизведения этого вывода от каждого учащегося. Обязательным целесообразно считать понимание смысла полученных формул и умения применять их на практике при решении задач.

Важным элементом в процессе изучения физического явления или процесса считается этап его экспериментального исследования. До выполнения экспериментального задания 4.1 по измерению ускорения свободного падения необходимо сначала подробно познакомить учащихся со всеми приборами и принадлежностями, используемыми в этом эксперименте, пояснить их устройство и принцип действия. В заключение нужно на демонстрационном столе поэтапно собрать экспериментальную установку, сопровождая каждое своё действие пояснениями, и продемонстрировать способ выполнения эксперимента.

Для облегчения учащимся понимания задач эксперимента и процесса обработки результатов измерений целесообразно до выполнения экспериментального задания решить несколько задач для приобретения опыта применения на практике полученных знаний о равноускоренном прямолинейном движении.

Задача 4.1. Решение.

$v_0 = 0$,

$a = 0{,}2$ м/с^2,

$t = 2$ мин $= 120$ с.

$$s = \frac{at^2}{2},\ s_2 = \frac{0{,}2\ \text{м/с}^2 \cdot (120)^2\ \text{с}^2}{2} = 1440\ \text{м}.$$

Задача 4.2. Решение.

$v_0 = 108$ км/ч $= 30$ м/с,

$v = 0$,

$a = 3$ м/с^2,

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

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2},\ v = v_0 - at = 0,\ t = \frac{v_0}{a},$$

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

$$s = \frac{(30)^2\ \text{м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 3\ \text{м/с}^2} = 150\ \text{м}.$$

Задача 4.3. Решение. В качестве тела отсчёта выберем Землю, ось OY направим вертикально вверх. За начало отсчёта координаты y примем точку запуска мяча.

Координата y и скорость v мяча в любой момент времени будут равны:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y \cdot t^2}{2},$$

$$v_y = v_{0_y} + a_y t.$$

Используя начальные условия $y_0 = 0$, $v_{0y} = v_0$, $a_y = -g$, получаем

$$y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

В момент $t_2 = 4$ с падения мяча на землю $y = 0$ и выполняется равенство

$$v_0 t_2 - \frac{gt_2^2}{2} = 0.$$

Отсюда находим значение модуля начальной скорости мяча:

$$v_0 = \frac{gt_2}{2},\ v_0 = \frac{10\ \text{м/с}^2 \cdot 4\ \text{с}}{2} = 20\ \text{м/с}.$$

В момент времени t_1 достижения мячом высшей точки траектории модуль проекции скорости мяча на ось OY равен нулю: $v_y = 0$. Отсюда следует:

$$0 = v_0 - gt_1,\ t_1 = \frac{v_0}{g} = \frac{20\ \text{м/с}}{10\ \text{м/с}^2} = 2\ \text{с}.$$

Максимальную высоту подъёма h определяем путём подстановки времени подъёма t_1 в уравнение зависимости координаты y от времени:

$$h = y_{\max} = v_0 t_1 - \frac{a_y t_1^2}{2} = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g},$$

$$h = \frac{(20\ \text{м/с})^2}{2 \cdot 10\ \text{м/с}^2} = 20\ \text{м}.$$

Пройденный мячом путь s равен удвоенной высоте h подъёма мяча:

$$s = 2h = 40\ \text{м}.$$

Задача 4.4. Решение.

$v_0 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,
$v_1 = 36$ км/ч $= 10$ м/с,
$t_1 = 2$ с,
$v_2 = 0$,
$\vec{v} \uparrow\downarrow \vec{a}$.

$$s_2 = v_0 t_2 - \frac{at_2^2}{2},\ v_2 = v_0 - at_2 = 0,\ t_2 = \frac{v_0}{a},$$

$$s_2 = v_0 \frac{v_0}{a} - \frac{a\left(\frac{v_0}{a}\right)^2}{2} = \frac{v_0^2}{2a},$$

$$v_1 = v_0 - at_1,$$

$$a = \frac{v_0 - v_1}{t_1},\ s_2 = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0^2 t_1}{2\,(v_0 - v_1)},$$

$$s_2 = \frac{(20\ \text{м/с})^2 \cdot 2\ \text{с}}{2 \cdot (20 - 10)\ \text{м/с}} = 40\ \text{м}.$$

Задача 4.5. Решение. Обозначим через t_1 время падения камня с высоты h. Пройденный за время t_1 путь s_1 равен:

$$s_1 = \frac{gt_1^2}{2} = h.$$

По условию задачи за время падения $t_2 = t_1 - 1$ камень прошел путь $s_2 = 0{,}25h$, поэтому выполняется равенство

$$s_1 = 4s_2,\ \frac{gt_1^2}{2} = 4\,\frac{g\,(t_1 - 1)^2}{2},\ t_1^2 = 4\,(t_1 - 1)^2,$$

$$t_1 = 2\,(t_1 - 1),\ t_1 = 2\ \text{с}.$$

Высота h падения камня равна:

$$h = \frac{gt_1^2}{2} = \frac{10\ \text{м/с}^2 \cdot 4\ \text{с}^2}{2} = 20\ \text{м}.$$

Дополнительные задачи

Задача 4.6. Лыжник скатывался с горы в течение 10 с прямолинейно с постоянным ускорением 2 м/с^2 из состояния покоя, а затем двигался равноускоренно и прямолинейно по горизонтальной лыжне до остановки в течение 8 с. Определите пройденный лыжником путь.

Решение.

$a_1 = 2$ м/с^2,
$t_1 = 10$ с,
$t_2 = 8$ с,
$v_2 = 0$.
$s = s_1 + s_2$,

$$s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{2\ \text{м/с}^2 \cdot (10\ \text{с})^2}{2} = 100\ \text{м},$$

$$s_2 = \frac{v_1 + v_2}{2}\,t_2,$$

$$v_1 = a_1 t_1 = 2\ \text{м/с}^2 \cdot 10\ \text{с} = 20\ \text{м/с},$$

$$s_2 = \frac{20\ \text{м/с} + 0\ \text{м/с}}{2}\ 8\ \text{с} = 80\ \text{м},$$

$s = 100$ м $+ 80$ м $= 180$ м.

Задача 4.7. Два спортсмена прыгнули в воду с моста высотой 20 м, один из них прыгнул вниз на 0,5 с позже другого. На каком расстоянии от воды был второй спортсмен в момент соприкосновения первого спортсмена с водой? Ускорение свободного падения 10 м/с^2, сопротивлением воздуха пренебречь, спортсменов рассматривать как материальные точки.

Решение.

$h_1 = 20$ м,
$t_2 = t_1 - 0{,}5$ с,
$a = 10$ м/с^2.
$\Delta h = h_1 - h_2$,

$$h_1 = \frac{at_1^2}{2},\ t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{a}} = \sqrt{\frac{40\ \text{м}}{10\ \text{м/с}^2}} = 2\ \text{с},$$

$$t_2 = t_1 - 0{,}5\ \text{с} = 2\ \text{с} - 0{,}5\ \text{с} = 1{,}5\ \text{с}.$$

$$h_2 = \frac{at_2^2}{2} = \frac{10\ \text{м/с}^2 \cdot 2{,}25\ \text{с}^2}{2} = 11{,}25\ \text{м},$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 20\ \text{м} - 11{,}25\ \text{м} = 8{,}75\ \text{м}.$$

Задача 4.8. Расстояние между двумя железнодорожными станциями, равное $s = 22{,}5$ км, поезд проходит за время $t = 25$ мин. Первые $t_1 = 5$ мин он идёт равноускоренно, увеличивая скорость, а затем при равноускоренном движении уменьшает скорость до полной остановки. Определите ускорение поезда на участках разгона и торможения и максимальную скорость поезда.

Решение. Обозначим ускорение поезда на участках разгона и торможения соответственно a_1 и a_2, максимальную скорость поезда v, время разгона t_1, время торможения t_2 ($t_1 = 5$ мин, $t_2 = 20$ мин). По условию задачи выполняются равенства

$$a_1 t_1 = v,\ v - a_2 t_2 = 0,\ a_2 t_2 = v.$$

Отсюда ускорения a_1 и a_2 связаны соотношением

$$a_1 t_1 = a_2 t_2,\ a_1 = a_2\ \frac{t_2}{t_1} = a_2\ \frac{20\ \text{мин}}{5\ \text{мин}} = 4a_2,$$

Выразим пройденное расстояние s через ускорение a_2:

$$s = \frac{a_1 t_1^2}{2} + vt_2 - \frac{a_2 t_2^2}{2} = \frac{a_1 t_1^2}{2} + a_1 t_1 t_2 - \frac{a_2 t_2^2}{2} =$$

$$= \frac{4a_2 t_1^2}{2} + 4a_2 t_1 t_2 - \frac{a_2 t_2^2}{2}.$$

Отсюда находим значение ускорения a_2:

$$a_2 = \frac{2s}{4t_1^2 + 8t_1 t_2 - t_2^2},$$

$$a_2 = \frac{45000}{4 \cdot (300)^2 + 8 \cdot 300 \cdot 1200 - (1200)^2}\ (\text{м/с}^2) =$$

$$= \frac{4{,}5}{4 \cdot 9 + 8 \cdot 36 - 144}\ (\text{м/с}^2) = 0{,}025\ \text{м/с}^2,$$

$$a_1 = 4a_2,\ a_1 = 0{,}1\ \text{м/с}^2,$$

$$v = a_1 t_1 = 0{,}1\ \text{м/с}^2 \cdot 300\ \text{с} =$$

$$= 30\ \text{м/с} = 108\ \text{км/ч}.$$

Задача 4.9. Найдите отношение путей, пройденных из состояния покоя за первый, второй, третий и последующие одинаковые интервалы времени.

Решение. $v_0 = 0$, $a = \text{const}$, $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \ldots\ \Delta t_n = \Delta t$,

$$t_1 = \Delta t,\ t_2 = 2\Delta t,\ t_3 = 3\Delta t,\ \ldots\ t_n = n\Delta t,$$

$$s_1 = \frac{at_1^2}{2} = \frac{a\,(\Delta t)^2}{2},\ s_2 = \frac{at_2^2}{2} = \frac{a\,(2\Delta t)^2}{2},$$

$$s_3 = \frac{at_3^2}{2} = \frac{a\,(3\Delta t)^2}{2},\ \ldots,\ s_n = \frac{at_n^2}{2} = \frac{a\,(n\Delta t)^2}{2},$$

$$\Delta s_1 = s_1,\ \Delta s_2 = s_2 - s_1,\ \Delta s_3 = s_3 - s_2\ \ldots$$

$$\Delta s_1 = \frac{a\Delta t^2}{2},\ \Delta s_2 = \frac{a3\Delta t^2}{2},\ \Delta s_3 = \frac{a5\Delta t^2}{2}\ \ldots$$

$$\Delta s_1 : \Delta s_2 : \Delta s_3\ \ldots = 1 : 3 : 5 : \ldots$$

Мы получили, что при равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью, равной нулю, пути, пройденные за первый, второй, третий и последующие одинаковые интервалы времени, относятся как последовательные нечётные числа натурального ряда чисел.

Задача 4.10. Выведите формулу (4.2).

Решение. Для вывода формулы пути равноускоренного прямолинейного движения с вектором ускорения, направленным противоположно вектору скорости, можно использовать график зависимости модуля скорости от времени этого движения.

Задача 4.11. Определите путь, пройденный свободно падающим телом за пятую секунду свободного полёта.

Решение. $s = s_5 - s_4$,

$$s = \frac{gt_5^2}{2} - \frac{gt_4^2}{2} = \frac{g\left(t_5^2 - t_4^2\right)}{2},$$

$$s = \frac{9{,}8 \cdot (25 - 16)}{2}\ \text{м} = 44{,}1\ \text{м}.$$

Задача 4.12. При прыжке с какой высоты скорость человека у поверхности Земли будет равна 36 км/ч?

Решение.

$a = 10\ \text{м/с}^2$,

$v = 36\ \text{км/ч} = 10\ \text{м/с}$.

$$s = \frac{at^2}{2},\ v = at,\ t = \frac{v}{a},$$

$$s = \frac{av^2}{2a^2} = \frac{v^2}{2a},\ s = \frac{100}{2 \cdot 10}\ \text{м} = 5\ \text{м}.$$

Задача 4.13. Мяч брошен вертикально вверх с начальной скоростью 10 м/с. На какой высоте над поверхностью Земли будет находиться мяч через 4 с после начала движения? Движение мяча началось на высоте 15 м от поверхности Земли. Сопротивление воздуха считать пренебрежимо малым.

Решение. Выберем в качестве тела отсчёта Землю, координатную ось $0Y$, направленную вертикально вверх и проходящую через точку, из которой началось движение мяча. За начало отсчё-

та примем точку пересечения оси $0Y$ с поверхностью Земли. В этой системе отсчёта начальная координата мяча в момент времени $t = 0$ равна $y_0 = 15$ м.

Запишем начальные условия и уравнение зависимости координаты y мяча от времени: $y_0 = 15$ м, $v_0 = 10$ м/с, $g = 10$ м/с^2, $t = 4$ с.

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2},$$

$$y = 15\text{ м} + 10 \cdot 4\text{ м} - \frac{10 \cdot 16}{2}\text{ м} = -25\text{ м}.$$

Отрицательное значение координаты y означает, что при заданной зависимости координаты y от времени мяч через 4 с после начала движения должен оказаться на 25 м ниже поверхности Земли. Следовательно, мяч упал на поверхность Земли менее чем через 4 с после начала движения. Ответ: высота мяча над поверхностью Земли равна 0.

Полученный результат можно проверить независимым решением. Для этого вычислим время t_1, через которое мяч упадёт на поверхность Земли. Это время складывается из времени t_2 подъёма до верхней точки траектории и времени t_3 падения на Землю: $t_1 = t_2 + t_3$.

$$v = v_0 - gt_2 = 0,\ t_2 = \frac{v_0}{g},\ t_2 = \frac{10}{10}\text{ с} = 1\text{ с}.$$

Расстояние s от верхней точки до поверхности Земли равно:

$$s = y_1 = y_0 + v_0 t_2 - \frac{gt_2^2}{2},$$

$$s = 15\text{ м} + 10 \cdot 1\text{ м} - \frac{10 \cdot 1}{2} = 20\text{ м}.$$

Вычислим время t_3 падения из верхней точки траектории до поверхности Земли:

$$\frac{gt_3^2}{2} = s,\ t_3 = \sqrt{\frac{2s}{g}},\ t_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{10}}\text{ с} = 2\text{ с},$$

$$t_1 = t_2 + t_3 = 1\text{ с} + 2\text{ с} = 3\text{ с}.$$

Задача 4.14. Тело прошло за первую секунду путь 1 м, за вторую — 2 м, за третью — 3 м и т. д. Такое движение является равноускоренным или равномерным?

Решение. Так как тело проходит за одинаковые промежутки времени не одинаковые пути, движение неравномерное. При решении задачи 4.9 мы получили, что при равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью, равной нулю, пути, пройденные за первый, второй, третий и последующие одинаковые интервалы времени, относятся как последовательные нечётные числа натурального ряда чисел. Следовательно, данное движение не является равноускоренным движением.

Задача 4.15. Поезд начинает двигаться прямолинейно с постоянным ускорением 0,3 м/с^2. Через 1 мин после начала движения был сорван стоп-кран, и поезд остановился через 10 с равноускоренного движения. Постройте графики зависимостей модулей скорости и ускорения поезда от времени.

Решение. Вычислим максимальную скорость поезда через 1 мин после начала движения:

$$v_{max} = a_1 t_1,\ v_{max} = 0{,}3 \cdot 60\text{ м/с} = 18\text{ м/с}.$$

Вычислим ускорение a_2 поезда при торможении:

$$v_{max} - a_2 t_2 = 0,$$

$$a_2 = \frac{v_{max}}{t_2},\ a_2 = \frac{18}{10}\text{ м/с}^2 = 1{,}8\text{ м/с}^2.$$

Графики зависимости модулей скорости и ускорения поезда от времени представлены на рисунках 10 и 11.

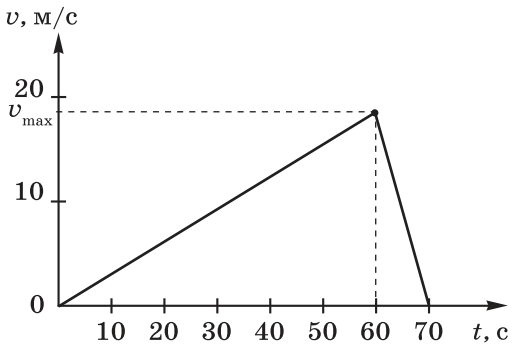

Рис. 10

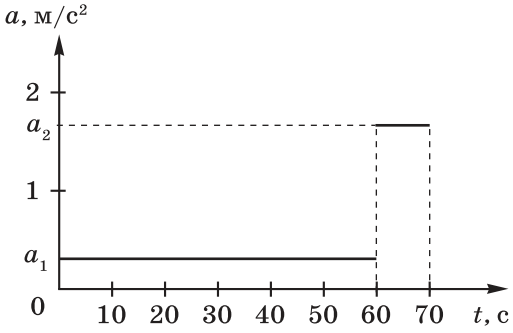

Рис. 11

Задача 4.16. Когда автомобиль был в 36 м от перекрёстка, загорелся красный свет светофора. Успеет ли остановиться автомобиль перед перекрёстком, если скорость его перед началом торможения 54 км/ч, а модуль ускорения при торможении 5 м/с^2?

Учтите, что время реакции водителя на световой сигнал 0,5 с, время срабатывания тормозов 0,2 с.

Решение.

$v_0 = 54$ км/ч $= 15$ м/с,

$a = 5$ м/с^2,

$\Delta t = 0{,}7$ с,

$s_1 = 36$ м.

Вычислим время торможения автомобиля до остановки:

$$v_0 - at = 0,\ t = \frac{v_0}{a},\ t = \frac{15}{5}\ \text{с} = 3\ \text{с}.$$

Вычислим путь s_2 автомобиля до остановки:

$$s_2 = v_0\Delta t + v_0 t - \frac{at^2}{2},$$

$$s_2 = 15 \cdot 0{,}7\ \text{м} + 15 \cdot 3\ \text{м} - \frac{5 \cdot 9}{2}\ \text{м} = 33\ \text{м}.$$

Путь s_2 автомобиля до остановки меньше расстояния s_1 до перекрёстка. Автомобиль успеет остановиться перед перекрёстком.

Задача 4.17. Какой длины должна быть взлётная полоса аэродрома для самолёта Ил-62, если для взлёта самолёту необходимо иметь скорость 324 км/ч, а скорость его движения по взлётной полосе должна быть с ускорением 1,6 м/с^2?

Решение.

$v = 324$ км/ч $= 90$ м/с,

$a = 1{,}6$ м/с^2.

$v = at$,

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{a\left(\frac{v}{a}\right)^2}{2} = \frac{v^2}{2a},$$

$$s = \frac{90 \cdot 90}{2 \cdot 1{,}6}\ \text{м} \approx 2531\ \text{м}.$$

Задача 4.18. С воздушного шара с интервалом времени 2 с сбросили два мешка с балластом. Определите расстояние между мешками через 5 с после сбрасывания первого мешка.

Решение.

$v_0 = 0$,

$g = 10$ м/с^2,

$t_1 = 5$ с,

$t_2 = 3$ с.

$$s_1 - s_2 = \frac{gt_1^2}{2} - \frac{gt_2^2}{2} = \frac{g}{2}\left(t_1^2 - t_2^2\right),$$

$$s_1 - s_2 = 5\ (25 - 9)\ \text{м} = 80\ \text{м}.$$

§ 5. Равномерное движение по окружности

При изучении этой темы учащиеся знакомятся с особым видом движения, довольно часто встречающимся в практической жизни. Равномерное движение по окружности является и равномерным, но с ускорением, и одновременно ускоренным движением, но с постоянной по модулю скоростью. На эти особенности движения нужно обратить особое внимание учащихся.

На контрольный вопрос о том, является ли равномерное движение по окружности ускоренным движением, правильный ответ — утвердительный, так как это движение с изменяющейся скоростью, хотя изменяется только направление вектора скорости. На вопрос, является ли равномерное движение по окружности равноускоренным движением, правильный ответ — отрицательный, так как вектор ускорения при таком движении изменяется из-за изменения его направления.

Доказательством того, что при равномерном движении по окружности вектор ускорения направлен к центру окружности, является неизменность модуля скорости. Неизменность модуля скорости означает, что нет составляющей вектора ускорения вдоль направления вектора скорости. Следовательно, в любой момент времени вектор ускорения перпендикулярен вектору скорости и направлен к центру окружности.

Задача 5.1. Решение.

$R = 384\ 000$ км $= 384\ 000\ 000$ м,

$T \approx 27{,}3$ сут. $\approx 2\ 358\ 720$ с.

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}1416 \cdot 384\ 000\ 000}{2\ 358\ 720}\ \text{м/с} \approx$$

≈ 1023 м/с ≈ 1 км/с,

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

$$a \approx \frac{(1023)^2}{384\ 000\ 000}\ \text{м/с}^2 \approx 0{,}0027\ \text{м/с}^2 \approx$$

$\approx 0{,}27$ см/с^2.

Задача 5.2. Решение.

$R = 150\,000\,000$ км $= 150\,000\,000\,000$ м,

$T \approx 365{,}25$ сут. $\approx 31\,557\,600$ с.

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}1416 \cdot 150\,000\,000\,000}{31\,557\,600} \text{ м/с} \approx$$

$\approx 29\,865$ м/с ≈ 30 км/с.

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

$$a = \frac{(29\,865)^2}{150\,000\,000\,000} \text{ м/с}^2 \approx$$

$\approx 0{,}006$ м/с^2 $\approx 0{,}6$ см/с^2.

Задача 5.3. Решение.

$a = 9{,}8$ м/с^2,

$R = 6400$ км $= 6\,400\,000$ м.

$$a = \frac{v^2}{R},\ v = \sqrt{Ra},$$

$$v = \sqrt{6\,400\,000 \cdot 9{,}8} \text{ м/с} \approx 7920 \text{ м/с} \approx$$

$\approx 7{,}9$ км/с.

Задача 5.4. Решение.

$h = 250$ км,

$T = 1{,}49$ ч $= 5364$ с.

Вычислим радиус R окружности, по которой движется корабль:

$$R = R_з + h,$$

$$R = 6400 \text{ км} + 250 \text{ км} = 6650 \text{ км} = 6\,650\,000 \text{ м}.$$

Вычислим скорость и ускорение корабля:

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}1416 \cdot 6\,650\,000}{5364} \text{ м/с} \approx$$

≈ 7790 м/с $\approx 7{,}8$ км/с.

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

$$a = \frac{(7790)^2}{6\,650\,000} \text{ м/с}^2 \approx 9{,}125 \text{ м/с}^2.$$

Задача 5.5. Решение.

$a = 10$ м/с^2,

$v = 20$ м/с.

$$a = \frac{v^2}{R},\ R = \frac{v^2}{a},\ R = \frac{400}{10} \text{ м} = 40 \text{ м}.$$

Задача 5.6. Решение. На рисунке 5.8 учебника видно, что в точке *1* траектории составляющая вектора ускорения, направленная вдоль вектора скорости, имеет направление, противоположное вектору скорости $\vec{v}_1$. Поэтому модуль вектора скорости $\vec{v}_1$ в точке *1* уменьшается. В точке *2* траектории составляющая вектора ускорения, направленная вдоль вектора скорости, имеет направление, параллельное вектору скорости $\vec{v}_2$. Поэтому модуль вектора скорости $\vec{v}_2$ в точке *2* увеличивается.

Задача 5.7. Решение. Как видно из рисунка 12, радиус r окружности, описываемой произвольной точкой A земной поверхности вследствие вращения Земли вокруг своей оси, равен $r = R\cos\varphi$, где R — радиус Земли; φ — широта местности. Следовательно, центростремительное ускорение точки A равно:

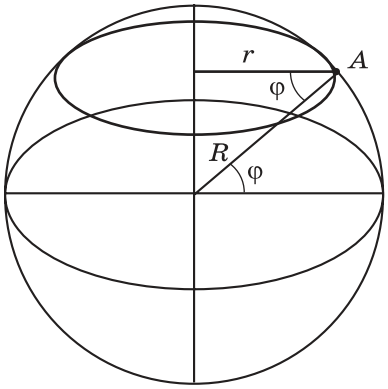

Рис. 12

$$a_{ЦС} = \frac{v_A^2}{r} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2}{T^2} R\cos\varphi.$$

На экваторе:

$$a_э = \frac{4 \cdot (3{,}14)^2}{(24 \cdot 3600)^2} 6\,400\,000 \text{ м/с}^2 = 0{,}034 \text{ м/с}^2.$$

На широте 56°:

$$a_М = a_э \cdot \cos 56° \approx 0{,}034 \text{ м/с}^2 \cdot 0{,}56 \approx 0{,}019 \text{ м/с}^2.$$

§ 6. Относительность механического движения

С фактами относительности траектории движения тела, пройденного пути и скорости тела учащиеся уже знакомились при изучении физики в 7 классе. В 9 классе от качественного ознакомления с явлениями относительности механических величин нужно перейти к установлению количественных связей

между физическими величинами при их измерении в различных системах отсчёта. Установление таких связей необходимо для решения многих практических задач.

Задача 6.1. Решение. Выберем в качестве системы отсчёта воду реки, ширину реки s будем считать одинаковой на участке DD_1 (рис. 13). Оба гребца

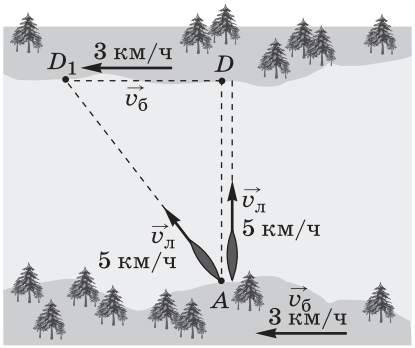

Рис. 13

видят, что берега реки движутся относительно воды справа налево со скоростью 3 км/ч. Первый гребец, плывший по воде перпендикулярно вектору скорости берега реки, преодолевает относительно воды путь s, равный ширине реки. Время t_1 его движения равно:

$$t_1 = \frac{s}{v},\ t_1 = \frac{0{,}4\ \text{км}}{5\ \text{км/ч}} = 0{,}08\ \text{ч} = 4{,}8\ \text{мин}.$$

Второй гребец выбрал такое направление вектора скорости относительно воды, что его лодка двигалась всё время по направлению к точке D. За время t_2 его движения до противоположного берега точка D переместилась на расстояние DD_1, равное

$$DD_1 = v_б t_2.$$

Лодка при этом переместилась относительно воды на расстояние AD_1:

$$AD_1 = v_л t_2.$$

Из прямоугольного треугольника ADD_1 следует равенство

$$AD_1^2 = AD^2 + DD_1^2,\ v_л^2 t_2^2 = 0{,}4^2 + v_б^2 t_2^2,$$

$$t_2^2\,(v^2{}_л - v_б^2) = 0{,}4^2,$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{0{,}4^2}{5^2 - 3^2}}\ \text{ч} = \frac{0{,}4}{4}\ \text{ч} = 0{,}1\ \text{ч} = 6\ \text{мин}.$$

Задача 6.2. Решение. Задача проще всего решается в системе отсчёта, связанной с одним из пловцов. В этой системе отсчёта второй пловец движется к первому со скоростью 1 м/с. После начала движения пловцы встретятся через время, равное

$$t = \frac{s}{v},\ t = \frac{600}{1}\ \text{с} = 600\ \text{с} = 10\ \text{мин}.$$

Задача 6.3. Решение. Выберем в качестве тела отсчёта Землю. Ось OY системы координат выберем направленной вертикально вверх, за начало отсчёта выберем точку падения тел на Землю.

Начальные координаты тел равны: $y_{01} = y_{02} = h$, начальные скорости v и u. За начало отсчёта времени выберем момент сообщения телам начальной скорости. Уравнения движения тел имеют вид

$$y_1 = h + vt - \frac{gt^2}{2},\ y_2 = h - ut - \frac{gt^2}{2}.$$

Расстояние между телами через время t равно разности координат:

$$l = y_1 - y_2 = (v + u)\ t,$$

отсюда время движения равно:

$$t = \frac{l}{v + u}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$t = \frac{20\ \text{м}}{4\ \text{м/с} + 6\ \text{м/с}} = 2\ \text{с}.$$

Более простое решение получается при выборе в качестве тела отсчёта нижнее тело. В этом случае начальные координаты тел равны $y_{01} = y_{02} = 0$, начальная скорость верхнего тела равна $v_{21} = v + u$.

Тела движутся с одинаковым ускорением, их относительная скорость v_{21} постоянна во время всего полёта. Уравнения движения тел имеют вид

$$y_1 = (v + u)\ t,\ y_2 = 0.$$

Расстояние между телами через время t равно разности координат:

$$l = y_1 - y_2 = (v + u)\ t,$$

отсюда получим

$$t = \frac{l}{v + u} = 2\ \text{с}.$$

Задача 6.4. Решение. Выберем систему отсчёта, связанную с Землёй. Ось OY направим по вектору скорости $\vec{v}_1$ первого велосипедиста, ось OX — по вектору скорости $\vec{v}_2$ второго велоси-

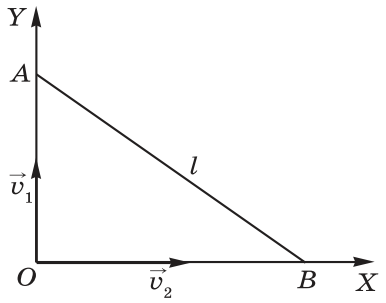

Рис. 14

педиста (рис. 14). Начало координат совместим с точкой старта велосипедистов. В этой системе отсчёта первый велосипедист за 10 мин переместился из точки O в точку A с координатой $y = v_1 t$, второй — из точки O в точку B с координатой $x = v_2 t$.

Расстояние l между велосипедистами равно AB:

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(v_2 t)^2 + (v_1 t)^2} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot t.$$

Скорость удаления велосипедистов друг от друга равна:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot t}{t} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}.$$

Подставляя значения скоростей v_1 и v_2, находим значения скорости и расстояния:

$$v = 5 \text{ м/с}, \ l = 3000 \text{ м}.$$

Более простое решение получается при использовании системы отсчёта, связанной с одним из велосипедистов.

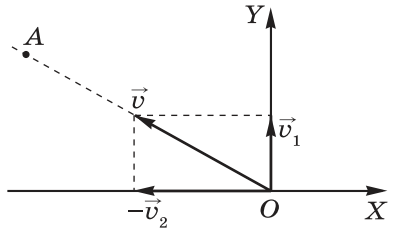

Рис. 15

В этой системе отсчёта второй велосипедист неподвижен, Земля движется со скоростью $-\vec{v}_2$, а первый велосипедист движется со скоростью $\vec{v}_1$ относительно Земли. Скорость $\vec{v}$ первого велосипедиста относительно второго равна сумме векторов $\vec{v}_1$ и $-\vec{v}_2$ (рис. 15):

$$v = v_1 - v_2, \ \ v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2},$$

$$v = \sqrt{9 + 16} \text{ м/с} = 5 \text{ м/с}.$$

Расстояние OA равно пути, пройденному за 10 мин первым велосипедистом относительно второго со скоростью v:

$$s = vt,$$

$$s = 5 \text{ м/с} \cdot 600 \text{ с} = 3000 \text{ м} = 3 \text{ км}.$$

Задача 6.5. Решение. В качестве тела отсчёта примем Землю. Выберем систему координат таким образом, чтобы ось OY была направлена вертикально вверх, а ось OX расположим так, чтобы вектор скорости лежал в плоскости XOY (рис. 16). В этом случае движение происходит в плоскости XOY.

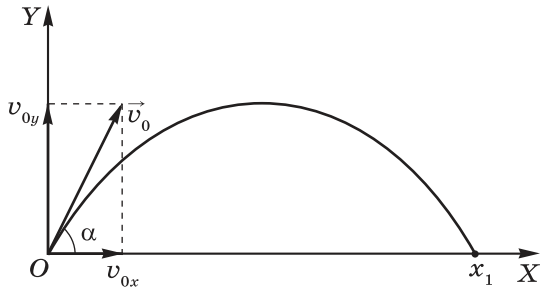

Рис. 16

Точку удара по мячу примем за начало отсчёта координат. Запишем начальные условия:

$x_0 = 0$,
$y_0 = 0$,
$v_0 = 144$ км/ч $= 40$ м/с,
$\alpha = 53°$,
$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \ v_{0y} = v_0 \sin \alpha$.

За начало отсчёта времени примем момент удара. Значения проекций ускорений на оси координат равны:

$$a_x = 0, \ a_y = -g.$$

Значения проекций скорости в любой момент времени t равны:

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

Координаты мяча в момент времени t равны:

$$x = v_0 t \cos \alpha, \ y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

По условию задачи известно значение координаты y в момент падения мяча: $y_1 = 0$ м. По известному значению координаты y_1 найдём время t_1

движения мяча. Для этого нужно решить квадратное уравнение:

$$y_1 = v_0 t_1 \sin\alpha - \frac{g t_1^2}{2} = 0,$$

$$t_1 = \frac{2 v_0 \sin\alpha}{g},\ t_1 = \frac{2 \cdot 40 \cdot 0{,}8}{10}\ \text{с} = 6{,}4\ \text{с}.$$

Найдём координату x_1 мяча в момент времени t_1:

$$x_1 = v_0 \cos\alpha t_1,$$

$$x_1 \approx 40 \cdot 0{,}6 \cdot 6{,}4\ \text{м} \approx 153{,}6\ \text{м}.$$

Расстояние l от начальной точки траектории мяча до точки его падения равно разности координат x этих точек:

$$l = x_1 - x_0 = 153{,}6\ \text{м}.$$

Дополнительные задачи

Задача 6.6. Лодку подтягивают лебёдкой к берегу. Скорость наматывания каната на лебёдку постоянна и равна $\vec{v}$. С какой скоростью движется лодка к берегу в тот момент времени, когда канат составляет угол α с горизонтальной плоскостью?

Решение. Вектор скорости $\vec{v}_л$ лодки можно найти по известным модулю и направлению вектора скорости $\vec{v}$ движения каната в точке его крепления к лодке (рис. 17). Для этого нужно разложить вектор $\vec{v}_л$ скорости лодки на два направления, одним из которых является направление каната от лодки к лебёдке. Выбор другого направления на первый взгляд представляется произвольным, так как результирующий вектор может быть получен сложением двух векторов, расположенных под любым углом. Рассмотрим два варианта.

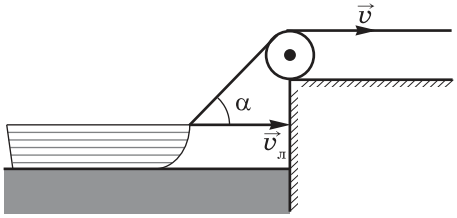

Рис. 17

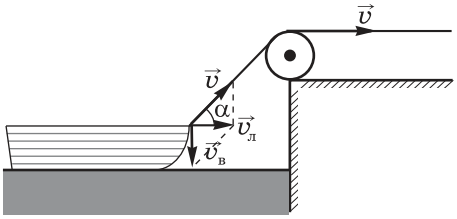

Рис. 18

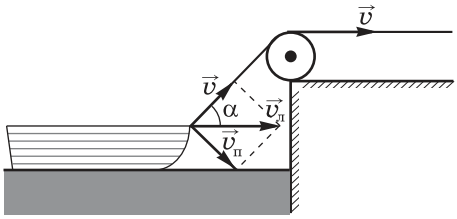

Рис. 19

В первом варианте (рис. 18) вектор $\vec{v}_л$ скорости движения лодки представляется как сумма векторов $\vec{v}$ движения каната и $\vec{v}_в$ движения лодки в вертикальном направлении. В этом случае скорость $\vec{v}_л$ лодки равна:

$$v_л = v \cos\alpha.$$

Во втором варианте (рис. 19) вектор $\vec{v}_л$ скорости лодки представляется как сумма векторов $\vec{v}$ движения каната и $\vec{v}_п$ движения лодки в направлении, перпендикулярном канату. В этом случае скорость $\vec{v}_л$ лодки равна:

$$v_л = \frac{v}{\cos\alpha}.$$

Результаты первого и второго вариантов принципиально различны. В первом варианте по мере приближения к берегу ($\alpha \to 90°$, $\cos\alpha \to 0$) скорость $\vec{v}_л$ лодки стремится к нулю, а во втором — к бесконечности. Какой же из этих результатов верный?

Верным является второй вариант решения. Ошибочность первого варианта можно доказать, обнаружив в нём внутреннее противоречие. По условию задачи скорость лодки в направлении каната равна $\vec{v}$. Однако второй вектор $\vec{v}_в$ имеет отличную от нуля проекцию на направление каната, следовательно, скорость движения каната будет отлична от заданного по условию значения $\vec{v}$.

Правильность второго варианта решения не означает невозможности нахождения скоростей движения лодки по любым другим направлениям. Однако скорость лодки по любому направлению определяется проекцией вектора $\vec{v}_л$ лодки на это направление. В частности,

проекция скорости $\vec{v}_л$ лодки на вертикальную ось равна нулю.

Таким образом, для нахождения скорости движения тела по любому направлению нужно найти проекцию скорости $\vec{v}$ на это направление.

Задача 6.7. С воздушного шара, находящегося на высоте 180 м от земной поверхности, с интервалом времени 4 с падают два камня. Постройте график зависимости от времени проекции скорости v_y первого камня относительно второго и график зависимости от времени расстояния s между камнями. Сопротивление воздуха не учитывать, ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2.

Решение. Выберем ось $0Y$, проходящую через точку старта камней и направленную вертикально вниз, за начало отсчёта примем точку старта камней. Систему отсчёта свяжем с воздушным шаром. Отсчёт времени начнём с момента начала движения первого камня. В этой системе отсчёта в интервале времени от 0 до 4 с проекции скоростей v_1 и v_2 на ось $0Y$ и координаты y_1 и y_2 первого и второго камней в зависимости от времени определяются уравнениями

$$v_1 = gt,\ v_2 = 0,\ y_1 = \frac{gt^2}{2},\ y_2 = 0.$$

Проекция скорости v_y первого камня относительно второго равна разности скоростей v_1 и v_2:

$$v_y = v_1 - v_2 = gt,$$

а расстояние s между камнями равно разности координат y_1 и y_2:

$$s = y_1 - y_2 = \frac{gt^2}{2}.$$

Для построения графиков $v_y(t)$ и $s(t)$ в интервале времени от 0 до 4 с вычислим значения v и s с интервалом времени 1 с и запишем их в таблицу 1.

Таблица 1

t, с	0	1	2	3	4
v_y, м/с	0	10	20	30	40
s, м	0	5	20	45	80

В интервале времени от 4 с до момента t_1 падения первого камня на земную поверхность уравнения для определения скоростей и координат камней в системе отсчёта, связанной с шаром, имеют вид

$$v_1 = gt,\ v_2 = g\,(t - 4),$$
$$y_1 = \frac{gt^2}{2},\ y_2 = \frac{g\,(t-4)^2}{2}.$$

Из этих уравнений для системы отсчёта, связанной со вторым камнем, следует, что проекция v_y на ось $0Y$ скорости первого камня относительно второго равна:

$$v_y = v_1 - v_2 = 4g,$$

а расстояние s между камнями равно разности координат y_1 и y_2:

$$s = y_1 - y_2 = 4gt - 8g.$$

Вычислим значение времени t_1 и запишем значения v_y и s для моментов времени 5 и 6 с в таблицу 2:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2H}{g}},\ t_1 = \sqrt{\frac{2\cdot 180}{10}}\ \text{с} = 6\ \text{с}.$$

Таблица 2

t, с	5	6
v_y, м/с	40	40
s, м	120	160

От момента времени t_1 достижения земной поверхности первым камнем до момента времени t_2 достижения земной поверхности вторым камнем уравнения для определения скоростей и координат камней в системе отсчёта, связанной с шаром, имеют вид

$$v_1 = 0,\ v_2 = g\,(t - 4),$$
$$y_1 = 180\ \text{м},\ y_2 = \frac{g\,(t-4)^2}{2}.$$

Из этих уравнений следует:

$$v_y = v_1 - v_2 = -g\,(t - 4),$$
$$y_1 - y_2 = 180\ \text{м} - \frac{g\,(t-4)^2}{2}.$$

Вычислим значения v_y и s и запишем их в таблицу 3.

Таблица 3

t, с	6	7	8	9	10
v_y, м/с	–20	–30	–40	–50	–60
s, м	160	135	100	55	0

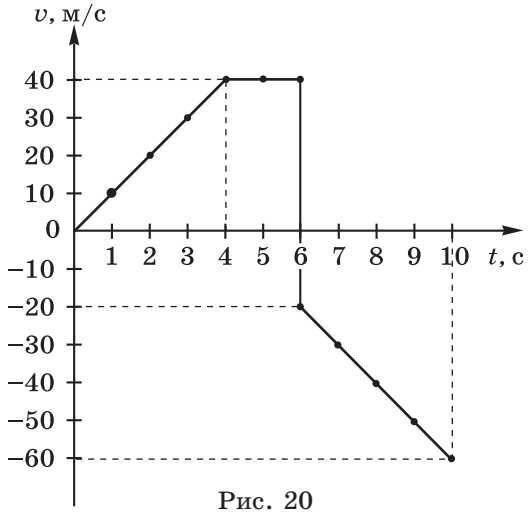

Рис. 20

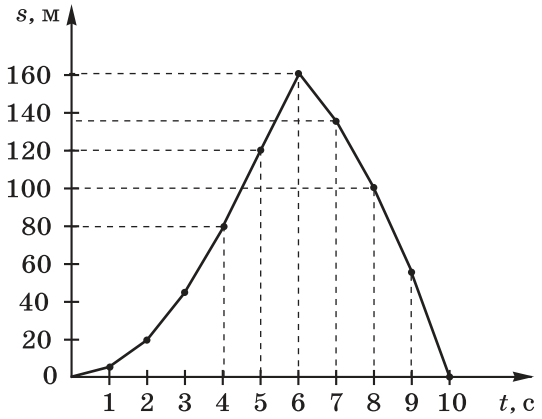

Рис. 21

Отрицательные значения проекции скорости v_y в таблице 3 означают, что с момента времени $t_1 = 6$ с в системе отсчёта, связанной со вторым камнем, направление скорости движения первого камня изменяется на противоположное. До момента времени t_1 первый камень удалялся от второго, с момента времени t_1 и до момента времени t_2 он приближался к нему. По данным таблиц 1—3 построим графики проекции скорости v_y (рис. 20) и расстояния s (рис. 21).

Задача 6.8. Лодочная станция находится на берегу озера около устья реки. Катер совершает первую поездку туда и обратно на расстояние 600 м по озеру, вторую поездку 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 первую и вторую поездки.

Решение. 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:

$$t_4 = t_2 + t_3 = 450\ \text{с}.$$

§ 7. Первый закон Ньютона

Явление инерции. Явление инерции уже рассматривалось в 7 классе. Можно выполнить несколько таких опытов, показывающих свойство инертности тел, которые не демонстрировались в 7 классе. Часть этих опытов описана в книге для учителя к учебнику 7 класса. Напомним несколько из возможных демонстрационных опытов.

Опыт с гирей, подвешенной на нити (обрыв верхней или нижней нити в зависимости от скорости рывка нижней нити).

Опыт с выдёргиванием листа бумаги из-под стакана с водой у края стола.

Опыт с переламыванием палки, подвешенной на бумажных кольцах, при резком ударе стержнем по её середине.

Масса. В 7 классе вводилось понятие массы, давалось определение единицы массы 1 кг и рассматривались способы измерения массы. Однако всё это делалось не строго, без использования понятия ускорения.

Строгое введение понятия массы опирается на опытный факт постоянства отношения ускорений двух тел при любых их взаимодействиях. Можно напомнить учащимся, как определялась масса в 7 классе, и обратить их внимание на

тот факт, что более строгое определение массы по смыслу совпадает с данным ранее определением.

Рассмотрение понятия массы как одного из основных теоретических понятий физики как науки в 8 классе может быть ограничено уровнем, принятым в учебнике. Но учителю физики необходимо знать об этом понятии значительно больше для того, чтобы быть готовым к обсуждению довольно сложного вопроса «Что же такое масса на самом деле?», если любознательные учащиеся зададут такой вопрос. Нужно быть готовым и к вопросу учащихся о том, изменяется ли масса со скоростью или не изменяется. Если раньше ответ на этот вопрос был однозначным, то теперь учащиеся в разных книгах прочитают противоположные ответы.

Несколько десятилетий длятся дискуссии авторов учебников, методистов и учителей по поводу методической концепции введения понятий массы и силы в школьном обучении. Причина споров не в том, что в физике до сих пор нет полной ясности, что такое масса и что такое сила. Проблемы выяснения, что такое масса или сила, на самом деле в науке нет и никогда не было, так как масса и сила не есть материальные объекты, сущность которых можно исследовать экспериментально и теоретически.

Понятия «масса» и «сила», как и многие другие физические понятия, созданы умом человека для описания свойств материального мира.

Правильными понятиями массы и силы можно признать такие понятия, с помощью которых наиболее полно, просто и непротиворечиво описываются все известные физические явления. Во времена Ньютона для описания механических явлений было достаточно определить массу как меру количества вещества. В XX в. для описания релятивистских явлений ньютоновское определение понятия массы оказалось непригодным и начался поиск такого изменения этого понятия, которое позволило бы применять его как в классической физике, так и при движении тел со скоростями, близкими к скорости света. В результате отказались от простого понятия массы как однозначной и неизменной характеристики данного тела. Вместо одного понятия массы как меры количества вещества оказались необходимы три различных понятия массы.

1. Инертная масса m, определяемая по ускорению a тела, возникающему под действием силы F, на основании второго закона Ньютона:

$$F = ma,\ m = \frac{F}{a}. \qquad (1)$$

2. Гравитационная масса m, определяемая по силе F гравитационного взаимодействия с другим телом известной массы M:

$$F = G\frac{mM}{R^2},\ m = \frac{FR^2}{GM}. \qquad (2)$$

3. Релятивистская масса m тела, определяемая на основании соотношения Эйнштейна, устанавливающего связь между массой m и полной энергией E тела:

$$E = mc^2,\ m = \frac{E}{c^2}, \qquad (3)$$

где c — скорость света в вакууме.

Все три массы определяются в различных взаимодействиях, поэтому они оказались независимыми друг от друга. Но эксперименты показали, что все три массы во всех телах строго пропорциональны друг другу. Поэтому целесообразно в формулах (1), (2) и (3) выбрать такие коэффициенты пропорциональности, при которых числовые значения инертной, гравитационной и релятивистской массы одного и того же тела одинаковы и можно во всех расчётах пользоваться одной и той же единицей массы. В СИ это килограмм (1 кг).

Пропорциональность всех трёх масс приводит к выводу, что все тела обладают одним универсальным свойством, обусловливающим одновременно инертность тела, его способность к гравитационному взаимодействию и определяющим полный запас энергии тела.

Однако в специальной теории относительности ускорение $\vec{a}$ тела под действием силы $\vec{F}$ зависит не только от инертной массы m тела, но и от скорости $\vec{v}$ его движения и угла α между направлениями векторов силы $\vec{F}$ и скорости $\vec{v}$ тела. Чтобы учесть эти эффекты, были введены понятия «продольная масса» и «поперечная масса» тела. В результате, например, гравитационная масса фотона, летящего перпендикулярно вектору силы гравитационного

притяжения, оказывается вдвое больше гравитационной массы точно такого же фотона, летящего по направлению этого вектора силы.

Очевидно, что если бы представления о существовании множества различных масс у одного и того же тела и о зависимости этих масс от скорости бесспорно утвердились в современной физике, то не существовало бы методической проблемы, какое понятие массы вводить в школьном курсе физики, так как задачей школьного курса является формирование современных научных понятий об окружающем мире и его законах. Введение в школьное обучение каких-либо упрощённых физических понятий, противоречащих современным научным представлениям о мире, не может быть оправдано никакими методическими соображениями и ссылками на сложность научных понятий.

В случае с понятием массы в настоящее время в науке дело обстоит иначе. Хотя в некоторых учебниках и в научно-популярных книгах масса тела ещё рассматривается как изменяющаяся со скоростью физическая величина, в науке физике всё более утверждается представление о массе как величине, не зависящей от скорости движения тела. Подробно проблема понятия массы рассмотрена в статье академика Л. Б. Окуня. (Окунь Л. Б. Понятие массы // Успехи физических наук. — 1989. — Июль. — Т. 158. — Вып. 3. — С. 511—530.)

Согласно современным взглядам масса m тела является однозначно неизменной физической характеристикой тела, не зависящей от скорости тела, определяющей его инертные и гравитационные свойства и энергию покоя. Такое представление о массе тела оказывается возможным, если в качестве основных соотношений для свободно движущегося тела принять уравнения

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4, \qquad (4)$$

$$p = \frac{vE}{c^2}, \qquad (5)$$

где E — энергия; p — импульс; m — масса; v — скорость тела. Из формулы (5) для случая $v = c$ следует:

$$pc = E, \qquad (6)$$

а из формул (6) и (4) следует, что масса m тела, движущегося со скоростью света, обязательно равна нулю. Подставив формулу (5) в формулу (4), получим соотношение, выражающее зависимость полной энергии E от массы m и скорости v тела:

$$E^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = m^2c^2,$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2\gamma. \qquad (7)$$

Из формул (5) и (7) следует зависимость релятивистского импульса от скорости тела:

$$\vec{p} = m\vec{v}\gamma. \qquad (8)$$

Коэффициент $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ выражает зависимость полной энергии E и релятивистского импульса p от скорости v его движения. Масса m тела при любой скорости его движения в любой системе отсчёта остаётся неизменной, инвариантной.

Таким образом, адекватное описание фундаментальных физических свойств тел материального мира допускает возможность различного определения понятий массы, импульса и энергии тела. Если массу m тела определить как величину, не зависящую от скорости, то импульсом p тела следует считать в этом случае не произведение mv, а величину $p = mv\gamma$, зависящую от скорости v. Такое определение релятивистского импульса необходимо, поскольку понятие импульса было введено в физике как понятие величины, сохраняющейся в изолированной системе. Эксперименты показали, что в любой изолированной системе при любых скоростях движения тел и любых взаимодействиях сохраняющейся величиной является величина $p = \sum m_i v_i \gamma$, а не величина $p = \sum m_i v_i$.

Если же импульс p определить как произведение массы m тела на его скорость v, как это делается в классической физике, то импульс в изолированной системе оказывается сохраняющейся величиной лишь в том случае, если массу m тела считать изменяющейся со скоростью v:

$$m = m_0\gamma,$$

где m_0 — масса покоя.

Предпочтительность выбора системы основных физических понятий с использованием понятия постоянной массы те-

ла подробно и убедительно аргументирована в упомянутой выше статье Л. Б. Окуня.

Рассмотрим возможные методические пути введения понятий массы в школьном курсе физики. Рассматривая массу тела как постоянную характеристику инертных и гравитационных свойств и меру его энергии покоя, можно в принципе для определения массы выбрать любое из трёх соотношений (1), (2) или (3). В первом и втором случаях для вычисления массы нужно определить понятие силы, в третьем случае нужно предварительно определить понятие энергии.

Реальный путь определения понятия энергии до определения понятия массы трудно себе представить, поэтому остаётся сделать выбор между соотношениями (1) и (2). Нужно при этом ясно осознавать, что логически безупречное определение всех научных понятий в принципе невозможно, так как каждое новое понятие определяется через какие-то другие, ранее введённые понятия. Наибольшие логические трудности возникают при введении самых первых, основных физических понятий, к числу которых как раз и относится понятие массы.

Ввести понятие массы через соотношение (1) с использованием понятия силы в явном виде нельзя, так как при этом образуется порочный логический круг типа «Массой в 1 кг называется масса такого тела, которому сила 1 Н сообщает ускорение 1 м/с^2» и «Силой в 1 Н называется такая сила, под действием которой тело массой 1 кг движется с ускорением 1 м/с^2». Разорвать порочный логический круг удаётся определением единицы массы, не связанным явным образом ни с одним из трёх соотношений (1), (2) и (3): «Килограмм равен массе международного прототипа килограмма».

Далее предполагается, что масса n тел по 1 кг каждое равна n кг, а масса $1/n$-й доли тела массой 1 кг равна $1/n$ кг. После этого для измерения массы любого тела необходимо выбрать способ экспериментального сравнения масс двух тел. На практике одним из наиболее точных способов сравнения масс является способ с применением равноплечих весов. Масса тела равна 1 кг, если это тело, помещённое на одну чашу равноплечих весов, уравновешивается эталоном килограмма, помещённым на другую чашу.

Изготовив два тела массой по 1 кг каждое, мы можем изготовить гирю массой 2 кг; разделив тело массой 1 кг на две равные части и сравнив их массы с помощью весов, мы можем изготовить гирю массой 0,5 кг. Продолжая поступать аналогичным образом, можно изготовить комплект гирь с различными массами, затем с помощью весов и гирь определять массу любого тела. Далее можно произвести с помощью гирь калибровку пружинных весов и измерять массу с их помощью. При таком способе измерения масс в неявном виде используется соотношение (2), согласно которому на тела равной массы со стороны Земли действуют одинаковые силы, и условие равновесия рычага.

Следует заметить, что при таком способе измерения массы, строго говоря, не остаётся оснований для утверждений типа «Опыт показывает, что сила притяжения различных тел к Земле прямо пропорциональна их массе». Для экспериментального установления зависимости силы тяготения от массы тела массу тела необходимо определять, используя соотношение (1) или (2).

Задача 7.1. Решение.
$a_1 = 0{,}27$ см/с^2 $= 0{,}0027$ м/с^2,
$m_1 = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг,
$m_2 = 6 \cdot 10^{24}$ кг.

Используем связь масс Луны и Земли с испытываемыми ими ускорениями:

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

$$a_2 \approx 0{,}0027 \cdot \frac{7{,}35 \cdot 10^{22}}{6 \cdot 10^{24}}\ \text{м/с}^2 \approx$$
$$\approx 0{,}000033\ \text{м/с}^2.$$

Задача 7.2. Решение.
$m_1 = 200$ кг,
$m_2 = 100$ кг,
$a_2 = 0{,}2$ м/с^2.

Используем связь масс взаимодействующих лодок с испытываемыми ими ускорениями:

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

$$a_1 = 0{,}2 \cdot \frac{100}{200}\ \text{м/с}^2 = 0{,}1\ \text{м/с}^2.$$

Задача 7.3. Решение.
$s = 415$ мм $= 0{,}415$ м,

$v_1 = 715$ м/с,
$m_1 = 7{,}9$ г $= 0{,}0079$ кг,
$m_2 = 3{,}8$ кг.

Найдём ускорение a_1 пули:

$$s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{a_1 t_1 t_1}{2} = \frac{v_1 t_1}{2},\ t_1 = \frac{2s_1}{v_1},$$

$$t_1 = \frac{2 \cdot 0{,}415}{715}\ \text{с} \approx 0{,}00116\ \text{с},$$

$$a_1 = \frac{v_1}{t_1},\ a_1 = \frac{715}{0{,}00116} \approx 616\,000\ \text{м/с}^2.$$

Вычислим ускорение автомата a_2:

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

$$a_2 \approx 616\,000 \cdot \frac{0{,}0079}{3{,}8}\ \text{м/с}^2 \approx 1264\ \text{м/с}^2.$$

Вычислим скорость автомата v_2 после выстрела:

$$v_2 = a_2 \cdot t_2,\ t_1 = t_2,\ v_2 = a_2 \cdot t_1,$$

$$v_2 \approx 1264 \cdot 0{,}00116 \approx 1{,}5\ \text{м/с}.$$

§ 8. Второй закон Ньютона

Сила. Определение понятия массы на основе сравнения ускорений тел при их взаимодействиях даёт возможность ввести понятие силы и выбрать способ её измерения.

В основе введения понятия силы лежит установленный опытами факт, что при любых взаимодействиях двух тел произведение массы m_1 одного тела на его ускорение a_1 всегда равно по модулю и противоположно по направлению произведению массы m_2 другого тела на его ускорение a_2:

$$m_1 a_1 = m_2 a_2.$$

На этом основании целесообразно в качестве количественной меры взаимодействия тел выбрать произведение массы m тела на его ускорение $\vec{a}$. Эту физическую величину $\vec{F}$ назвали силой:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \qquad (1)$$

Поскольку единицы массы и ускорения были уже выбраны ранее, единица силы определяется через них на основании соотношения (1) и имеет собственное название — ньютон.

Второй закон Ньютона. Соотношение (1), как и при любом другом эквивалентном способе выбора определения понятий массы и силы, остается выражением второго закона Ньютона. Однако поскольку в данном случае силой $\vec{F}$ мы назвали произведение массы m тела на его ускорение a, то говорить об экспериментальном установлении зависимости ускорения тела от действующей на него силы F и массы m нет логических оснований. Необходимо осознать, что при таком определении понятий массы и силы второй закон Ньютона оказывается «израсходованным» на определение понятия силы.

Строго говоря, второй закон Ньютона без логических погрешностей в данном случае можно сформулировать следующим образом: ускорение тела прямо пропорционально действующей на него силе F и обратно пропорционально массе m тела. Это следует из принятого определения (1) понятия силы.

Второй закон Ньютона может выступать в качестве экспериментально установленного закона в том случае, если понятия массы и силы определяются независимо одно от другого. Например, если понятие силы определить на основании закона Гука и подобно эталону килограмма иметь эталонный пружинный динамометр, с которым сравнивались бы все другие динамометры. Такой путь вполне технически осуществим, но при этом было бы без необходимости увеличено количество основных физических величин и существенно снижена достигаемая точность всех физических измерений, так как невозможно изготовить точно одинаковые пружинные динамометры, дающие одинаковые показания длительное время.

Все эти логические трудности при определении понятий массы и силы обсуждаются здесь не для того, чтобы объяснять их учащимся 9 класса, и тем более не для того, чтобы требовать ответа на эти сложные вопросы от всех учащихся. Понимание этих трудностей необходимо учителю для готовности к возможным вопросам думающих учащихся, способных обнаруживать логические трудности в системах взаимных связей между понятиями.

Задача 8.1. Решение.
$m = 8$ г $= 0{,}008$ кг,
$a = 600\ 000$ м/с^2.
По второму закону Ньютона сила равна:

$$F = ma,$$

$$F = 0{,}008 \text{ кг} \cdot 600\ 000 \text{ м/с}^2 = 4800 \text{ Н}.$$

Задача 8.2. Решение.
$\mu = 0{,}5$.
Сила трения $F_{тр}$ равна:

$$F_{тр} = \mu mg.$$

По второму закону Ньютона:

$$F_{тр} = ma,\ a = \frac{F_{тр}}{m} = \frac{\mu N}{m} = \frac{\mu mg}{m} = \mu g,$$

$$a \approx 0{,}5 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \approx 5 \text{ м/с}^2.$$

Задача 8.3. Решение.
$a = 2$ м/с^2,
$F = 10$ Н.
По второму закону Ньютона:

$$F = ma,\ m = \frac{F}{a},\ m = \frac{10 \text{ Н}}{2 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ кг}.$$

Задача 8.4. Решение.
$m = 5$ кг,
$F = 100$ Н,
$F_т = mg$,
$a \rightleftarrows g$.
Для решения задачи сначала найдём модуль равнодействующей $\vec{F}_р$ двух противоположно направленных векторов сил $\vec{F}$ и $\vec{F}_т$:

$$\vec{F}_р = \vec{F} + \vec{F}_т,\ F_р = F - F_т.$$

Ускорение найдём по второму закону Ньютона:

$$F_р = ma,$$

$$a = \frac{F_р}{m} = \frac{F - F_т}{m} = \frac{F - mg}{m} = \frac{F}{m} - g,$$

$$a \approx \frac{100 \text{ Н}}{5 \text{ кг}} - 9{,}8 \text{ м/с}^2 \approx 10{,}2 \text{ м/с}^2.$$

Задача 8.5. Решение.

$$F_р = ma,$$

$$a = \frac{F_р}{m} = \frac{F + F_т}{m} = \frac{F + mg}{m} = \frac{F}{m} + g,$$

$$a \approx \frac{100 \text{ Н}}{5 \text{ кг}} + 9{,}8 \text{ м/с}^2 \approx 29{,}8 \text{ м/с}^2.$$

Задача 8.6. Решение.
$F = 2500$ Н,
$F_т = mg$,
$a = 40$ м/с^2,
$a \rightleftarrows g$.
Для решения задачи сначала найдём модуль равнодействующей $\vec{F}_р$ двух противоположно направленных векторов сил $\vec{F}$ и $\vec{F}_т$:

$$\vec{F}_р = \vec{F} + \vec{F}_т,\ F_р = F - F_т.$$

Массу ракеты найдём по второму закону Ньютона:

$$F_р = F - F_т = F - mg = ma,$$
$$F = m\ (g + a),$$

$$m = \frac{F}{g + a},\ m \approx \frac{2500 \text{ Н}}{10 \text{ м/с}^2 + 40 \text{ м/с}^2} \approx 50 \text{ кг}.$$

Задача 8.7. Решение.
$F = 900$ Н,
$F_с = 500$ Н,
$m = 100$ кг.
Для решения задачи сначала найдём модуль равнодействующей $\vec{F}_р$ двух противоположно направленных векторов сил $\vec{F}$ и $\vec{F}_с$:

$$\vec{F}_р = \vec{F} + \vec{F}_с,\ F_р = F - F_с.$$

Ускорение найдём по второму закону Ньютона:

$$F_р = F - F_с = ma,\ a = \frac{F - F_с}{m},$$

$$a = \frac{900 \text{ Н} - 500 \text{ Н}}{100 \text{ кг}} = 4 \text{ м/с}^2.$$

Дополнительные задачи

Задача 8.8. Книга массой 2 кг на горизонтальном столе движется равномерно и прямолинейно под действием силы 10 Н, направленной параллельно плоскости стола. Определите коэффициент трения.

Решение. Так как книга движется равномерно, приложенная сила равна силе трения:

$$F = F_{тр} = \mu N = \mu mg.$$

Коэффициент трения равен $\mu = \frac{F}{mg} = \frac{10 \text{ Н}}{2 \cdot 9{,}8 \text{ Н}} \approx 0{,}5$.

Задача 8.9. Стол массой 20 кг стоит на горизонтальном полу. Коэффициент трения равен 0,6. Чему равна сила трения между полом и столом при действии на стол силы 100 Н, направленной горизонтально? Каким будет значение силы трения при действии на стол горизонтально направленной силы 200 Н?

Решение. Максимальное значение силы трения покоя равно:

$$F_{\text{тр. max}} = \mu N = \mu mg =$$
$$= 0{,}6 \cdot 20 \cdot 9{,}8 \text{ Н} \approx 120 \text{ Н}.$$

Приложенная в первом случае сила 100 Н меньше максимального значения силы трения покоя, поэтому стол не будет двигаться. Модуль силы трения покоя равен модулю приложенной силы, сила трения покоя равна 100 Н.

При действии силы 200 Н действующая сила больше максимального значения силы трения покоя. Стол будет скользить, сила трения скольжения равна:

$$F_{\text{тр. ск}} = \mu N = \mu mg =$$
$$= 0{,}6 \cdot 20 \cdot 9{,}8 \text{ Н} \approx 120 \text{ Н}.$$

Задача 8.10. Для равномерного движения санок массой 2 кг по снегу необходимо приложить горизонтально направленную силу 5 Н. Какую силу необходимо будет приложить для равномерного перемещения санок с ребёнком, масса которого 18 кг?

Решение. Для равномерного перемещения санок необходимо приложить к ним силу, равную силе трения скольжения:

$$F = F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg.$$

Сила трения прямо пропорциональна силе нормального давления, поэтому сила трения во втором случае увеличится. Для вычисления силы трения во втором случае найдём значение коэффициента трения по данным задачи для первого случая:

$$F_{\text{тр1}} = \mu m_1 g, \ \mu = \frac{F_{\text{тр1}}}{m_1 g}.$$

Во втором случае масса m равна сумме массы m_1 санок и массы m_2 ребёнка:

$$m = m_1 + m_2.$$

Подставляем полученные выражения для коэффициента трения и массы в первую формулу и вычисляем значение силы:

$$F = \mu mg = \frac{F_{\text{тр1}}}{m_1 g}(m_1 + m_2)\, g = \frac{F_{\text{тр1}}}{m_1}(m_1 + m_2),$$

$$F = \frac{5}{2}(2 + 18) \text{ Н} = 50 \text{ Н}.$$

Задача 8.11. Лыжник после скатывания с горы на горизонтальном участке пути двигался по инерции и под действием постоянной силы трения уменьшил свою скорость от 10 м/с до 0 за 10 с. Определите коэффициент трения скольжения лыж о снег.

Решение. Равноускоренное движение лыжника происходило под действием силы трения скольжения:

$$F = F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg.$$

Ускорение движения лыжника можно найти на основании второго закона Ньютона или по известным значениям начальной и конечной скоростей и времени движения:

$$\mu mg = ma, \ a = \frac{\mu mg}{m} = \mu g, \ a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v - v_0}{t}.$$

Отсюда находим коэффициент трения:

$$\mu = \frac{v - v_0}{tg}, \ \mu \approx \frac{10}{10 \cdot 10} \approx 0{,}1.$$

Задача 8.12. Аэростат, общая масса которого $m_1 = 1000$ кг, опускался со скоростью v равномерно вниз. После сбрасывания груза массой 50 кг он завис неподвижно. Найдите массу груза, после сбрасывания которого аэростат станет подниматься со скоростью v. Ускорение свободного падения считать равным 10 м/с^2.

Решение. При равномерном движении аэростата вниз выполняется условие:

$$m_1\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_1 = 0, \ m_1 g - F_A - F_1 = 0, \quad (1)$$

где $\vec{F}_A$ — сила Архимеда; $\vec{F}_1$ — сила сопротивления воздуха.

При массе $m_2 = 950$ кг аэростат неподвижен, $\vec{F}_1 = 0$, сила Архимеда равна весу аэростата:

$$F_{\text{А}} = m_2 g = 9500 \text{ Н}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что

$$F_1 = m_1 g - F_{\text{А}} =$$
$$= 10\,000 \text{ Н} - 9500 \text{ Н} = 500 \text{ Н}.$$

При равномерном движении аэростата вверх выполняется условие:

$$m_3\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_1 = 0, \ F_{\text{А}} - m_3 g - F_2 = 0. \quad (3)$$

Сила F_2 сопротивления воздуха при подъёме равна силе F_1 сопротивления воздуха при спуске. Отсюда находим массу m_3 аэростата:

$$m_3 = \frac{F_A - F_2}{g} = \frac{9500 - 500}{10} \text{ кг} = 900 \text{ кг}.$$

Теперь найдём массу сброшенного груза:

$$\Delta m = m_2 - m_3 = 950 \text{ кг} - 900 \text{ кг} = 50 \text{ кг}.$$

Инерциальные системы отсчёта. Введение понятий об инерциальных и неинерциальных системах отсчёта программой по физике для основной школы не предусмотрено. Однако предварительное ознакомление учащихся с этими понятиями без обязательного контроля их усвоения может быть полезным по той причине, что важно не только знать основные законы физики, но и понимать, что любые законы имеют определённые границы применимости, выполняются только при определённых условиях. В частности, второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчёта. Поэтому необходимо хотя бы предварительное ознакомление школьников с понятием «инерциальная система отсчёта».

Это понятие может показаться учащимся очень простым. Действительно, инерциальной системой отсчёта называется такая система, в которой тело, не подверженное внешним воздействиям, находится в покое или движется равномерно и прямолинейно.

По признаку противоположности определяется неинерциальная система отсчёта как система отсчёта, в которой тело, не подверженное внешним воздействиям, движется с ускорением. Что же тут сложного?

Сложность заключается не в определении этих понятий, а в том, чтобы указать реальный пример инерциальной системы отсчёта.

Для того чтобы узнать, является ли данная системы отсчёта инерциальной системой, надо экспериментально проверить, выполняется ли в ней первый закон Ньютона, если на тело не действуют другие тела. Но как убедиться в отсутствии действия других тел? Устранить на опыте действия всех тел Вселенной мы также не можем.

Таким образом, первый закон Ньютона — это постулат, сформулированный на основе обобщения человеческого опыта. Инерциальная система отсчёта является идеализированной моделью, необходимой для формулировки законов Ньютона.

Опытным путём можно только установить, какие из реальных систем отсчёта ближе к инерциальным. С этой целью нужно выяснить, в каких системах точнее выполняются все три закона Ньютона.

Например, если принять Землю за тело отсчёта, то в системе отсчёта, связанной с Землёй, все звёзды, Солнце и планеты совершают суточное движение, движутся по окружностям с громадными центростремительными ускорениями. Вычислим центростремительное ускорение ближайшей к Солнечной системе звезды α Центавра. Если бы эта звезда, находящаяся на расстоянии $3{,}9 \cdot 10^{16}$ м от Земли, действительно обращалась вокруг Земли за одни сутки, то её центростремительное ускорение было бы равно:

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

$$a = \frac{4 \cdot 9{,}89 \cdot 3{,}9 \cdot 10^{16}}{(24 \cdot 3600)^2}\ \text{м/с}^2 \approx 2 \cdot 10^8\ \text{м/с}^2.$$

Для создания такого ускорения, в 20 млн раз большего ускорения свободного падения у поверхности Земли, со стороны Земли на звезду должна действовать сила притяжения, в 20 млн раз большая силы земного тяготения у поверхности Земли!

Сила всемирного тяготения не может объяснить возникновение центростремительных ускорений звёзд и Солнца, так как силы притяжения со стороны Земли на громадных расстояниях очень малы. Таким образом, в системе отсчёта, связанной с Землёй, первый и второй законы Ньютона не выполняются, эта система отсчёта является неинерциальной. Неинерциальность этой системы отсчёта объясняется суточным вращением Земли вокруг своей оси.

Однако при решении многих практических задач, связанных с рассмотрением движения и взаимодействий тел на небольших расстояниях от поверхности Земли, систему отсчёта, связанную с Землёй, считают инерциальной, так как её неинерциальностью в условиях этих задач можно пренебречь.

В гелиоцентрической системе отсчёта, связанной с Солнцем, звёзды движутся с ничтожно малыми ускорениями. Первый закон Ньютона выполняется в этой системе отсчёта с большей точностью, и её можно считать инерциальной системой отсчёта.

Силы инерции. В инерциальных системах отсчёта согласно ньютоновской

механике ускорение движения тела происходит в результате его взаимодействия с другими телами, в результате действия сил. В неинерциальных системах отсчёта наблюдается ускоренное движение тел без действия на них других тел и законы Ньютона не выполняются.

Движение тел в неинерциальных системах отсчёта можно описывать таким образом, как будто и в этих системах отсчёта выполняется второй закон Ньютона, если формально считать, что в них существуют силы инерции, не связанные с взаимодействием со стороны конкретных тел, а вызванные ускоренным движением самой системы отсчёта. Чтобы получить выражение для вычисления силы инерции, надо ускорение $\vec{a}$ движения системы отсчёта взять с противоположным знаком и умножить на массу тела:

$$\vec{F}_и = -\vec{a}m.$$

Введение сил инерции даёт формальную возможность не отказываться от второго закона Ньютона и в неинерциальных системах отсчёта. Для этого при нахождении суммы действующих на тело сил, кроме реальных сил, обусловленных взаимодействием тел, вводятся формально силы инерции.

Например, при рассмотрении движения тел относительно поверхности Земли необходимо учитывать её вращение вокруг своей оси. Точка на поверхности Земли имеет центростремительное ускорение $a = \omega^2 r$, где r — расстояние от данной точки до оси вращения; ω — угловая скорость вращения. Следовательно, Земля является неинерциальной системой отсчёта, и только малое значение центростремительного ускорения ($a_{цс} = 0{,}034$ м/с^2) по сравнению с ускорением свободного падения на Земле позволяет при решении ряда задач считать Землю инерциальной системой отсчёта.

Однако при объяснении, например, зависимости веса тела от географической широты места наблюдения неинерциальностью системы отсчёта, связанной с Землёй, пренебречь нельзя. Если бы Земля не вращалась, то вес тела $\vec{P}$ был бы равен по модулю силе тяжести $\vec{F}_т$. В системе отсчёта, связанной с вращающейся Землёй, любое тело движется так, как будто бы на него, кроме силы тяжести, действует ещё центробежная сила инерции $\vec{F}_и$, направленная по радиусу окружности от её центра. Модуль этой силы равен:

$$F_и = m\omega^2 r.$$

Равнодействующая сил $\vec{F}_т$ и $\vec{F}_и$ равна по модулю весу $\vec{P}$ тела.

Измеряя действие тела на опору или подвес на различных широтах Земли, получают различные значения. Заметим, что эта разница невелика. На экваторе она равна 0,34%.

Дополнительная задача

Задача 8.13. Платформа самосвала наклонена под углом $\alpha = 30°$ к горизонтальной плоскости, коэффициент трения щебня по поверхности платформы $\mu = 0{,}7$. Какое ускорение необходимо придать самосвалу для того, чтобы щебень соскользнул с его платформы?

Решение. Для решения задачи нужно найти максимальное значение ускорения груза на платформе самосвала, которое он может приобрести при горизонтальном движении самосвала вперёд.

На груз действуют три силы — сила тяжести $m\vec{g}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$ (рис. 22). При горизонтальном движении самосвала вперёд с ускорением $\vec{a}$ относительно Земли в неинерциальной системе отсчёта, связанной с самосвалом, второй закон Ньютона можно применить, если в дополнение к реально действующим силам ввести силу инерции $\vec{F}_и = -m\vec{a}$, действующую на груз в системе отсчёта самосвала.

Ось OX направим параллельно плоскости платформы по вектору силы тре-

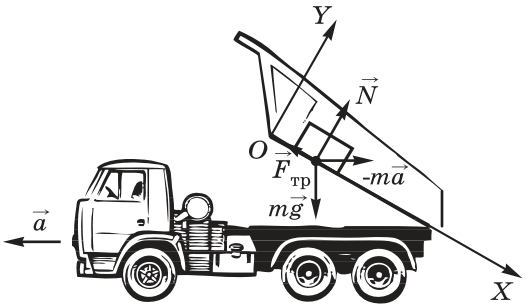

Рис. 22

ния $F_{тр}$, ось OY — перпендикулярно плоскости платформы. Для проекций всех сил на эти оси условия равновесия груза на платформе имеют вид

$$F_{тр\,y} + mg_y + N_y + ma_y = 0,$$
$$F_{тр\,x} + mg_x + N_x + ma_x = 0.$$

Выразим значения проекций сил, используя начальные условия:

$$0 - mg\cos\alpha + N + ma\sin\alpha = 0,$$
$$\mu N - mg\sin\alpha - 0 - ma\cos\alpha = 0.$$

Решаем систему уравнений:

$$N = mg\cos\alpha - ma\sin\alpha,$$
$$\mu mg\cos\alpha - \mu ma\sin\alpha - mg\sin\alpha - ma\cos\alpha = 0,$$
$$a = \frac{g(\mu\cos\alpha - \sin\alpha)}{\mu\sin\alpha + \cos\alpha},$$
$$a \approx \frac{10\,(0{,}7\cdot 0{,}866 - 0{,}5)}{0{,}7\cdot 0{,}5 + 0{,}866}\ \text{м/с}^2 \approx \frac{1{,}06}{1{,}216}\ \text{м/с}^2 \approx 0{,}87\ \text{м/с}^2.$$

§ 9. Сложение сил

Способ нахождения равнодействующей двух произвольно направленных векторов сил, приложенных к одной точке тела, в 7 классе излагался как дополнительный материал, необязательный для изучения всеми учащимися. В 9 классе эта тема является обязательной для изучения. Ответ на вопрос о результате действия двух сил, приложенных к одной точке тела, при любых направлениях векторов сил учащиеся должны найти самостоятельно из опыта при выполнении экспериментального задания 9.1.

Второй закон Ньютона при действии на тело нескольких сил. В случае действия на тело нескольких сил ускорение $\vec{a}$ тела прямо пропорционально равнодействующей $\vec{F}_р$ всех сил и обратно пропорционально массе m тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_р}{m}.$$

Равнодействующая всех приложенных к телу сил находится сложением векторов по правилу параллелограмма. Во многих случаях задача нахождения равнодействующей оказывается разрешимой, когда известны только направление и модуль одной из двух действующих на тело сил, направление вектора второй силы и направление вектора равнодействующей.

Решение задачи динамики следует начинать с анализа условий задачи с целью выбора инерциальной системы отсчёта, наиболее удобной для решения конкретной задачи. Далее выполняют схематический рисунок, изображающий расположение тел в данный момент времени. На рисунке указывают направления векторов сил, действующих на тела, направления скоростей и ускорений. Если в условиях задачи тело можно считать материальной точкой, силы, действующие на тело, следует прикладывать к одной точке.

Задача 9.1. Решение. На рисунке 9.4 учебника два вектора сил $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$ параллельны, третий вектор $\vec{F}_1$ направлен противоположно им. Обсудим три возможных варианта.

Может ли вектор $\vec{F}_1$ быть равнодействующей векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$? Отрицательный ответ очевиден, так как направление вектора $\vec{F}_1$ противоположно направлению векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$.

Может ли вектор $\vec{F}_3$ быть равнодействующей векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$? Направления векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$ противоположны, модуль их суммы равен разности модулей этих векторов. Поэтому модуль равнодействующей векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$ должен быть меньше модуля любого из них, но модуль вектора $\vec{F}_3$ больше модулей векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$. Отсюда следует отрицательный ответ: вектор $\vec{F}_3$ не может быть равнодействующей векторов $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$.

Может ли вектор $\vec{F}_2$ быть равнодействующей векторов $\vec{F}_3$ и $\vec{F}_1$? Направления векторов $\vec{F}_3$ и $\vec{F}_1$ противоположны, модуль их суммы равен разности модулей этих векторов. Направление равнодействующей этих двух векторов должно совпадать с направлением век-

тора с большим модулем, т. е. с направлением вектора $\vec{F}_3$. Модуль вектора $\vec{F}_3$ больше модуля вектора $\vec{F}_1$. Отсюда следует вывод, что вектор $\vec{F}_2$ является равнодействующей векторов $\vec{F}_3$ и $\vec{F}_1$.

Задача 9.2. Решение. Представим вектор силы тяжести $\vec{F}$ как равнодействующую вектора $\vec{F}_1$, перпендикулярного наклонной плоскости, и вектора $\vec{F}_2$, параллельного наклонной плоскости. Модули этих векторов равны соответственно

$$F_1 = F\cos\alpha,\ F_2 = F\sin\alpha.$$

При увеличении угла наклона доски и одинаковом модуле вектора силы тяжести $\vec{F}$ модуль вектора $\vec{F}_1$ и равного ему модуля вектора силы нормального давления $\vec{N}$ убывает, следовательно, убывает и модуль максимального значения силы трения покоя $F_{\text{тр. max}} = \mu N$.

Модуль вектора силы $\vec{F}_2$ при увеличении угла наклона доски возрастает. Поэтому при достижении некоторого значения угла наклона модуль вектора силы $\vec{F}_2$ превышает максимальное значение силы трения покоя $F_{\text{тр. max}}$ и кирпич скользит вниз по доске.

Задача 9.3. Решение. Изобразим условно расположение векторов сил, действующих на сани (рис. 23).

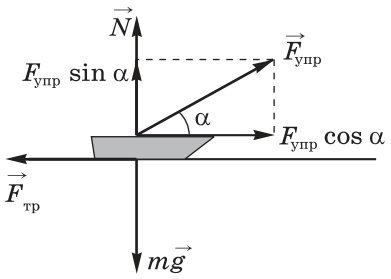

Рис. 23

Ускорение саней в горизонтальной плоскости определяется по второму закону Ньютона:

$$F_{\text{упр}}\cos\alpha - F_{\text{тр}} = ma,\ a = \frac{F_{\text{упр}}\cos\alpha - F_{\text{тр}}}{m}.$$

Силу трения найдём из уравнений:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,\ N = mg - F_{\text{упр}}\sin\alpha,$$
$$F_{\text{тр}} = \mu\,(mg - F_{\text{упр}}\sin\alpha).$$

$$a \approx \frac{100\cdot 0{,}5 - 0{,}12\cdot(30\cdot 10 - 100\cdot 0{,}87)}{30}\ \text{м/с}^2 \approx$$
$$\approx 0{,}81\ \text{м/с}^2.$$
$$s = \frac{at^2}{2},\ s = \frac{0{,}81\cdot 25}{2}\ \text{м} \approx 10\ \text{м}.$$

Задача 9.4. Решение. При движении бруска вверх по наклонной плоскости (рис. 24) модуль его ускорения определяется по второму закону Ньютона:

$$a_1 = \frac{F + F_{\text{тр}}}{m},$$

$$a_1 = \frac{mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha}{m} = g\,(\sin\alpha + \mu\cos\alpha).$$

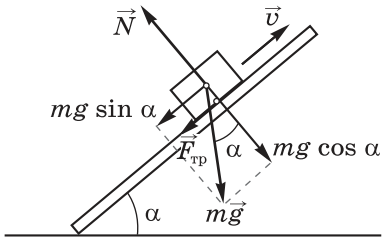

Рис. 24

Время t_1 движения бруска вверх до остановки равно $t_1 = \frac{v_0}{a_1}$, пройденный путь равен:

$$s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{a_1\frac{v_0^2}{a_1^2}}{2} = \frac{v_0^2}{2a_1}.$$

При движении бруска вниз по наклонной плоскости (рис. 25) модуль его ускорения равен:

$$a_2 = \frac{F - F_{\text{тр}}}{m} = \frac{mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha}{m},$$
$$a_2 = g\,(\sin\alpha - \mu\cos\alpha),$$

Время t_2 движения бруска вниз на такое же расстояние s_1 вычислим из уравнения

$$s_1 = \frac{a_2 t_2^2}{2},\ t_2 = \sqrt{\frac{2s_1}{a_2}} = \sqrt{\frac{2v_0^2}{2a_1a_2}} = \frac{v_0}{\sqrt{a_1a_2}}.$$

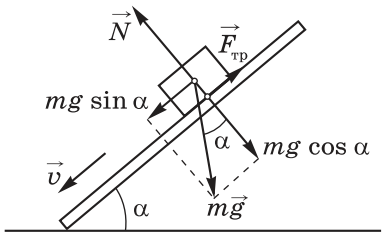

Рис. 25

Отношение времени t_1 движения бруска вверх до остановки к времени t_2 движения бруска вниз на такое же расстояние s_1 равно:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{v_0\sqrt{a_1 a_2}}{a_1 v_0} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)}{g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}} = \sqrt{\frac{\sin\alpha - \mu\cos\alpha}{\sin\alpha + \mu\cos\alpha}},$$

$$\frac{t_1}{t_2} \approx \sqrt{\frac{0{,}5 - 0{,}35\cdot 0{,}87}{0{,}5 + 0{,}35\cdot 0{,}87}} \approx 0{,}5.$$

Задача 9.5. Решение. На шар действует сила упругости $\vec{F}_{упр}$, направленная вдоль нити, и сила тяжести $\vec{F}_т$, направленная вертикально вниз. Так как шар равномерно вращается в горизонтальной плоскости по окружности, он движется с центростремительным ускорением, направленным к центру окружности в точке O. Следовательно, равнодействующая силы тяжести $\vec{F}_т$ и силы упругости $\vec{F}_{упр}$ направлена к центру окружности в горизонтальной плоскости (рис. 9.6 учебника). Из треугольника векторов сил и треугольника AOB находим

$$F = F_т \operatorname{tg}\alpha = mg\operatorname{tg}\alpha,$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{r}{h} = \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} = \frac{18}{24} = 0{,}75,$$

$$F = 0{,}05\cdot 10\cdot 0{,}75\ \text{Н} = 0{,}375\ \text{Н}.$$

§ 10. Третий закон Ньютона

Третий закон механики в курсе физики рассматривается как опытный факт, заключающийся в том, что при взаимодействии тел массами m_1 и m_2 их ускорения $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ всегда оказываются такими, что выполняется равенство

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2.$$

Так как по второму закону Ньютона

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

то следует равенство

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

Необходимо обратить внимание учащихся на такие принципиально важные особенности двух сил, возникающих по третьему закону Ньютона при взаимодействии тел, как их одинаковая физическая природа и действие на разные тела. По причине того, что силы, возникающие по третьему закону Ньютона, при взаимодействии двух тел действуют на разные тела, одна из этих сил не может уравновешивать действие другой силы, хотя эти силы равны по модулю и противоположны по направлению.

Задача 10.1. Решение. Если на мяч, лежащий на полу, действует сила гравитационного притяжения со стороны Земли, то по третьему закону Ньютона со стороны мяча действует на Землю равная по модулю и противоположно направленная сила гравитационного притяжения. Вектор этой силы направлен вертикально вверх.

Задача 10.2. Решение. Действие силы тяжести на человека, стоящего на земле, уравновешивается действием силы упругости со стороны поверхности, на которой стоит человек.

Задача 10.3. Решение. Действие Земли на Луну не уравновешивается действием какой-то другой силы. Поэтому Луна движется с ускорением, вектор ускорения направлен к центру Земли.

Задача 10.4. Решение. По третьему закону Ньютона при торможении автомобиль действует силой трения на поверхность Земли. В результате действия этой силы Земля закручивается в направлении движения автомобиля. Но обнаружить это вращение Земли невозможно из-за его ничтожной малости, так как масса Земли в тысячи миллиардов миллиардов раз больше массы автомобиля.

Задача 10.5. Решение. По третьему закону Ньютона на шары действуют равные по модулю силы упругости: $F_1 = F_2$.

Ускорения шаров по второму закону Ньютона равны:

$$a_1 = \frac{F_1}{m_1},\ a_2 = \frac{F_2}{m_2},\ a_1 m_1 = a_2 m_2.$$

Отсюда находим ускорение второго шара:

$$a_2 = a_1\frac{m_1}{m_2},\ a_2 = 1\,\frac{0{,}1}{0{,}2}\ \text{м/с}^2 = 0{,}5\ \text{м/с}^2.$$

Задача 10.6. Решение. При минимальном значении коэффициента тре-

ния μ между шинами и дорогой равнодействующая $\vec{F}$ силы трения $\vec{F}_{тр}$ и составляющей $\vec{F}_1$ силы тяжести, параллельной поверхности дороги, по второму закону Ньютона равна произведению массы автомобиля на ускорение его движения:

$$\vec{F} = \vec{F}_{тр} + \vec{F}_1 = m\vec{a},$$

$$F = F_{тр} - F_1 = \mu mg \cos\alpha - mg \sin\alpha = ma,$$

$$\mu = \frac{ma + mg \sin\alpha}{mg \cos\alpha} = \frac{a + g \sin\alpha}{g \cos\alpha},$$

$$\mu \approx \frac{1 + 10 \cdot 0{,}3}{10 \cdot 0{,}95} \approx 0{,}42.$$

Задача 10.7. Решение. Время t_2 равноускоренного движения шайбы вниз по наклонной плоскости из состояния покоя можно найти, если известны пройденный путь s и ускорение a_2 движения:

$$s = \frac{a_2 t_2^2}{2},\ t_2 = \sqrt{\frac{2s}{a_2}}. \qquad (1)$$

Пройденный путь по условию задачи известен. Как было найдено в примере решения задачи 1 в § 9 учебника, при движении тела вниз по наклонной плоскости под действием силы тяжести модуль его ускорения a_2 равен:

$$a_2 = g\,(\sin\alpha - \mu \cos\alpha). \qquad (2)$$

Мы получили, что для вычисления ускорения a_2 шайбы нужно знать коэффициент трения μ. Его можно найти по известным сведениям о равноускоренном движении шайбы вверх по склону. Как было найдено в примере решения задачи 1 в § 9, при движении вверх по наклонной плоскости модуль ускорения тела определяется по второму закону Ньютона:

$$a_1 = g\,(\sin\alpha + \mu \cos\alpha). \qquad (3)$$

Найдём ускорение a_1 по пройденному до остановки пути:

$$s = v_0 t_1 - \frac{a_1 t_1^2}{2} = a_1 t_1^2 - \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{a_1 t_1^2}{2},$$

$$a_1 = \frac{2s}{t_1^2},\ a_1 = \frac{11}{1}\ \text{м/с}^2 = 11\ \text{м/с}^2.$$

Из выражения (3) найдём коэффициент трения:

$$\mu = \frac{a_1 - g \sin\alpha}{g \cos\alpha},\ \mu = \frac{11 - 10 \cdot 0{,}8}{10 \cdot 0{,}6} = 0{,}5.$$

Из выражения (2) найдём ускорение при движении шайбы вниз:

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

Из выражения (1) найдём время движения шайбы вниз:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 5{,}5}{5}}\ \text{с} \approx 1{,}48\ \text{с}.$$

§ 11. Закон всемирного тяготения

При изучении этой темы нужно обратить внимание на четыре её важных элемента: история открытия закона всемирного тяготения, экспериментальные основания этого закона, границы применимости закона и его применение на практике при решении задач. Ознакомление с историей открытия закона всемирного тяготения имеет смысл в том случае, если оно будет представлено как пример, на котором можно познакомиться с общими закономерностями совершения научных открытий, необходимыми условиями для них и методами открытия чего-то, никому ранее не известного. Краткие сообщения на эту тему могут подготовить несколько учащихся по их выбору. Примерная возможная канва обсуждения истории открытия закона представлена в конце этого параграфа.

Особого пояснения заслуживает смысл эксперимента Кавендиша. Для лучшего понимания этого смысла учащимся предлагается выполнить очень простое экспериментальное задание 11.1 по измерению массы Земли. Этот эксперимент было бы невозможно выполнить, если бы не была экспериментально измерена гравитационная постоянная.

Задача 11.1. Решение. По закону всемирного тяготения сила гравитационного притяжения прямо пропорциональна массе тяготеющего тела и обратно пропорциональна квадрату расстояния от центра шарообразного однородного тела. Так как масса Луны примерно в 81 раз меньше массы Земли, сила её притяжения на одинаковом расстоянии в 81 раз меньше силы притяжения Земли, а из-за того, что радиус Луны примерно в 3,7 раза меньше радиуса Земли,

сила её притяжения в $(3,7)^2$ раза больше силы притяжения Земли:

$$F_Л = F_З \cdot \frac{(3,7)^2}{81} \approx 8100 \cdot \frac{13,7}{81}\ Н \approx 1370\ Н.$$

Задача 11.2. Решение. По закону всемирного тяготения сила гравитационного притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния от центра шарообразного однородного тела.

При расстоянии от поверхности Земли, равном двум радиусам Земли, расстояние от центра Земли становится равным трём радиусам Земли, т. е. увеличивается в 3 раза. Сила гравитационного притяжения, действующая на космическую станцию на таком расстоянии, убывает в $3^2 = 9$ раз и становится равной 400 Н.

Задача 11.3. Решение. У поверхности Земли на тело массой 1 кг действует сила земного притяжения, равная

$$F_1 = mg = 1\ кг \cdot 10\ м/с^2 = 10\ Н.$$

Уменьшение действующей на тело силы до 2,5 Н означает убывание её в 4 раза. По закону всемирного тяготения сила гравитационного притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния, следовательно, для убывания силы в 4 раза 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.

Задача 11.4. Решение задачи аналогично решению задачи 11.3.

Задача 11.5. Решение.

$r_1 = 2,5$ см $= 0,025$ м,

$r_2 = 10$ см $= 0,10$ м,

$R = 20$ см $= 0,20$ м,

$\rho = 11\ 350$ кг/м^3,

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

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

$$m_1 = \rho V_1 = \rho\frac{4}{3}\pi r_1^3,\ m_2 = \rho V_2 = \rho\frac{4}{3}\pi r_2^3,$$

$$F = G\frac{\rho\frac{4}{3}\pi r_1^3 \cdot \rho\frac{4}{3}\pi r_2^3}{R^2} = G\frac{16\pi^2\rho^2 r_1^3 \cdot r_2^3}{9R^2},$$

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \times$$

$$\times \frac{16 \cdot 9,87 \cdot 1,3 \cdot 10^8 \cdot 1,56 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 4 \cdot 10^{-2}}\ Н \approx$$

$$\approx 5,9 \cdot 10^{-8}\ Н.$$

Задача 11.6. Решение. По закону всемирного тяготения сила гравитационного притяжения прямо пропорциональна массе тяготеющего тела и обратно пропорциональна квадрату расстояния от центра шарообразного однородного тела. По такому же закону изменяется ускорение свободного падения у поверхности планеты. Увеличение радиуса планеты в 10 раз приводит к уменьшению ускорения свободного падения у поверхности планеты в 100 раз, а увеличение массы в 100 раз приводит к увеличению ускорения свободного падения в 100 раз. В результате ускорение свободного падения у поверхности планеты оказывается таким же, как у поверхности Земли.

Задача 11.7. Решение.

$m_1 = m_2 = 6 \cdot 10^9$ кг,

$R = 234$ м,

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

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11}\ \frac{6 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^9}{(234)^2}\ Н = 44 \cdot 10^3\ Н.$$

История открытия закона всемирного тяготения

Когда однажды, в думу погружён,
Увидел Ньютон яблока паденье,
Он вывел притяжения закон
Из этого простого наблюденья.

Дж. Байрон

На примере открытия закона всемирного тяготения можно убедиться, что простые однозначные ответы на вопрос об авторе того или иного замечательного открытия в большинстве случаев оказываются невозможными.

Согласно легенде, идея о существовании силы всемирного тяготения возникла у Ньютона в саду при наблюдении падения яблока на землю. Действительно ли с падения яблока началась история открытия великого закона?

На протяжении более двух тысячелетий одной из самых сложных проблем физиков и астрономов было объяснение сложных, периодически повторя-

ющихся движений планет. В системе мира Аристотеля причиной планетных движений назывался Перводвигатель, от которого через сферу звёзд вращательное движение передаётся планетным сферам. Перводвигателем Аристотель называл высшее бестелесное неподвижное начало, божественный созерцающий ум.

Галилей, открывший закон инерции, считал, что неограниченно долго в пустоте может происходить лишь равномерное прямолинейное движение по инерции. Для движения по окружности на тело должна действовать сила, направленная к центру окружности.

Иоганн Кеплер для объяснения движений планет выдвинул гипотезу о существовании сил притяжения между Солнцем и планетами. Он писал: «Гравитацию я определяю как силу, подобную магнетизму — взаимному притяжению. Сила тем больше, чем оба тела ближе друг к другу». На основе своей гипотезы Кеплер объяснил явление приливов, указав их причину в действии на Землю и воду в её морях сил гравитационного притяжения со стороны Луны.

Сравнивая силы гравитации и явление распространения света, Кеплер задался вопросом: не убывает ли гравитация обратно пропорционально квадрату расстояния? Но правильного ответа не нашёл. Кеплер считал, что только действием гравитационного притяжения со стороны Солнца нельзя объяснить планетные движения; на планеты должны ещё действовать силы, приводящие их в круговое движение. Источником таких сил он считал Солнце, вращающееся вокруг своей оси и вовлекающее в круговое движение все планеты.

Ответ на вопрос, как делаются научные открытия, очевиден: открытия делаются по-разному. И всё же, как можно открыть вдруг что-то, до сих пор никому не известное? Есть ли какой-то особый метод делать научные открытия или каждое открытие — дело счастливого случая?

Представление о возможности счастливого случая для совершения научного открытия очень распространено. Оно нашло своё отражение и в легенде о яблоке, случайно упавшем на голову Исаака Ньютона и заставившем его задуматься, как далеко простирается сила тяжести. Может быть, до самой Луны и заставляет её двигаться вокруг Земли?

Если и был такой случай, разве Ньютону первому упало яблоко на голову? Почему те, кому яблоко падало на голову раньше, не открыли закон всемирного тяготения? Разве Ньютон первый увидел радугу? Её видели все люди, жившие ранее, но никто из них не открыл явления разложения белого света в спектр, не объяснил происхождения радуги. Каков же рецепт научного открытия? Никакого верного рецепта для совершения открытий не существует, но примеры из истории научных открытий помогут понять, какими бывают пути к научному открытию.

Французский учёный Рене Декарт для объяснения планетных движений высказал гипотезу о существовании особого вида тончайшей материи, которую позднее стали называть мировым эфиром. Он считал, что Солнце и планеты вовлекаются во вращение вихревым движением этой материи.

В 1665 г. итальянский учёный Джованни Борелли, ученик Галилея, объяснил круговое движение спутников вокруг Юпитера тем, что в каждый момент движения действующая на спутник сила гравитационного притяжения уравновешивается центробежной силой.

В 1674 г. голландский учёный Христиан Гюйгенс вывел закон зависимости центростремительного ускорения при равномерном движении тела по окружности от скорости и радиуса окружности: $a = \frac{v^2}{R}$.

Таким образом, закон всемирного тяготения был почти открыт и некоторым учёным, например английскому учёному Роберту Гуку, казалось, что проблема причины движения планет уже решена.

Обдумывая, как центростремительная сила должна изменяться при движении планеты по круговой орбите, в 1684 г. английский астроном Эдмунд Галлей решил, что она должна уменьшаться пропорционально квадрату расстояния. О своём предположении он рассказал за чашкой кофе учёным Кристоферу Рену и Роберту Гуку. В ответ Гук сказал, что он давно уже открыл этот принцип. Действительно, ещё в 1674 г. им была представлена работа «Попытка доказать движение Земли посредством наблюдений», в которой

было сказано следующее: «Я изложу теперь систему мира, которая отличается во многих отношениях от до сих пор известных, но которая во всех отношениях согласуется с обычными законами механики. Она основана на трех предположениях. Первое заключается в том, что все без исключения небесные тела обладают способностью притяжения или тяжести, направленных к центрам, благодаря которым тела не только удерживают свои собственные части и препятствуют им улетучиваться в пространство, как это — мы видим — делает Земля, но, кроме того, они притягивают также все другие небесные тела, находящиеся в сфере их действия; следовательно, не только Солнце и Луна влияют на тело и движение Земли, и Земля на них, но также Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн значительно влияют своей притягательной силой на движение Земли точно так же, как Земля имеет значительное влияние на движение этих тел. Второе предположение заключается в том, что все тела, однажды приведённые в прямолинейное и равномерное движение, продолжают это движение по прямой линии до тех пор, пока какие-либо другие силы не отклонят и не обратят это движение в движение по кругу, эллипсу или другой более сложной кривой линии. Третье предположение в том, что притягательные способности проявляются с большей силой по мере того, как тела, на которые они действуют, приближаются к центру, откуда силы исходят. Каковы же последовательные степени возрастания сил на различных расстояниях, я ещё не проверил на опыте...»

Из этих слов видно, что в действительности Гук в решении проблемы планетных движений недалеко ушёл от Кеплера и Борелли. Он не установил закон убывания силы тяготения с расстоянием и не вывел законы Кеплера из факта убывания силы тяготения обратно пропорционально квадрату расстояния. Эти задачи удалось решить только великому английскому учёному Исааку Ньютону.

Существенную роль в том, что Ньютон начал заниматься разработкой проблемы сил тяготения, сыграл Галлей. После неудачного обращения к Гуку Галлей обратился с той же задачей к Ньютону. Ньютон ответил, что эту задачу он решил много лет назад, но решение нигде не опубликовал. В конце 1684 г. он послал Галлею обещанное доказательство. Галлей был так восхищён полученным решением, что стал уговаривать Ньютона непременно написать подробное изложение проблемы и опубликовать его. Под влиянием уговоров Галлея Ньютон приступил к работе и в декабре 1684 г. отправил первый трактат «О движении». Этот трактат был началом работы над основной книгой Ньютона «Математические начала натуральной философии».

О том, как он пришёл к решению задачи о всемирном тяготении, Ньютон оставил такие воспоминания: «В том же году я начал размышлять о действии тяжести, простирающейся до орбиты Луны, и, найдя, как вычислить силу, с которой тело, обращающееся внутри сферы, давит на поверхность этой сферы, я вывел из закона Кеплера, по которому периоды обращения планет находятся в полуторной пропорции с расстояниями их от центров орбит, что сила, удерживающая планеты в их орбитах, обратно пропорциональна квадратам их расстояний от центров обращений; при этом я сравнивал величину силы, потребной для удержания Луны на её орбите, с силой тяжести на поверхности Земли и нашёл между ними приблизительное равенство. Всё это имело место во время чумы 1665—1666 гг.: в это время я пережил лучшую пору своей юности и больше интересовался математикой и философией, чем когда бы то ни было впоследствии». Ньютону было тогда 22 года. Объяснение Ньютоном причины планетных движений было яркой демонстрацией возможностей новой механики.

На памятнике над могилой Ньютона во Вестминстерском аббатстве сделана надпись, заканчивающаяся словами: *«Радуйтесь, смертные, что на Земле существовало такое украшение рода человеческого!»*

Французский математик Ж. Лагранж сказал о Ньютоне: *«Ньютон — величайший из гениев и счастливейший из них, потому что система мира только одна и открыть её можно только однажды»*.

Когда Ньютона спросили, как он приходит к открытиям, он ответил:

«Я постоянно держу в уме предмет моего исследования и терпеливо жду, пока слабое утреннее мерцание постепенно и мало-помалу превращается в полный блестящий свет».

«Гений — это терпение мысли, сосредоточенной в известном направлении».

Свои открытия Ньютон оценивал исключительно скромно: *«Не знаю, каким я кажусь людям, но я себе представляюсь ребёнком, который играет на берегу моря и радуется, когда ему удаётся отыскать гладкий камушек или красивую раковину не совсем обыкновенного вида, в то время как неизмеримый океан истин лежит передо мною неисследованным».*

«Если я узрел больше других, то только потому, что стоял на плечах гигантов».

Эти высказывания должны помочь понять простую истину, что открыть что-то новое, никому не известное можно только на основе овладения всеми ранее добытыми знаниями, только терпеливым и настойчивым трудом.

§ 12. Движение тел под действием силы тяжести

Эта тема ориентирована на рассмотрение применений закона всемирного тяготения и законов динамики движения тел в различных областях науки и техники — от законов движения небесных тел до законов движения космических кораблей и искусственных спутников Земли. В ней рассматриваются также явления перегрузки и невесомости.

Для наглядного представления эллиптических траекторий движения небесных тел и космических аппаратов можно предложить учащимся простое экспериментальное задание на построение эллипса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Построение эллипса

Задание. Постройте эллипс с расстоянием между фокусами $c = 8$ см и большой полуосью $a = 5$ см.

Оборудование: тетрадь, две булавки или иголки, линейка, карандаш, нить.

Порядок выполнения задания

1. Откройте чистый лист тетради.

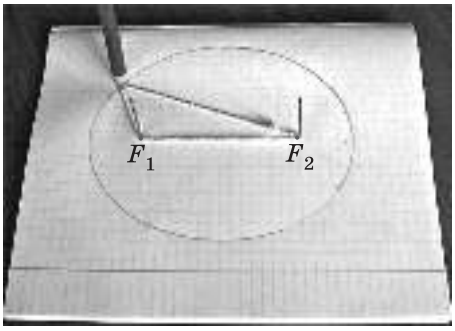

Рис. 26

Отметьте на листе две точки F_1 и F_2 на расстоянии 8 см. Воткните в эти точки булавки.

2. Рассчитайте, какой длины нить следует связать в виде петли для того, чтобы с помощью этой петли и двух булавок, воткнутых в лист бумаги и картон, можно было карандашом начертить заданный эллипс.

3. Изготовьте нитяную петлю и начертите заданный эллипс. Подсказкой может служить рисунок 26.

Задача 12.1. Решение. Сила всемирного тяготения является причиной возникновения центростремительного ускорения Деймоса при его обращении по орбите. Массу M планеты Марс можно найти по известным значениям скорости v движения Деймоса и радиусу r его орбиты на основании второго закона Ньютона:

$$F = ma,\ G\frac{mM}{r^2} = ma = m\frac{v^2}{r},\ M = \frac{rv^2}{G}.$$

Скорость v движения Деймоса по орбите можно найти по известному радиусу орбиты и его периоду обращения вокруг Марса: $v = \frac{2\pi r}{T}$.

Для вычисления массы Марса получаем формулу $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$,

$$M \approx \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot (2{,}346)^3 \cdot 10^{21}}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot (1{,}263 \cdot 24 \cdot 3600)^2}\ \text{кг} \approx$$

$$\approx 6{,}4 \cdot 10^{23}\ \text{кг}.$$

Задача 12.2. Решение. Сила всемирного тяготения является причиной возникновения центростремительного ускорения тела при его суточном вра-

щении вместе с Землёй. На экваторе направление вектора силы тяжести совпадает с направлением вектора центростремительного ускорения. Вес тела становится равным нулю при условии, что центростремительное ускорение тела равно ускорению свободного падения:

$$a = g,\ \frac{v^2}{R} = g,\ v = \frac{2\pi R}{T},$$

$$\frac{4\pi^2 R}{T^2} = g,\ T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}},$$

$$T \approx 2\pi\sqrt{\frac{6\ 400\ 000}{9{,}8}}\ \text{с} \approx 5{,}08 \cdot 10^3\ \text{с} \approx 1{,}41\ \text{ч}.$$

Задача 12.3. Решение. Так как ось вращения центрифуги расположена вертикально, центростремительное ускорение бельё приобретает под действием сил упругости со стороны вертикальных стенок центрифуги. На тело массой m при таком вращении действует сила упругости, равная

$$F = ma = m\frac{v^2}{R} = m\frac{\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R} = m\frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Бельё испытывает «перегрузку»:

$$\frac{F}{mg} = \frac{4\pi^2 R}{gT^2},\ \frac{F}{mg} = \frac{4\pi^2 \cdot 0{,}02}{9{,}8 \cdot (0{,}05)^2} \approx 322.$$

Задача 12.4. Решение. В нижней точке траектории векторы силы тяжести $m\vec{g}$ и силы упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, действующие на пилота, направлены противоположно. Вектор $\vec{F}$ их равнодействующей направлен к центру окружности, по которой движется самолёт, т. е. вертикально вверх (рис. 27). Геометрическая сумма векторов сил $m\vec{g}$ и $\vec{F}_{\text{упр}}$ равна вектору $\vec{F}$ равнодействующей силы: $\vec{F} = \vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g}$.

Так как векторы $m\vec{g}$ и $\vec{F}_{\text{упр}}$ направлены противоположно и вектор $\vec{F}$ сонаправлен с вектором $\vec{F}_{\text{упр}}$, значение равнодействующей F определяется уравнением

$$F = F_{\text{упр}} - mg,$$

а значение силы упругости $F_{\text{упр}}$ — силы реакции опоры — уравнением

$$F_{\text{упр}} = F + mg.$$

По третьему закону Ньютона вес P

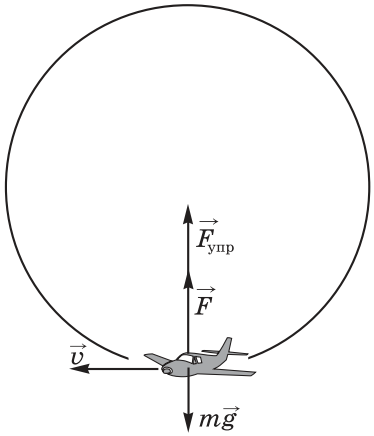

Рис. 27

пилота по модулю равен силе упругости $F_{\text{упр}}$:

$$P = F_{\text{упр}} = F + mg.$$

Перегрузка определяется отношением веса P к силе тяжести mg:

$$\frac{P}{mg} = \frac{F}{mg} + 1.$$

Значение равнодействующей силы F можно найти по второму закону Ньютона: $F = ma$, где a — центростремительное ускорение при движении по окружности:

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

Выполнив подстановки, получим выражение для нахождения перегрузки:

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

Подставив числовые значения $v = 360$ км/ч $= 100$ м/с, $g \approx 10$ м/с^2, получаем

$$\frac{P}{mg} = \frac{(100\ \text{м/с})^2}{250\ \text{м} \cdot 10\ \text{м/с}^2} + 1 = 5.$$

Вывод: пилот испытывает пятикратную перегрузку.

Дополнительная задача

Задача 12.5. Спортсмен толкнул ядро под углом 30° к горизонту со скоростью 16 м/с. Начальная точка траектории полёта ядра находилась на высоте 1,8 м от поверхности Земли. Определите дальность полёта ядра. Сопротивлением воздуха пренебречь. Ускорение свободного падения считать равным 10 м/с^2.

Решение. В качестве тела отсчёта примем Землю. Выберем систему координат таким образом, чтобы ось OY была направлена вертикально вверх, а ось OX расположим так, чтобы вектор скорости лежал в плоскости XOY. В этом случае движение происходит в указанной плоскости и для определения положения тела нужно знать две координаты. Точку бросания примем за начало отсчёта координат.

Определим начальные условия:

$x_0 = 0$,

$y_0 = 0$,

$y_1 = -1{,}8$ м,

$v_0 = 16$ м/с,

$\alpha = 30°$,

$v_{0x} = v_0 \cos\alpha$, $v_{0y} = v_0 \sin\alpha$.

За начало отсчёта времени примем момент бросания тела. Значения проекций ускорений на оси координат равны:

$$a_x = 0,\ a_y = -g.$$

Значения проекций скоростей в любой момент времени t равны:

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

Значения проекций перемещений на координатные оси в любой момент времени в данном случае равны координатам тела:

$$x = v_0 t \cos\alpha,\ y = v_0 t \sin\alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

По условию задачи известно значение координаты y в момент падения ядра: $y_1 = -1{,}8$ м. По известному значению координаты y_1 найдём время t_1 движения ядра. Для этого нужно решить квадратное уравнение

$$gt^2 - 2v_0 t \sin\alpha + 2y = 0,$$

$$t = \frac{2v_0 \sin\alpha \pm \sqrt{4v_0^2 \sin\alpha^2 - 8gy}}{2g} =$$

$$= \frac{v_0 \sin\alpha_0 \pm \sqrt{v_0^2 \sin\alpha^2 - 2gy}}{g}.$$

Подставив значения $v_0 = 16$ м/с, $\sin 30° = 0{,}5$, $g = 10$ м/с^2 и $y_1 = -1{,}8$ м, получаем

$$t_{1,2} = \frac{16 \cdot 0{,}5 \pm \sqrt{256 \cdot 0{,}25 - 2 \cdot 1{,}8 \cdot 10}}{10}\ \text{с} =$$

$$= \frac{8 \pm 10}{10}\ \text{с}.$$

Отбросив отрицательное значение времени как не соответствующее условию задачи, получаем время движения ядра: $t_1 = 1{,}8$ с. Подставив найденное значение времени t_1 движения ядра в уравнение, определяющее координату x как функцию времени t, найдём дальность полёта x_1 ядра:

$$x_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t_1,$$

$$x_1 = 16 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1{,}8\ (\text{м}) \approx 25\ \text{м}.$$

Тест 1

Физика и физические методы изучения природы. Законы механического движения

Часть 1

А1. Высказаны две гипотезы о природных явлениях. Первая объясняет известные явления природы и предсказывает явления, которые могут быть подтверждены или опровергнуты методами науки. Вторая объясняет известные явления природы и предсказывает явления, которые не могут быть подтверждены или опровергнуты методами науки. Какими являются эти гипотезы?

1) первая является научной гипотезой, вторая — метафизической гипотезой
2) первая является научной гипотезой, вторая — антинаучной гипотезой
3) обе являются метафизическими гипотезами
4) обе являются научными гипотезами

А2. Научным фактом в физике называется такое утверждение, которое может быть проверено и подтверждено экспериментально при выполнении заданных условий. Какие из приведённых ниже утверждений являются научными фактами?

А. Каждому человеку Богом дана бессмертная душа.

Б. Судьбу человека можно определить по его гороскопу.

В. Если чёрная кошка перебежала вам дорогу — это к беде.

Г. Сила тока на участке электрической цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению.

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

А3. Человек сначала прошёл расстояние 300 м по прямой в направлении на юг, затем повернул под углом 90° к первоначальному направлению движения и прошёл расстояние 400 м на восток. Чему равны пройденный путь и перемещение человека?

1) пройденный путь 700 м, перемещение 700 м
2) пройденный путь 700 м, перемещение 500 м
3) пройденный путь 500 м, перемещение 700 м
4) пройденный путь 500 м, перемещение 500 м

А4. При равноускоренном прямолинейном движении скорость тела за 2 с уменьшилась от 7 до 3 м/с. Чему был равен модуль ускорения тела?

1) 8 м/с^2 3) 2 м/с^2
2) 5 м/с^2 4) 0,5 м/с^2

А5. График зависимости модуля скорости прямолинейного движения тела от времени представлен на рисунке 28. Ускорение тела от момента времени $t = 4$ с до момента времени $t = 5$ с равно

1) 30 м/с^2 3) 6 м/с^2
2) 24 м/с^2 4) 0

А6. По графику зависимости модуля скорости прямолинейно движущегося тела от времени, представленному на рисунке 28, определите путь, пройденный телом от момента времени $t = 2$ с до момента времени $t = 5$ с.

1) 30 м 3) 16 м 5) 8 м
2) 21 м 4) 14 м

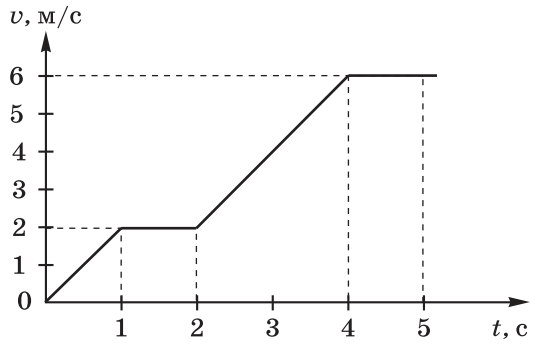

Рис. 28

А7. При прямолинейном движении пройденный телом путь s изменяется со временем t по закону $s = t + t^2$ (м). Скорость тела через 2 с после начала отсчёта времени при таком движении равна

1) 2 м/с 3) 4 м/с 5) 6 м/с
2) 3 м/с 4) 5 м/с

А8. При прямолинейном движении скорость тела изменяется со временем t по закону $\upsilon = 1 + 2t$ (м/с). Пройденный телом путь s через 2 с после начала отсчёта времени при таком движении равен

1) 5 м 3) 8 м 5) 18 м
2) 6 м 4) 10 м

А9. При равноускоренном прямолинейном движении скорость автомобиля уменьшилась за 10 с от 25 до 5 м/с. За это время автомобилем пройден путь

1) 350 м 3) 150 м
2) 300 м 4) 50 м

А10. При движении велосипедиста по окружности радиусом 50 м с постоянной по модулю скоростью 5 м/с ускорение его движения равно

1) 0 4) 2 м/с^2
2) 0,1 м/с^2 5) 10 м/с^2
3) 0,5 м/с^2

А11. Если шар, подвешенный на нити, движется с постоянной по модулю скоростью по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости, и вектор скорости направлен по касательной к этой окружности (стрелка *3* на рисунке 29), то

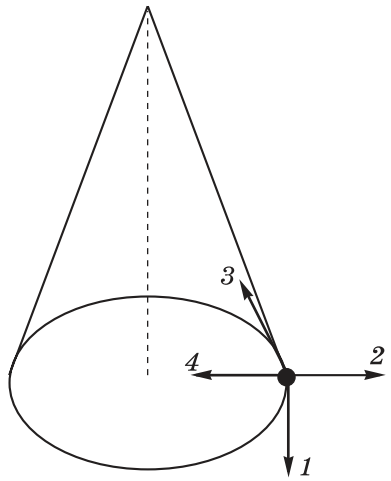

Рис. 29

1) ускорение шара равно нулю
2) вектор ускорения шара имеет направление, указанное стрелкой *1*
3) вектор ускорения шара имеет направление, указанное стрелкой *2*
4) вектор ускорения шара имеет направление, указанное стрелкой *3*
5) вектор ускорения шара имеет направление, указанное стрелкой *4*

Часть 2

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

В1. При торможении перед светофором автомобиль движется равноускоренно и прямолинейно. Чему равна скорость автомобиля через 3 с после начала торможения, если перед началом торможения его скорость была равна 25 м/с, а пройденный путь за 4 с равен 60 м? Ответ запишите числом (в м/с). [10]

В2. Брусок скользит по наклонной плоскости равноускоренно из состояния покоя. За вторую секунду движения он прошёл путь 30 см. Какой путь был пройден бруском за первую секунду движения? Ответ запишите числом (в м). [10]

В3. Спутник движется вокруг планеты по круговой орбите с постоянной по модулю скоростью 1 км/с, центростремительное ускорение спутника 0,0025 м/с^2. Чему было бы равно центростремительное ускорение спутника, если бы он двигался вокруг планеты по круговой орбите такого же радиуса со скоростью 10 км/с? Ответ запишите числом (в м/с^2). [0,25]

Глава 3

Законы сохранения

§ 13. Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса в механике может быть получен как следствие третьего закона Ньютона. При взаимодействии двух тел массами m_1 и m_2 между ними по третьему закону Ньютона действуют равные и противоположно направленные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Эти силы можно выразить через значения масс тел и их ускорения, а затем через изменение их скоростей:

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

$$m_1\frac{\Delta v_1}{\Delta t} = -m_2\frac{\Delta v_2}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Интервалы времени действия сил одинаковы, поэтому из уравнения (1) следует

$$m_1\Delta\vec{v}_1 + m_2\Delta\vec{v}_2 = 0. \qquad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что при взаимодействии двух тел сумма векторов изменений их импульсов равна нулю. Это означает, что сумма векторов импульсов при взаимодействии двух тел не изменяется. Обозначив скорости двух тел до взаимодействия $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ и их скорости после взаимодействия $\vec{v}'_1$ и $\vec{v}'_2$, получим выражение закона сохранения импульса:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2, \qquad (3)$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2. \qquad (4)$$

Этот вывод вполне доступен для учащихся общеобразовательной школы. Но он обладает одним существенным недостатком: один из наиболее общих законов природы — закон сохранения импульса — выводится в качестве следствия законов динамики Ньютона, имеющих более ограниченную область применимости. В ограниченности применимости этого вывода можно убедиться, попробовав решить задачу о столкновении фотона со свободным электроном. Известно, что гамма-кванты могут взаимодействовать со свободными электронами подобно сталкивающимся частицам в механике (эффект Комптона). Но фотоны движутся всегда с постоянной скоростью, они не испытывают ускорений при взаимодействиях, и уравнение (1) для этого случая неприменимо. Задача решается с использованием закона сохранения импульса в более общей форме (4).

Поэтому предпочтительным является такой способ изучения закона сохранения импульса, при котором этот закон рассматривается как фундаментальный закон природы, обнаруженный экспериментальным путём.

В учебнике описаны опыты по исследованию столкновений шаров, на основе которых можно сделать вывод, что при столкновениях сумма импульсов двух тел до взаимодействия равна сумме их импульсов после взаимодействия. Вместо описанных в учебнике опытов с шарами на нитях можно подготовить другую серию опытов с использованием наклонного жёлоба.

Для успешного выполнения этих опытов нужно обратить внимание на некоторые детали их подготовки. Опыты выполняются с использованием наклонного жёлоба с горизонтальным лотком и стальных шаров. Лоток закрепляется в лапке штатива, установленного на демонстрационном столе. Нужно иметь в виду, что при тщательных измерениях могут быть обнаружены небольшие расхождения результатов, обусловленные вращательным движением шара. Движение шара по лотку без вращения можно осуществить, положив под него металлическую шайбу от винта диаметром 4—5 мм.

При взаимодействии двух тел импульс каждого из тел изменяется. Но изменяется ли суммарный импульс

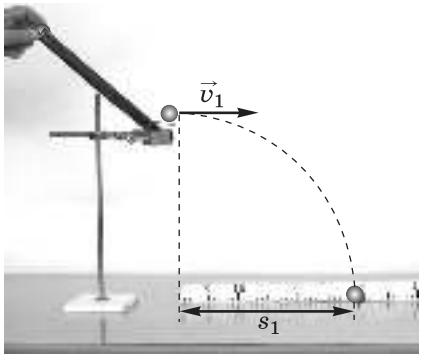

Рис. 30

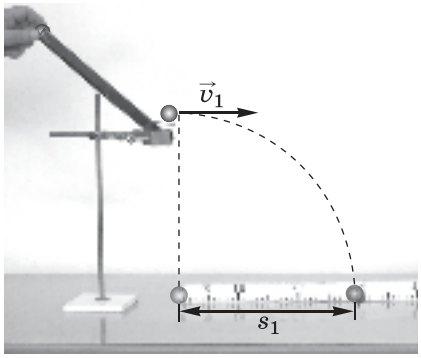

Рис. 31

двух тел в результате их взаимодействия? Для ответа на этот вопрос поставим шар на край наклонного жёлоба с горизонтальным лотком и затем отпустим. После скольжения по жёлобу шар срывается с лотка и падает на стол на некотором расстоянии s_1 от вертикали, проведённой через край лотка (рис. 30). Расстояние s_1 пропорционально скорости v_1 шара у края лотка.

Поставим на краю лотка второй такой же шар и снова запустим первый шар по жёлобу. После удара первый шар падает вертикально, а второй шар на таком же расстоянии s_1, на каком падал первый шар в первом опыте (рис. 31). Первый шар после соударения с таким же покоящимся шаром останавливается, а второй приобретает такую скорость v_1, какой обладал первый шар. При взаимодействии импульс каждого из двух тел изменился, но сумма импульсов тел осталась неизменной.

В следующем опыте на шар у края лотка прикрепим небольшой кусок пластилина в месте соударения с движущимся шаром. После удара оба шара падают на расстоянии s_2 от вертикали, в 2 раза меньшем расстояния s_1 в первом опыте (рис. 32). Следовательно, скорость v_2 двух шаров после соударения равна половине значения скорости v_1 одного шара до удара: $v_2 = v_1/2$.

Суммы импульсов двух шаров до взаимодействия и после взаимодействия и в этом опыте оказываются одинаковыми: $m\vec{v}_1 + m\vec{v}_0 = 2m\vec{v}_2 + m\vec{v}_1$.

Если сместить неподвижный шар на краю лотка так, чтобы вектор скорости $\vec{v}_0$ движущегося шара перед ударом был направлен мимо движущегося центра неподвижного шара, то после удара придут в движение оба шара, но направления их векторов скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ оказываются различными. Опыт показывает, что произведение массы шара на модуль его скорости v_0 до взаимодействия не равно сумме произведений масс шаров на модули их скоростей v_1 и v_2 после взаимодействия:

$$mv_0 \neq mv_1 + mv_2.$$

Однако сложение векторов импульсов до и после столкновения по правилу сложения векторов (правило паралле-

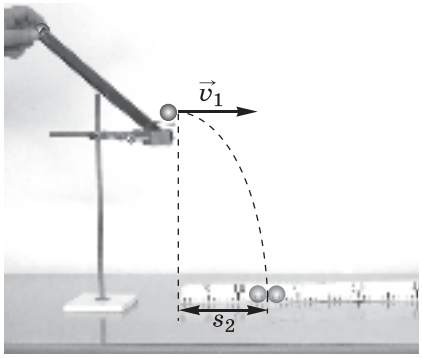

Рис. 32

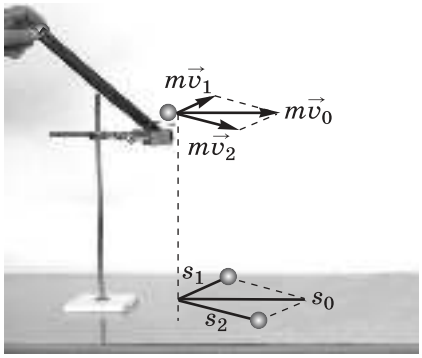

Рис. 33

лограмма) показывает, что сумма векторов импульсов двух тел после взаимодействия равна вектору импульса шара до взаимодействия (рис. 33):

$$m\vec{v}_0 = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2.$$

Для нахождения дальности полёта шаров на столе можно положить два листа белой бумаги, на них листы копировальной бумаги краской вниз. Одна пара листов кладётся на столе под краем лотка, другая — в месте падения шара, запущенного с верхней точки лотка. Это место падения определяется в предварительном опыте.

Сначала шар отпускается с края лотка для отметки начальной точки, от которой будет отсчитываться дальность полёта шаров по горизонтали. Затем один шар отпускается с верхней точки лотка для определения дальности s_1 его полёта по горизонтали. Если шар не попал на лист бумаги, то нужно переместить лист таким образом, чтобы шар попадал примерно в середину листа. Опыт нужно повторить 4—5 раз, чтобы убедиться в воспроизводимости результатов эксперимента. Затем, сняв лист копировальной бумаги с белого листа, в середине отметок мест падения шара выберем точку, примерно соответствующую среднему значению дальности полёта шара. Устанавливаем связь импульса $\vec{p}_1$ шара с расстоянием s_1 дальности его полёта по горизонтали. Обозначим время свободного падения от нижнего края лотка до поверхности стола Δt, тогда скорость $\vec{v}_1$ шара у нижнего края лотка равна $v_1 = \frac{s_1}{\Delta t}$, а его импульс равен $p_1 = mv_1 = m\frac{s_1}{\Delta t}$.

Импульс p_1 шара в момент его соскальзывания с лотка прямо пропорционален дальности полёта s_1 в горизонтальном направлении.

Если в классе много учащихся, проявляющих повышенный интерес к физике, опыт по изучению закономерностей взаимодействия шаров может быть выполнен либо в виде коллективного классного экспериментального исследования, либо в виде лабораторной работы, выполняемой учащимися. Суть эксперимента заключается в установлении факта равенства вектора импульса $\vec{p}_1$ первого шара перед столкновением сумме векторов $\vec{p}_1$ и $\vec{p}_2$ шаров после столкновения.

При одинаковых массах шаров $m_1 = m_2 = m$ векторы $\vec{p}_1$, $\vec{p}_1'$ и $\vec{p}_2'$ пропорциональны расстояниям дальности их полёта по горизонтали. Поэтому сравнение векторов $\vec{p}_1$, $\vec{p}_1'$ и $\vec{p}_2'$ импульсов шаров фактически заменяется сравнением векторов их горизонтальных перемещений. Если сумма векторов горизонтальных перемещений двух шаров после столкновения равна вектору горизонтального перемещения первого шара до столкновения, то выполняется закон сохранения импульса в векторной форме (4).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 13.1

Задание по измерению скорости истечения струи газа из ракеты можно выполнить коллективно в классе с участием нескольких групп учащихся, с записью результатов измерений на доске и в тетрадях, с самостоятельными вычислениями учащихся, со сравнением полученных результатов и их обсуждением.

При выполнении этого экспериментального задания высота подъёма ракеты возрастает с увеличением избыточного давления воздуха в ракете по той причине, что при одинаковой скорости истечения газа увеличивается масса выходящего воздуха. С увеличением массы возрастает импульс вытекающего газа, соответственно возрастает и импульс ракеты.

Большая скорость истечения воздуха из бутылки, полученная в эксперименте, объясняется тем, что молекулы газа вылетают примерно со средней скоростью своего теплового движения. В опытах по измерению скорости истечения струи воздуха из ракеты при различных значениях избыточного давления в пределах погрешностей измерений зависимость скорости истечения от давления не обнаруживается.

Реактивное движение. Принцип действия реактивных двигателей и особенности этих двигателей можно обсудить на уроке, заслушав подготовленные заранее краткие сообщения учащихся. Темы сообщений, например, могут быть такими:

1. Принцип работы реактивного двигателя.

2. Реактивное движение в природе.
3. Реактивные двигатели в авиации.
4. Реактивные двигатели на водном и сухопутном транспорте.
5. Работы К. Э. Циолковского и С. П. Королёва.
6. Космические ракеты.
7. Ракетное оружие.

При любой форме изучения этой темы нужно отметить, что возможность использования реактивных двигателей для осуществления полётов в космическое пространство впервые научно обосновал российский учёный и изобретатель Константин Эдуардович Циолковский. В статье «Исследование мировых пространств реактивными приборами» он в 1903 г. предложил конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем, проанализировал возможности использования различных химических веществ в качестве горючего и окислителя, рассмотрел способы управления полётом ракеты, обосновал возможность достижения космических скоростей путём использования многоступенчатых ракет, проанализировал действие перегрузки при запуске ракеты и явление невесомости в свободном полёте.

Как известно, для выхода в космическое пространство необходимо достижение скорости более 7,9 км/с. Скорость газов при выстреле из пушки или сжигании топлива в реактивном двигателе не превышает 4—5 км/с. На этом основании большинство учёных до работ Циолковского считали космические полёты технически неосуществимыми. Циолковский выполнил расчёты, доказывающие принципиальную возможность достижения ракетой скорости, превосходящей скорость истечения газов из её сопла, и предложил несколько вариантов конструкций ракет для достижения космических скоростей.

Идеи К. Э. Циолковского были развиты и воплощены в жизнь в нашей стране под руководством Сергея Павловича Королёва. С помощью многоступенчатой ракеты 4 октября 1957 г. был выведен на круговую орбиту первый в мире искусственный спутник Земли. 12 апреля 1961 г. был совершён первый в истории человечества полёт человека в космическое пространство. Его совершил первый в мире космонавт Юрий Алексеевич Гагарин. Мощность двигателей первой ступени ракеты-носителя «Восток», которая выводила на космическую орбиту корабль Ю. А. Гагарина, достигала 15 млн кВт. В настоящее время вокруг Земли движутся сотни искусственных спутников Земли, обеспечивающих трансляцию телевизионных сигналов, телефонную связь, ведущих метеорологические наблюдения, разведку полезных ископаемых и многие другие исследования. Космонавты с Земли побывали на Луне и готовятся к полёту на Марс.

Решение задач. При решении задач с использованием закона сохранения импульса нужно выбрать инерциальную систему отсчёта.

Перед тем как применять закон сохранения импульса, убедитесь, что выбранная вами система тел замкнутая, т. е. на систему тел не действуют внешние силы или равнодействующая внешних сил равна нулю. Иногда система тел может быть незамкнутой, но закон сохранения импульса можно применить, если проекция равнодействующей внешних сил на какую-либо ось равна нулю. Закон сохранения импульса применим в этом случае лишь для проекций на эту ось.

В некоторых случаях внешними силами можно пренебречь ввиду их малого числового значения в сравнении с внутренними силами.

Во многих случаях бывает полезно выполнить пояснительный рисунок, изобразив на нём векторы импульсов тел, входящих в систему, до и после взаимодействия. Импульсы тел до и после взаимодействия нужно находить относительно одной и той же инерциальной системы отсчёта.

Закон сохранения импульса записывается в векторной форме, а затем в проекциях на координатные оси. Из полученного уравнения выражается неизвестная величина в общем виде, затем подстановкой числовых значений величин из условия задачи получается ответ в числовом виде.

Задача 13.1. Решение.
$m_1 = 50$ кг,
$m_2 = 200$ кг,
$v_1 = 8$ м/с.

$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0,\ m_1v_1 - m_2v_2 = 0,$

$v_2 = \frac{m_1}{m_2}v_1,\ v_2 = \frac{50}{200}8$ м/с = 2 м/с.

Задача 13.2. Решение.

$m_1 = 10\ 000$ кг,

$m_2 = 15\ 000$ кг,

$v_1 = 0{,}3$ м/с,

$v_2 = 0{,}2$ м/с.

$m_3 = m_1 + m_2 = 25\ 000$ кг,

$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_3\vec{v}_3,$

$m_1v_1 + m_2v_2 = m_3v_3,$

$v_3 = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_3},$

$v_3 = \frac{10\ 000 \cdot 0{,}3 + 15\ 000 \cdot 0{,}2}{25\ 000}$ м/с =

= 0,24 м/с.

Задача 13.3. Решение.

$M = 1000$ т = 1 000 000 кг,

$v = 4$ км/с = 4000 м/с,

$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 3250$ кг/с.

Воспользуемся формулой (13.12) из учебника:

$$a = \frac{F}{M},\ \Delta(mv) = F\Delta t,\ F = \frac{\Delta m}{\Delta t}v,$$

$$a = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{v}{M},$$

$$a = 3250 \cdot \frac{4000}{1\ 000\ 000}\ \text{м/с}^2 = 13\ \text{м/с}^2.$$

Дополнительные задачи

Задача 13.4. В реактивный двигатель самолёта ежесекундно поступает 100 кг воздуха и 4,2 кг топлива, продукты сгорания в виде газов выбрасываются двигателем со скоростью 550 м/с относительно самолёта. Найдите силу тяги реактивного двигателя.

Решение.

$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 104{,}2$ кг/с,

$v = 550$ м/с.

$\Delta\,(m\vec{v}) = \vec{F}\Delta t,$

$\Delta(mv) = F\Delta t,\ F = \frac{\Delta m}{\Delta t}v,$

$F = 104{,}2 \cdot 550$ Н = 57 310 Н.

Задача 13.5. Рассчитайте ускорение ракеты массой 10^6 кг в момент старта, если секундный расход топлива 7,5 т/с и скорость истечения продуктов сгорания относительно ракеты равна 4 км/с.

Решение.

$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 7500$ кг/с,

$M = 1\ 000\ 000$ кг,

$v = 4$ км/с = 4000 м/с.

$$a = \frac{F}{M},\ \Delta(mv) = F\Delta t,\ F = \frac{\Delta m}{\Delta t}v,$$

$$a = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{v}{M},$$

$$a = 7500 \cdot \frac{4000}{1\ 000\ 000}\ \text{м/с}^2 = 30\ \text{м/с}^2.$$

Задача 13.6. Чему равен секундный расход топлива в момент старта ракеты массой 10^6 кг, если она стартует с ускорением $0{,}5g$, направленным вертикально вверх? Скорость истечения газов относительно ракеты равна 3 км/с.

Решение.

$m = 10^6$ кг,

$a = 0{,}5g,$

$u = 3$ км/с = 3000 м/с.

В момент старта на ракету действуют сила тяжести $\vec{F}_т$ и реактивная сила $\vec{F}_р$, равная

$$F_р = -\frac{\Delta m}{\Delta t}u.$$

Выбрав систему отсчёта, связанную с Землёй, запишем выражение второго закона Ньютона:

$$\vec{F}_р + \vec{F}_т = m\vec{a}.$$

В проекциях на вертикально направленную ось запишем:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t}u - mg = ma.$$

Следовательно, секундный расход топлива равен:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m\,(a + g)}{u},$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{1\ 000\ 000 \cdot (5 + 10)}{3000}\ \text{кг/с} = 5000\ \text{кг/с}.$$

Задачи повышенной трудности

Теоретические задачи вызывают больший интерес у школьников, если их результат может быть проверен на простом и наглядном опыте. Можно с успехом использовать и противоположный путь: до формулирования задачи продемонстрировать опыт, результат которого имеет черты парадоксальности, а затем сформулировать задачу, решение которой должно привести к объяснению парадокса. Приведём примеры задач такого типа.

Задача 1. Может ли упругий шар, движущийся со скоростью v_1, при столкновении с другим неподвижным упругим шаром сообщить ему скорость v_2, большую скорости v_1? Если да,

то во сколько раз скорость v_2 второго шара может превысить скорость v_1 первого шара?

Для экспериментального подтверждения теоретического решения этой задачи можно выполнить опыт по упругому столкновению большого движущегося стального шара с неподвижным маленьким стальным шаром.

Для учащихся, проявляющих повышенный интерес к физике, можно предложить продолжение этой задачи в форме парадоксального эксперимента, требующего теоретического объяснения. При решении задачи об упругом столкновении тел приходим к выводу, что максимальное значение скорости, приобретаемой неподвижным шаром в результате столкновения, может достигать двойного значения скорости ударяющего шара. После получения такого результата можно предложить такую простую задачу для устного решения.

Задача 2. Два упругих шара падают один за другим с высоты h на стол, лёгкий шар движется вслед за тяжёлым. Лёгкий шар сталкивается с тяжёлым шаром, отскочившим от стола. На какую максимальную высоту может подпрыгнуть лёгкий шар, если столкновения тяжёлого шара со столом и шаров между собой упругие?

Когда будут предложены варианты ответов для проверки какой из них правильный, выполняется эксперимент. Для эксперимента удобно использовать сплошной каучуковый шар, супербол как тяжёлый шар и шарик для игры в пинг-понг как лёгкий шар.

Обычно предлагаемые варианты ответов: 1) лёгкий шар подпрыгнет на высоту меньше чем h; 2) на высоту примерно h; 3) на высоту примерно $2h$; 4) на высоту примерно $4h$. Первый ответ получается в предположении частично упругого отражения от нижнего шара как от стола. Второй вариант получается в предположении упругого удара о неподвижный нижний шар. Третий вариант основан на предположении об увеличении вдвое скорости лёгкого шара при отражении от тяжёлого шара. При этом упускается из вида, что при увеличении скорости в 2 раза кинетическая энергия шара увеличивается в 4 раза, поэтому и высота подъёма шара должна быть в 4 раза больше. Это учитывается в четвёртом варианте ответа.

При подготовке опыта следует заранее установить какие-либо ориентиры, например закрепив линейки в лапках штатива на высотах h, $2h$ и $4h$. После этого выполняется опыт и обнаруживается, что лёгкий шар подскакивает значительно выше чем $4h$. Этот результат требуется объяснить теоретически.

Объяснение опыта следующее. Лёгкий и тяжёлый шары перед столкновением со столом движутся с примерно одинаковыми скоростями $\vec{v}$ относительно Земли (если диаметры шаров пренебрежимо малы по сравнению с высотой h). После столкновения тяжёлого шара со столом его скорость изменяет направление и становится равной $-\vec{v}$. В системе отсчёта тяжёлого шара, движущегося со скоростью $-\vec{v}$ вверх относительно Земли, лёгкий шар перед столкновением движется вниз со скоростью $2\vec{v}$. Земля в этой системе отсчёта движется вниз со скоростью $\vec{v}$. При столкновении с неподвижным в этой системе отсчёта тяжёлым шаром лёгкий шар отражается от него как от стенки и получает относительно тяжёлого шара скорость $-2\vec{v}$, направленную вверх. В системе отсчёта, связанной с Землёй, скорость лёгкого шара после отражения равна $-3\vec{v}$. Кинетическая энергия лёгкого шара относительно Земли равна:

$$E_к = \frac{m\,(3v)^2}{2}.$$

Используя закон сохранения энергии, находим высоту H подъёма шара:

$$mgH = \frac{m\,(3v)^2}{2},\ H = \frac{9v^2}{2g}. \qquad (1)$$

Скорость v определяется по начальной высоте h, с которой падал шар:

$$mgH = \frac{mv^2}{2},\ v^2 = 2gh. \qquad (2)$$

Подставляя найденное значение квадрата скорости из выражений (2) в выражение (1), получаем выражение для нахождения высоты H подъёма лёгкого шара после его столкновения с тяжёлым шаром:

$$H = 9h.$$

§ 14. Кинетическая энергия

Понятие об энергии как сохраняющейся в любых процессах физической величины сформировалось в науке в середине XIX в.

Утверждение о сохранении энергии при переходе системы из одного состояния в другое означает, что каждому переходу соответствует строго определённое изменение энергии. Если система, претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние, общее изменение энергии системы в результате всех процессов равно нулю. В изолированной системе, на которую не оказываются внешние воздействия, энергия постоянна, какие бы процессы в ней ни происходили.

Хотя признак сохранения и является одной из важнейших характеристик энергии как физической величины, но этот признак не может служить определением понятия энергии. Сохраняющимися в изолированных системах являются и многие другие физические величины, например импульс, момент импульса, электрический заряд. Особенностью понятия энергии как сохраняющейся величины является то, что энергия служит общей мерой различных форм движения материи при их взаимных превращениях.

Во многих учебниках сначала вводится понятие работы, затем через него определяются понятия кинетической и потенциальной энергий. Этот методический путь соответствует историческому пути формирования и развития физических понятий, но он не единственно возможный.

В современной физике понятие энергии первично, а понятие работы определяется через него. Наиболее близким к современному научному содержанию понятий «энергия» и «работа» является путь определения энергии независимо от понятия работы с последующим раскрытием связи между работой и энергией. Такой план введения понятий энергии и работы использован, например, в книге: Ландау Л. Д. и Китайгородский А. И. «Физика для всех».

На основании опытов устанавливается факт, что при любых взаимодействиях тела массой m с Землёй вблизи её поверхности силами гравитационного притяжения сумма половины произведения массы m тела на квадрат скорости v его движения и произведения массы m тела на ускорение g свободного падения и расстояние h от поверхности Земли остаётся постоянной:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const}.$$

Первое слагаемое $\frac{mv^2}{2}$ этой постоянной величины называют кинетической энергией тела, второе слагаемое mgh — потенциальной энергией.

Методический путь введения понятий «энергия» и «работа», использованный в учебнике, можно пояснить следующим образом. Наблюдения показывают, что скорости движения тел изменяются только в результате их взаимодействия с другими телами. Любое взаимодействие тел обязательно сопровождается либо изменениями в их взаимном расположении, либо изменениями формы и размеров самих тел. Например, изменение скорости тела в результате его гравитационного взаимодействия с Землёй происходит при изменении расстояния до Земли, а изменение скорости мяча при столкновении с Землёй происходит в результате деформации мяча и Земли.

Обратим внимание на то, что одинаковые изменения расстояния между взаимодействующими телами или одинаковые изменения деформации тел приводят всегда к одинаковым изменениям скорости одинаковых тел. Тело, свободно падающее с высоты h, всегда получает в конце пути одинаковую скорость v, равную

$$v = \sqrt{2gh}. \qquad (1)$$

Одинаково деформированная пружина при каждом выстреле из пружинного пистолета сообщает одинаковым снарядам одинаковую скорость.

Механическое движение, кроме явной формы, обнаруживаемой по изменению взаимных положений тел, как бы имеет ещё и скрытую, потенциальную форму, и эти две формы механического движения способны к взаимным превращениям. Эти превращения, видимо, могут быть охарактеризованы какой-то физической величиной, испытывающей превращения из одной формы в другую в равной мере.

Действительно, не только потенциальная форма движения тел, взаимодействующих гравитационными силами, может превращаться в форму поступательного механического движения, но и поступательно движущееся вверх с начальной скоростью v тело останавливается на высоте h, определяемой тем же уравнением (1).

Начинаем с поиска меры поступательного движения тел. Мы уже знаем одну сохраняющуюся механическую величину — импульс $\vec{p}$ тела, равный произведению массы m тела на его скорость $\vec{v}$. Проверим, не является ли импульс тела той самой величиной, которая могла бы служить мерой превращения одной формы механического движения в другую. Для этого можно выполнить опыты с шарами на нити и пружиной, описанные в учебнике, или использовать баллистический пистолет, для которого нужно изготовить второй снаряд с массой, в 4 раза большей массы снаряда обычного комплекта. При подборе снарядов и пружины пистолета следует обратить внимание на тот факт, что точные результаты эксперимента можно получить только при использовании снарядов массой, существенно большей массы пружины.

Закрепим баллистический пистолет горизонтально на высоте h над столом. Сожмём пружину на некоторую величину Δx и установим в пистолет снаряд массой m_1. При освобождении сжатой пружины снаряд выбрасывается из пистолета и потенциальная форма движения сжатой пружины превращается в форму поступательного движения снаряда. Опыты показывают, что при одинаковом сжатии пружины при каждом выстреле одинаковые снаряды пролетают по горизонтали примерно одинаковое расстояние s_1 (рис. 34). По дальности полёта s_1 можно определить начальную скорость v_1 снаряда и его импульс p_1.

Заменим первый снаряд на второй, обладающий массой $m_2 = 4m_1$, и сожмём пружину, как в первом опыте. Если справедливо предположение о том, что произведение массы тела на его скорость может служить мерой превращения одной формы механического движения в другую, то одинаково сжатая пружина должна сообщать одинаковый импульс телам с разной массой. Так как масса второго снаряда в 4 раза больше, при одинаковом импульсе его скорость должна быть в 4 раза меньше. Поэтому дальность полёта s_2 второго снаряда должна быть в 4 раза меньше дальности полёта s_1 первого снаряда.

Однако опыт даёт иной результат: дальность полёта s_2 второго снаряда оказывается меньше дальности полёта s_1 первого снаряда в 2, а не в 4 раза (рис. 35).

Из этого опытного факта следует, что скорость v_2 второго снаряда меньше скорости v_1 первого снаряда в 2 раза:

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

Одинаковыми у двух снарядов, выброшенных одинаково деформированной пружиной, оказываются не произведения массы на скорость, а произведения массы на квадрат скорости:

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

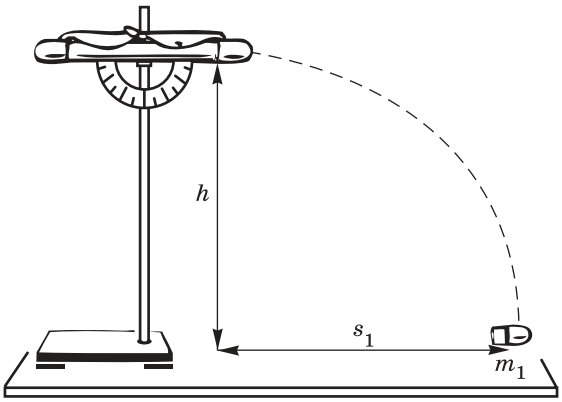

Рис. 34

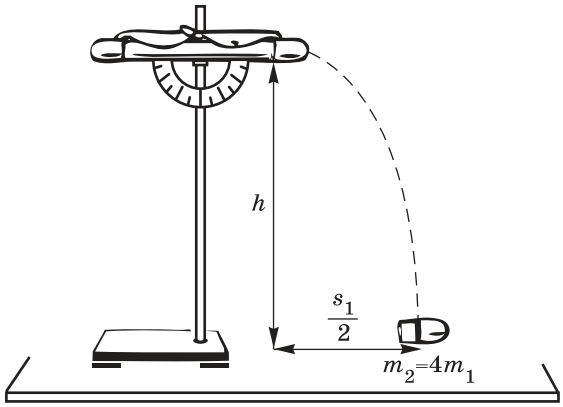

Рис. 35

Поэтому произведение массы на квадрат скорости тела может служить мерой механического движения при его превращениях из одной формы в другую.

Если величина mv^2 постоянна, то постоянной является и величина nmv^2, где n — любое постоянное число. В физике в качестве меры механического поступательного движения, характеризующей способность превращения одной формы движения в другую, выбрана величина

$$E_к = \frac{mv^2}{2}, \qquad (2)$$

называемая кинетической энергией поступательного движения тела.

Нужно обратить внимание учащихся на ряд особенностей кинетической энергии. В отличие от импульса кинетическая энергия — величина скалярная. Значение кинетической энергии зависит от выбора системы отсчёта, но в любой системе отсчёта оно положительно или равно нулю. В отличие от импульса кинетическая энергия не является сохраняющейся величиной при любых взаимодействиях.

Задача 14.1. Решение.

$mv = MV$.

$$V = \frac{mv}{M},\ \frac{MV^2}{2} = M\frac{m^2v^2}{2M^2} = \frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2},$$

$$\frac{MV^2}{2} \neq \frac{mv^2}{2}.$$

Задача 14.2. Решение. Импульс искусственного спутника Земли за половину оборота с постоянной по модулю скоростью вокруг Земли по круговой орбите изменяется по направлению, а кинетическая энергия остается неизменной.

Задача 14.3. Решение. $mv_2 = 2mv_1$, $v_2 = 2v_1$, $\frac{mv_2^2}{2} = \frac{m\cdot 4v_1^2}{2} = 4\frac{m\cdot 4v_1^2}{2}$.

Задача 14.4. Решение. $\frac{mv^2}{2} =$ $= 20$ Дж, $mv = 10$ Н · с, $m = \frac{10}{v}$ кг,

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{\frac{10}{v}v^2}{2} = 5v = 20 \text{ Дж},\ v = 4 \text{ м/с}.$$

Задача 14.5. Решение.

$m_1 = m_2 = 1000$ кг,

$v_1 = 10$ м/с,

$v_2 = 30$ м/с,

$v_3 = v_2 - v_1 = 20$ м/с,

$$E_к = \frac{mv_3^2}{2},$$

$$E_к = \frac{1000\cdot(20)^2}{2} \text{ Дж} = 200\,000 \text{ Дж}.$$

Задача 14.6. Решение.

$m_1 = 1000$ кг,

$v_1 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,

$v_2 = 144$ км/ч $= 40$ м/с,

$v_3 = v_1 - v_1 = 0$,

$v_4 = v_2 - v_1 = 20$ м/с,

$$\Delta E_{кз} = E_2 - E_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

$$\Delta E_{кз} = \frac{1000\cdot(40)^2}{2} \text{ Дж} - \frac{1000\cdot(20)^2}{2} \text{ Дж} =$$

$$= 600\,000 \text{ Дж},$$

$$\Delta E_{ка} = E_4 - E_3 = \frac{mv_4^2}{2} - \frac{mv_3^2}{2},$$

$$\Delta E_{ка} = \frac{1000\cdot(20)^2}{2} \text{ Дж} - \frac{1000\cdot(0)^2}{2} \text{ Дж} =$$

$$= 200\,000 \text{ Дж}.$$

Задача 14.7. Решение.

$m = 1000$ кг,

$v_0 = 0$,

$v_1 = 108$ км/ч $= 30$ м/с,

$r = 45\,000$ кДж/кг $= 45\,000\,000$ Дж/кг,

$\eta = 0{,}40$.

$$\eta Q = \Delta E_к,\ \eta m_б r = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$m_б = \frac{m\left(v_1^2 - v_0^2\right)}{2\eta r},$$

$$m_б = \frac{1000\cdot(900-0)}{2\cdot 0{,}4\cdot 45\,000\,000} \text{ кг} = 0{,}025 \text{ кг} = 25 \text{ г}.$$

Задача 14.8. Решение.

$m = 80$ кг,

$v_0 = 0$,

$v_1 = 7{,}9$ км/с $= 7900$ м/с,

$r = 43\,000$ кДж/кг $= 43\,000\,000$ Дж/кг.

$$Q = \Delta E_к,\ m_к r = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$m_к = \frac{m\left(v_1^2 - v_0^2\right)}{2r},$$

$$m_к = \frac{80\cdot(7900)^2}{2\cdot 43\,000\,000} \text{ кг} = 58 \text{ кг}.$$

§ 15. Работа

В учебнике вводится понятие работы как меры изменения кинетической энергии тела под действием силы. Учителю следует обратить внимание на физический смысл понятия работы как количественной меры превращения энергии из одной формы в другую или передачи энергии от одного тела к другому.

Введение понятия работы как меры изменения кинетической энергии тела под действием силы даёт возможность установить связь понятия «энергия» с ранее введёнными понятиями «сила» и «путь» и ввести единицы работы и энергии.

В школьных учебниках работа при прямолинейном движении обычно определяется как произведение модулей векторов силы $\vec{F}$ и перемещения $\vec{s}$ на косинус угла между этими векторами. Такое определение работы отличается от строгого определения тем, что элементарное перемещение $\Delta\vec{s}$ заменено на перемещение $\vec{s}$ и вместо элементарной работы ΔA используется работа A.

В действительности работа A на конечном пути s определяется криволинейным интегралом вдоль траектории движения. В общеобразовательной школе нет возможности дать школьникам точное определение понятия работы из-за недостаточности их математической подготовки. Однако использование традиционного для школы определения понятия работы нельзя признать вполне удачным. Как, например, нельзя на основании этого определения понятия работы решить такую задачу.

Какую работу совершила действующая на сани сила трения 20 Н *при перемещении саней по окружности длиной* 100 м*?*

Перемещение саней равно нулю, и работа как будто бы должна быть равной нулю. А это явно ошибочный результат. Как же получить правильное решение с использованием данного в школьном учебнике определения понятия работы?

Можно дать следующее, более строгое определение понятия работы. Поскольку направление вектора элементарного перемещения $\Delta\vec{s}$ совпадает с направлением вектора мгновенной скорости $\vec{v}$ тела в данной точке, угол между векторами силы $\vec{F}$ и элементарного перемещения $\Delta\vec{s}$ есть одновременно угол между векторами силы $\vec{F}$ и мгновенной скорости $\vec{v}$. Поэтому элементарную работу ΔA можно также определить как произведение модуля силы F на пройденный путь $\Delta\vec{s}$ и косинус угла между векторами силы $\vec{F}$ и мгновенной скорости $\vec{v}$ тела. При постоянных значениях модуля силы и угла между векторами силы $\vec{F}$ и скорости $\vec{v}$ работа A на конечном пути s равна произведению модуля силы F на пройденный путь s и косинус угла α между векторами силы $\vec{F}$ и скорости $\vec{v}$:

$$A = Fs\cos\alpha.$$

При таком определении понятия работы задача о работе силы трения при движении саней по окружности не вызывает никаких затруднений. Вектор силы трения $\vec{F}$ на всём пути движения саней направлен противоположно вектору скорости $\vec{v}$ движения саней, угол α равен 180°, а косинус угла α равен –1. Работа силы трения равна:

$$A = Fs\cos\alpha,$$

$$A = 20 \cdot 100 \cdot (-1)\ \text{Дж} = -2000\ \text{Дж}.$$

Задача 15.1. Решение.

$m = 5$ кг,

$v_0 = 0$,

$v_1 = 10$ м/с.

$$A = \Delta E_к = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$A = \frac{5 \cdot 100}{2}\ \text{Дж} - \frac{5 \cdot 0}{2}\ \text{Дж} = 250\ \text{Дж}.$$

Задача 15.2. Решение.

$h = 5$ м,

$m = 80$ кг,

$g = 10$ м/с^2,

$E_{к0} = 0$.

$A = \Delta E_к = E_к - E_{к0} = E_к$,

$A = Fh = mgh$,

$E_к = A = 80 \cdot 5 \cdot 10$ Дж $= 4000$ Дж.

Задача 15.3. Решение.

$m = 2000$ кг,

$v_0 = 0$,

$v_1 = 108$ км/ч $= 30$ м/с.

$$A = \Delta E_к = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$A = \frac{2000 \cdot 900}{2} \text{ Дж} - \frac{2000 \cdot 0}{2} \text{ Дж} =$$

$= 900\,000$ Дж.

Задача 15.4. Решение.

$m = 1000$ кг,
$v_0 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,
$v_1 = 144$ км/ч $= 40$ м/с.

$$A = \Delta E_к = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$A = \frac{1000 \cdot 1600}{2} \text{ Дж} - \frac{1000 \cdot 400}{2} \text{ Дж} =$$

$= 600\,000$ Дж.

Задача 15.5. Решение.

$v_0 = 0$,
$v_1 = 18$ км/ч $= 5$ м/с,
$v_2 = 36$ км/ч $= 10$ м/с.

$$A_1 = \Delta E_к = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

$$A_2 = \Delta E_к = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{mv_1^2 - mv_0^2}{mv_2^2 - mv_1^2} = \frac{v_1^2 - v_0^2}{v_2^2 - v_1^2},$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{25}{100 - 25} = \frac{1}{3}.$$

Задача 15.6. Решение.

$m = 80$ кг,
$v_1 = 20$ м/с,
$v_2 = 10$ м/с,
$s = 20$ м.

$$A_{тр} = F_{тр}s = \Delta E_к = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m\,(v_2^2 - v_1^2)}{2},$$

$$A_{тр} = \frac{80 \cdot (100 - 400)}{2} \text{ Дж} = -12\,000 \text{ Дж}.$$

Задача 15.7. Решение.

$m = 2$ кг,
$v_0 = 0$,
$v = 25$ м/с,
$t = 5$ с,
$F = 10$ Н,
$\alpha = 180°$.

Эта задача может быть решена очень коротко: изменение кинетической энергии тела в любой инерциальной системе отсчёта равно работе силы, действующей на тело:

$$\Delta E_к = A = Fs \cos \alpha = -Fs.$$

Пройденный путь вычислим, используя формулу пути равноускоренного движения и второй закон Ньютона для определения ускорения:

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{\frac{F}{m}t^2}{2} = \frac{Ft^2}{2m},$$

$$\Delta E_к = -\frac{F^2t^2}{2m},$$

$$\Delta E_к = -\frac{100 \cdot 25}{2 \cdot 2} \text{ Дж} = -625 \text{ Дж}.$$

Для проверки полученного результата вычислим изменение кинетической энергии тела в системе отсчёта, движущейся относительно первой системы со скоростью 25 м/с. В этой системе отсчёта начальная скорость тела $v = 25$ м/с, конечная скорость равна:

$$v_1 = v - at = v - \frac{F}{m}t,$$

$$v_1 = 25 \text{ м/с} - \frac{10}{2} 5 \text{ м/с} = 0,$$

$$\Delta E_к = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv^2}{2},$$

$$\Delta E_к = \frac{2 \cdot 0}{2} \text{ Дж} - \frac{2 \cdot 625}{2} \text{ Дж} = -625 \text{ Дж}.$$

Дополнительная задача

Задача 15.8. Грузовой автомобиль массой 8 т выехал на встречную полосу движения и столкнулся с легковым автомобилем массой 2 т, движущимся навстречу со скоростью 72 км/ч. В результате столкновения автомобили соединились вместе и произошли значительные разрушения обоих автомобилей. Тормозной путь двух автомобилей после столкновения до остановки оказался равным 12 м в сторону движения грузового автомобиля. Определите скорость грузового автомобиля перед столкновением и количество энергии, израсходованной на деформацию и разрушения автомобилей при столкновении. Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с^2. Коэффициент трения автомобильных покрышек по дорожному покрытию равен 0,6.

Решение.

$m_1 = 8$ т $= 8000$ кг,
$m_2 = 2$ т $= 2000$ кг,
$m_3 = 10\,000$ кг,
$v_2 = 72$ км/ч $= 20$ м/с,
$s = 12$ м,
$\mu = 0{,}6$.

По закону сохранения импульса при противоположных направлениях векторов скоростей столкнувшихся автомобилей имеем:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_3\vec{v}_3, \; m_1v_1 - m_2v_2 = m_3v_3,$$

$$v_1 = \frac{m_2v_2 + m_3v_3}{m_1}, \; \frac{m_3v_3^2}{2} = F_{тр}s = \mu m_3 gs,$$

$$v_3 = \sqrt{2\mu gs},\ v_1 = \frac{m_2 v_2 + m_3\sqrt{2\mu gs}}{m_1},$$

$$v_1 = \frac{2000 \cdot 20 + 10\,000\sqrt{2 \cdot 0{,}6 \cdot 10 \cdot 12}}{8000}\ \text{м/с} =$$

$$= 20\ \text{м/с} = 72\ \text{км/ч}.$$

По закону сохранения энергии

$$E_{к1} + E_{к2} = A + Q = F_{тр}s + Q = \mu mgs + Q,$$

$$Q = E_{к1} + E_{к2} - \mu m_3 gs =$$

$$= \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_1 v_2^2}{2} - \mu m_3 gs,$$

$$Q = \frac{8000 \cdot 400}{2}\ \text{Дж} + \frac{2000 \cdot 400}{2}\ \text{Дж} -$$

$$- 0{,}6 \cdot 10\,000 \cdot 10 \cdot 12\ \text{Дж} =$$

$$= 1\,280\,000\ \text{Дж}.$$

§ 16. Потенциальная энергия гравитационного притяжения тел

Вывод формулы для вычисления значений потенциальной энергии поднятого над Землёй тела формально является простой задачей. Приравняв изменение потенциальной энергии $\Delta E_п$ тела, падающего с высоты h на Землю, к изменению его кинетической энергии $\Delta E_к$, взятому с противоположным знаком, получим

$$\Delta E_п = -\Delta E_к.$$

Так как изменение кинетической энергии тела по определению равно работе A силы тяжести, приложенной к телу, то изменение потенциальной энергии $\Delta E_п$ равно работе A силы тяжести, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta E_п = -A.$$

Работа A силы тяжести при падении тела массой m с высоты h равна:

$$A = mgh,$$

поэтому изменение потенциальной энергии $\Delta E_п$ равно:

$$\Delta E_п = -mgh.$$

Знак «минус» показывает, что при движении тела вниз по направлению вектора силы тяжести ($\alpha = 0$, $\cos\alpha = 1$) его потенциальная энергия уменьшается; при движении вверх против направления вектора силы тяжести ($\alpha = 180°$, $\cos\alpha = -1$) потенциальная энергия увеличивается.

Если принять значение потенциальной энергии тела на поверхности Земли равным нулю, то потенциальная энергия на высоте h будет равна:

$$E_п = mgh.$$

Изучение понятия потенциальной энергии полезно сопровождать выполнением экспериментальных заданий, помогающих установить связь между абстрактными научными понятиями и простыми повседневными жизненными явлениями. В учебнике предложены простые экспериментальные задания 16.1 по определению потенциальной энергии тела и 16.2 по сравнению изменения потенциальной энергии с изменением кинетической энергии при движении тела по наклонной плоскости. Кроме этих заданий, можно провести по желанию экспериментальное исследование свойств маятника. Это задание повышенной математической трудности, но очень простое при выполнении эксперимента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 16.3

Взаимные превращения потенциальной и кинетической энергий при колебаниях маятника

Оборудование: шар или гиря на нити, секундомер, измерительная линейка.

Задание. 1. Попробуйте самостоятельно теоретически решить задачу, от чего зависит период колебаний математического маятника массой m на нити длиной l при начальном отклонении от положения равновесия на небольшой угол α.

2. Исследуйте экспериментально зависимость периода колебаний маятника от его длины и амплитуды колебаний. Сравните значения, вычисленные теоретически и найденные экспериментально.

Порядок выполнения задания

Тело, подвешенное на нити, способно совершать свободные колебания в результате взаимодействия с Землёй за счёт сил тяготения и с нитью за счёт сил упругости. При малых размерах тела по сравнению с длиной нити и при пренебрежимо малой массе нити по сравнению с массой тела такое тело на

нити называют математическим маятником.

1. Измерьте периоды колебаний маятников длиной 30 и 120 см. Для нахождения периода колебаний измерьте время 10 колебаний и разделите его на 10. Сделайте вывод, как зависит период колебаний математического маятника от его длины.

2. Измерьте периоды колебаний маятника длиной 120 см при амплитудах колебаний 10 и 20 см. Сделайте вывод, как зависит период колебаний математического маятника от амплитуды колебаний.

Возможный вариант выполнения

При отклонении математического маятника длиной l на небольшой угол α от положения равновесия расстояние маятника от поверхности Земли увеличивается на некоторую величину h. По рисунку 36 это расстояние связано с длиной l маятника и углом отклонения α выражением

$$h = l - l\cos\alpha = l\,(1 - \cos\alpha) = 2l\left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^2.$$

Если маятник после отклонения на угол α от положения равновесия отпустить, то он движется с возрастающей скоростью до положения равновесия, затем с убывающей скоростью до максимального отклонения в противоположную сторону и так далее совершает периодические колебания. Период колебаний T маятника в 4 раза больше

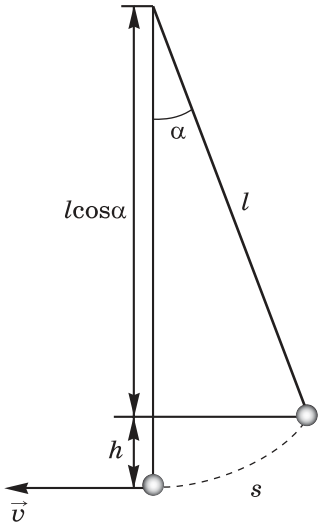

Рис. 36

времени t его движения от положения максимального отклонения до положения равновесия.

Период колебаний T маятника можно приблизительно рассчитать следующим способом. При колебаниях изменение потенциальной энергии гравитационного взаимодействия маятника с Землёй в любой момент времени равно изменению его кинетической энергии, взятому с обратным знаком:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}.$$

В случае перехода маятника из положения максимального отклонения в положение равновесия его потенциальная энергия уменьшается на величину $\Delta E_{\text{п}} = -mgh$, а кинетическая энергия увеличивается от нуля до значения $\frac{mv^2}{2}$. Для модулей изменений энергии выполняется равенство $mgh = \frac{mv^2}{2}$.

Отсюда скорость маятника в момент прохождения положения равновесия равна:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Если принять, что среднее значение скорости $v_{\text{ср}}$ маятника примерно равно половине максимального значения v, то время t движения от крайнего положения до положения равновесия равно:

$$t = \frac{s}{v_{\text{ср}}} = \frac{l\cdot\alpha}{\frac{v}{2}} = \frac{2\cdot l\cdot\alpha}{\sqrt{2gh}} =$$

$$= \frac{2\cdot l\cdot\alpha}{\sqrt{2g\cdot 2\cdot l\cdot\left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^2}} = \sqrt{\frac{l}{g}}\cdot\frac{\alpha}{\sin\frac{\alpha}{2}}.$$

Период колебаний T математического маятника в 4 раза больше этого времени:

$$T = 4t = 4\sqrt{\frac{l}{g}}\cdot\frac{\alpha}{\sin\frac{\alpha}{2}}.$$

Поскольку при малых значениях углов выполняется приблизительное равенство

$$\sin\alpha \approx \alpha,$$

для периода колебаний математического маятника получаем приближённое выражение $T \approx 8\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Это приближённое выражение интересно тем, что даёт правильную зави-

симость периода колебаний математического маятника от его длины и ускорения силы тяжести. Более точная формула периода колебаний математического маятника отличается от полученной приближённым способом коэффициентом 8 вместо 2π перед корнем.

Задача 16.1. Решение. Так как расстояние от центра Земли при движении спутника по круговой орбите не изменяется, не изменяется и его потенциальная энергия.

Задача 16.2. Решение. При отсутствии сил трения изменение кинетической энергии тела равно изменению потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тела с Землёй, взятому с обратным знаком:

$$\Delta E_к = -\Delta E_п.$$

При одинаковом изменении высоты одинаковы изменения кинетической энергии тела, следовательно, одинаковы и изменения скорости тела:

$$\Delta v_1 = \Delta v_2,\ v_0 = 0,\ v_1 = v_2,\ v_1/v_2 = 1.$$

Время t_1 свободного падения с высоты 5 м равно:

$$h = \frac{gt^2}{2},\ t_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}},\ t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{10}}\ \text{с} = 1\ \text{с}.$$

Время t_2 равноускоренного движения по наклонной плоскости длиной $l = 10$ м с той же высоты 5 м без трения равно:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{2l}{g \sin \alpha}},\ t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{10 \cdot 0{,}5}}\ \text{с} = 2\ \text{с},$$

$$t_1/t_2 = 0{,}5.$$

Задача 16.3. Решение. Работа силы тяжести и изменение потенциальной энергии при подъёме камня до высшей точки траектории равны по модулю изменению кинетической энергии:

$$A = \Delta E_п = \frac{mv^2}{2} = \frac{2 \cdot 100}{2}\ \text{Дж} = 100\ \text{Дж}.$$

Задача 16.4. Решение. При действии силы $\vec{F}_1$, направленной вертикально вверх, равнодействующая сила $\vec{F}$ равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + m\vec{g}.$$

Модуль равнодействующей силы $\vec{F}$ равен:

$$F = F_1 - mg.$$

Найдём ускорение тела и путь, пройденный за 1 с:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F_1 - mg}{m} = \frac{F_1}{m} - g,$$

$$a = \frac{40}{2}\ \text{м/с} - 10\ \text{м/с} = 10\ \text{м/с},$$

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{10 \cdot 1}{2}\ \text{м} = 5\ \text{м}.$$

Работа силы $\vec{F}_1$ равна:

$$A = F_1 s = 40 \cdot 5\ \text{Дж} = 200\ \text{Дж}.$$

Изменение потенциальной энергии равно:

$$\Delta E_п = mgh = mgs =$$
$$= 2 \cdot 10 \cdot 5\ \text{Дж} = 100\ \text{Дж}.$$

Изменение кинетической энергии тела равно:

$$\Delta E_к = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\,(at)^2}{2},$$

$$\Delta E_к = \frac{2 \cdot (10 \cdot 1)^2}{2}\ \text{Дж} = 100\ \text{Дж}.$$

Таким образом, работа, совершённая силой $\vec{F}_1$, равна сумме изменений кинетической и потенциальной энергий тела.

Пример решения задачи (с. 75 учебника)

Решение. Для случая:

$\alpha = 53°$,

$\mu = 0{,}05$,

$s_1 = 30$ м.

$$A_1 + A_2 = E_{п1} - E_{п2},$$

$$F_{тр1} = F_{тр2} = \mu N = \mu mg \cos \alpha,$$

$$F_{тр1} s_1 + F_{тр2} s_2 = mgh_1 - mgh_2,$$

$$\mu mg \cos \alpha \cdot s_1 + \mu mg \cos \alpha \cdot s_2 =$$
$$= mgs_1 \cdot \sin \alpha - mgs_2 \cdot \sin \alpha.$$

Отсюда получаем

$$s_2 = \frac{s_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$s_2 \approx \frac{30 \cdot (0{,}8 - 0{,}05 \cdot 0{,}06)}{0{,}8 + 0{,}05 \cdot 0{,}6}\ \text{м} \approx 28\ \text{м}.$$

Задачи для самостоятельной работы

1. Человек массой 70 кг спускается с четвёртого этажа на первый. Пол четвёртого этажа находится на высоте 12 м от земной поверхности. Чему равна работа, совершённая при этом силой тяжести? Чему равно изменение потенциальной энергии человека?

2. Альпинист массой 70 кг поднялся на вершину горы высотой 2 км, а за-

тем возвратился в исходное место. Чему равна работа, совершённая при этом силой тяжести?

3. Груз массой 1 кг под действием силы 30 Н, направленной вертикально вверх, был поднят на высоту 5 м. Чему равны работа этой силы, изменение потенциальной и кинетической энергий груза?

4. Камню, находящемуся на высоте 20 м от земной поверхности, сообщили скорость 10 м/с, направленную горизонтально. Чему равны работа силы тяжести и изменение потенциальной энергии камня за время его падения? Чему равно изменение кинетической энергии камня за это время?

§ 17. Потенциальная энергия упругой деформации тел

Энергия поднятого над Землёй тела была рассмотрена как первый вид потенциальной энергии, зависящей от взаимного расположения тел. Второй вид потенциальной энергии, в котором энергия зависит от взаимного расположения частей одного тела, рассматривается на примере упругой пружины.

Опыты показывают, что сжатая или растянутая стальная пружина обладает определённым запасом потенциальной энергии и эта энергия может превратиться в кинетическую энергию снаряда. Изменение потенциальной энергии упругой деформации можно вычислить теоретически по известному значению деформации x пружины и её жёсткости k. Модуль силы упругости $F_{упр}$ деформированной пружины по закону Гука равен:

$$F_{упр} = kx.$$

При восстановлении формы пружины сила упругости убывает прямо пропорционально деформации x до нуля, её среднее значение равно половине суммы начального и конечного значений:

$$F_{ср} = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{kx + 0}{2} = \frac{kx}{2},\ F_{ср} = \frac{kx}{2}.$$

Работа A, совершённая внешними силами против действия силы упругости при деформации x, равна:

$$A = F_{ср} \cdot x = \frac{kx^2}{2},\ E_п = A,\ E_п = \frac{kx^2}{2}.$$

Формированию понятия о потенциальной энергии упругой деформации поможет выполнение экспериментального задания 17.1 по измерению потенциальной энергии упругой деформации пружины. Экспериментальные задания 17.2 и 17.3 по исследованию колебаний груза на пружинах могут быть предложены как дополнительные задания для желающих.

При выполнении задания 17.2 период колебаний тела массой m на пружине жёсткостью k можно оценить приблизительно таким же способом, как это было определено для математического маятника. Среднюю скорость $v_{ср}$ движения тела от верхней точки при деформации пружины, равной нулю, до точки равновесия силы тяжести и силы упругости можно принять примерно равной половине скорости v в точке равновесия. Эта скорость определяется выражением (17.8) $v = \sqrt{gx_0}$.

Отсюда средняя скорость равна:

$$v_{ср} = v/2 = \frac{\sqrt{gx_0}}{2}.$$

Тогда время t движения от верхней точки до точки равновесия примерно равно:

$$t = \frac{x_0}{v_{ср}} = 2\sqrt{\frac{x_0}{g}}.$$

Из выражения (17.5) в учебнике следует равенство $x_0 = \frac{mg}{k}$, поэтому получаем

$$t = 2\sqrt{\frac{mg}{kg}} = 2\sqrt{\frac{m}{k}},$$

а период колебаний равен:

$$T = 4t = 8\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Мы получили, что период колебаний тела на пружине должен быть прямо пропорционален квадратному корню из массы тела и обратно пропорционален квадратному корню из жёсткости пружины. Этот вывод подтверждается при строгом решении задачи о колебаниях тела на пружине, но коэффициент перед корнем оказывается несколько иным. Точная формула периода колебаний имеет вид

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Задача 17.1. Решение.
$k = 6$ Н/м,
$x = 10$ см $= 0{,}1$ м.

$$E_п = \frac{kx^2}{2},\quad E_п = \frac{6 \cdot 0{,}01}{2}\ \text{Дж} = 0{,}03\ \text{Дж}.$$

Задача 17.2. Решение.
$F = 40$ Н,
$x = 8$ см $= 0{,}08$ м.

$$E_п = \frac{kx^2}{2},\ k = \frac{F}{x},\ E_п = \frac{\frac{F}{x}x^2}{2} = \frac{Fx}{2},$$

$$A = E_п = \frac{40 \cdot 0{,}08}{2}\ \text{Дж} = 1{,}6\ \text{Дж}.$$

Задача 17.3. Решение.
$F = 100$ Н,
$x = 5$ см $= 0{,}05$ м,
$x_1 = 2$ см $= 0{,}02$ м,
$x_2 = 4$ см $= 0{,}04$ м.

$$A_1 = E_{п1} = \frac{kx_1^2}{2},\ k = \frac{F}{x},$$

$$E_п = \frac{\frac{F}{x}x_1^2}{2} = \frac{Fx_1^2}{2x},$$

$$A_1 = \frac{100 \cdot 0{,}0004}{2 \cdot 0{,}05}\ \text{Дж} = 0{,}4\ \text{Дж};$$

$$E_{п2} = \frac{kx_2^2}{2},\ k = \frac{F}{x},$$

$$E_п = \frac{\frac{F}{x}x_2^2}{2} = \frac{Fx_2^2}{2x},$$

$$E_{п2} = \frac{100 \cdot 0{,}0016}{2 \cdot 0{,}05}\ \text{Дж} = 1{,}6\ \text{Дж}.$$

Задача 17.4. Решение.
$x_2 = 2x_1$.

$$E_{п2} = \frac{kx_2^2}{2} = 4\frac{kx_1^2}{2} = 4E_{п1}.$$

Задача 17.5. Решение.
$x_1 = 5$ см $= 0{,}05$ м,
$x_2 = 2$ см $= 0{,}02$ м,
$E_{п1} = 10$ Дж.

$$E_{п2} = \frac{kx_2^2}{2},\ E_{п1} = \frac{kx_1^2}{2},\ k = \frac{2E_{п1}}{x_1^2},$$

$$E_{п2} = \frac{\frac{2E_{п1}}{x_1^2}x_2^2}{2} = E_{п1}\frac{x_2^2}{x_1^2},$$

$$E_{п2} = 10 \cdot \frac{0{,}0004}{0{,}0025}\ \text{Дж} = 1{,}6\ \text{Дж}.$$

Задача 17.6. Решение. По графику, изображённому на рисунке 17.5 учебника, определяем жёсткость пружины:

$$k = \frac{F_{упр}}{x},\ k = \frac{4}{0{,}05}\ \text{Н/м} = 80\ \text{Н/м}.$$

Вычисляем потенциальную энергию упругой деформации пружины при растяжении на $x_1 = 10$ см $= 0{,}1$ м:

$$E_п = \frac{kx_1^2}{2},\ E_п = \frac{80 \cdot 0{,}01}{2}\ \text{Дж} = 0{,}4\ \text{Дж}.$$

Дополнительные задачи

Задача 17.7. При подвешивании груза массой 2 кг стальная пружина в положении равновесия растянулась на 5 см. На сколько растянутся соединённые последовательно две такие пружины при подвешивании груза массой 4 кг?

Решение. Если масса пружины пренебрежимо мала по сравнению с массой груза, то на соединённые последовательно две пружины действуют одинаковые силы. Каждая пружина при увеличении массы груза в 2 раза растягивается в 2 раза больше, т. е. на 10 см. Общее растяжение двух пружин 20 см.

Задача 17.8. При подвешивании груза массой 1 кг стальная пружина в положении равновесия растянулась на 10 см. На сколько растянутся две такие пружины, соединённые параллельно, при подвешивании груза массой 2 кг?

Решение. На каждую из параллельно соединённых двух пружин действует сила, равная половине общей приложенной силы. Следовательно, при подвешивании груза массой 2 кг на каждую из параллельно соединённых пружин действует такая сила, как и при подвешивании груза массой 1 кг к одной пружине. Каждая пружина растянется на 10 см.

Задача 17.9. При подвешивании груза массой 1 кг стальная пружина в положении равновесия обладает потенциальной энергией упругой деформации, равной 10 Дж. Какой потенциальной энергией упругой деформации обладают в положении равновесия две такие пружины, соединённые параллельно, при подвешивании груза массой 2 кг?

Решение. На каждую из параллельно соединённых двух пружин действует сила, равная половине общей приложенной силы. Следовательно, при подвешивании груза массой 2 кг на каждую из параллельно соединённых пружин действует такая сила, как и при подвешивании груза массой 1 кг к одной пружине. Энергия каждой пружины равна 10 Дж. Энергия двух пружин равна 20 Дж.

Задача 17.10. При подвешивании груза массой 2 кг стальная пружина в положении равновесия обладает потенциальной энергией упругой деформации, равной 4 Дж. Какой потенциальной энергией упругой деформации обладают в положении равновесия две такие пружины, соединённые последовательно, при подвешивании груза массой 4 кг?

Решение. Если масса пружины пренебрежимо мала по сравнению с массой груза, то на последовательно соединённые две пружины действуют одинаковые силы. Каждая пружина при увеличении массы груза в 2 раза растягивается в 2 раза больше. Так как потенциальная энергия упругой деформации пропорциональна квадрату растяжения пружины, увеличение растяжения одной пружины в 2 раза приводит к увеличению потенциальной энергии упругой деформации в 4 раза, т. е. до 16 Дж. Энергия двух пружин равна 32 Дж.

§ 18. Закон сохранения механической энергии

Как показано в учебнике, при движении тела под действием силы тяжести сумма изменений его кинетической и потенциальной энергий равна нулю:

$$\Delta E_к + \Delta E_п = 0,$$

а сумма значений потенциальной и кинетической энергий остаётся постоянной:

$$E_к + E_п = \text{const}.$$

Точно такой же вывод справедлив и в случае действия сил упругости. Утверждение о постоянстве суммы кинетической и потенциальной энергий тела под действием силы тяжести и силы упругости называется законом **сохранения механической энергии**.

За формальной простотой вывода формул для вычисления кинетической и потенциальной энергий тел стоит непростая для понимания логическая задача. Если мы определяем работу как изменение кинетической энергии тела, а потенциальную энергию определяем как физическую величину, изменение которой равно изменению кинетической энергии с противоположным знаком, то закон сохранения механической энергии кажется лишь следствием этих определений понятий кинетической и потенциальной энергий.

Учителю не следует наталкивать учащихся на такую мысль, так как попытки дать ответы на неназревшие вопросы могут скорее запутать учащихся, чем объяснить суть дела. Однако, если подобные вопросы возникнут у кого-то из учащихся, учитель должен дать ответ по существу.

У школьников обычно складываются примерно такие представления о законе сохранения энергии:

«В природе есть разные виды энергии. Учёные научились измерять кинетическую энергию и потенциальную энергию, а потом сравнили изменения этих энергий в различных процессах и на основе экспериментов установили, что в любом процессе с участием гравитационных сил и сил упругости сумма потенциальной и кинетической энергий тел остаётся неизменной».

Такое представление о законе сохранения энергии можно признать удовлетворительным для школьника, но учителю физики необходимо разобраться в этой проблеме более глубоко. Между такими понятиями, как масса, сила, энергия, импульс, и такими понятиями, как Америка, планета Уран, электрон, есть существенное различие. Для открытия Америки нужно было переплыть Атлантический океан и увидеть её. Для открытия планеты Уран, не видимой невооружённым глазом, нужно было изготовить достаточно хороший телескоп, посмотреть в то место на небе, где находилась эта планета, и заметить её перемещение среди звёзд. Для открытия электрона нужно было обнаружить способность тел испускать частицы с отрицательными электрическими зарядами при нагревании или освещении, затем измерить заряд и массу этой частицы.

В каждом из этих примеров имеется предмет, объект, который можно каким-то образом обнаружить, чьи свойства можно экспериментально исследовать. В процессе изучения любого из предметов материального мира наши знания о нём пополняются и уточняются,

но сам факт существования изучаемых предметов остаётся неизменным.

С такими понятиями, как масса, сила, энергия, импульс, всё обстоит иначе. Соответствующие этим понятиям предметы, объекты реального мира никогда и никем не были открыты, не были и не будут обнаружены, так как таких предметов нет в реальном мире. Поэтому невозможно экспериментально исследовать свойства силы или массы, энергии или импульса для уточнения наших представлений о них, для разрешения споров о том, что же такое масса или энергия на самом деле.

Масса, сила, энергия, импульс не были открыты в каких-то опытах, а были «изобретены», введены человеком для теоретического описания и объяснения природных явлений, для установления количественных соотношений в форме физических законов. По мере исследования свойств объектов реального мира эти физические понятия изменяли для того, чтобы, применяя их, можно было более точно описать и теоретически объяснить реально наблюдаемые природные явления.

Понятие «энергия» было введено для количественного выражения одного из самых замечательных свойств мира, в котором мы живём, — движения материи. Движением в физике называют не только взаимное перемещение тел, но и любые другие изменения тел или систем тел.

Все опыты и наблюдения показывали, что движение тел никогда не исчезает бесследно, не породив какое-то другое движение, другое изменение в природе, и никакое движение не возникает беспричинно, без изменений движения других тел или в других телах. Поэтому возникло предположение о том, что любому движению в природе можно найти количественную меру, которая будет одинаковой при взаимных превращениях одного вида движения материи в любой другой его вид. История открытия закона сохранения и превращения энергии была историей поиска меры движения материи, сохраняющейся при взаимных превращениях любых форм её движения.

Закон сохранения энергии установлен экспериментально в том смысле, что все проведённые до сих пор опыты подтвердили правильность предположения о существовании единой сохраняющейся меры любой формы движения в материальном мире и позволили найти для каждой формы движения такое выражение, которое даёт количественное выражение сохраняющейся физической величины, названной энергией. Открытие закона сохранения энергии есть открытие одного из важнейших свойств мира, в котором мы живём, а «изобретение» теоретического понятия «энергия» позволило наглядно описать это свойство мира.

Выполнимость закона сохранения энергии в любых физических процессах нельзя доказать теоретически, сохранение и превращение энергии — опытный факт, характеризующий свойства нашего мира. Можно представить себе теоретически существование мира, в котором закон сохранения энергии в каких-то процессах не выполняется, но это будет уже мир с другими физическими законами.

Неоднократно высказывались сомнения в универсальности и всеобщей применимости закона сохранения энергии в нашем мире, но тщательно выполненные эксперименты до сих пор опровергали эти сомнения.

Особое внимание учащихся необходимо обратить на тот факт, что закон сохранения полной механической энергии выполняется лишь в инерциальных системах отсчёта при взаимодействиях тел только гравитационными силами, электростатическими силами и силами упругости.

Законы сохранения в механике. После изучения законов сохранения импульса и механической энергии можно предложить учащимся, интересующимся физикой, экспериментальное задание, не требующее никакого специального оборудования, но очень важное для понимания соотношения между двумя законами — законом сохранения импульса и законом сохранения энергии. Для постановки эксперимента необходимы только нить и кусок пластилина.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 18.2

Законы сохранения в механике

Оборудование: нить, пластилин, штатив с зажимами, измерительная линейка.

Задание. Изготовьте из пластилина два одинаковых шара и исследуйте, какая физическая величина сохраняется при столкновении этих шаров: mv или $\frac{mv^2}{2}$.

Содержание работы

В середине XVII в. на протяжении нескольких десятилетий продолжался спор среди учёных, какая физическая величина сохраняется при столкновении двух тел. Французский учёный Рене Декарт и его последователи считали сохраняющейся величиной сумму произведений масс тел на их скорости, т. е. сумму импульсов. Немецкий учёный Лейбниц считал, что при столкновении тел сохраняющейся величиной является произведение массы тела на квадрат скорости: mv^2. Это произведение он называл «живой силой». В современной физике эту величину называют кинетической энергией.

Вам предлагается на основе эксперимента разрешить спор между Декартом и Лейбницем.

Порядок выполнения задания

1. Закрепите вверху штатива горизонтально линейку. Изготовьте из пластилина два одинаковых шара диаметром примерно по 2 см. Возьмите нить длиной 1,6—1,8 м, свяжите её концы. Прорежьте нитью один пластилиновый шар до его диаметра и наденьте петлю нити на линейку. Изменяя высоту закрепления линейки или длину нити, добейтесь, чтобы шар мог совершать свободные колебания на нитях подвеса и его нижняя точка почти касалась поверхности стола. Затем возьмите другой шар и подвесьте его так, чтобы шары были расположены на одинаковой высоте и касались один другого (рис. 37).

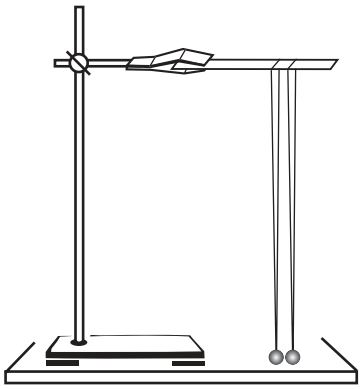

Рис. 37

2. Если один шар вывести из положения равновесия и затем отпустить, то этот шар будет двигаться по дуге окружности как маятник. Кинетическая энергия и импульс шара в момент столкновения с другим шаром будут зависеть от высоты h_1 его подъёма относительно положения равновесия.

По закону сохранения энергии при движении к положению равновесия потенциальная энергия шара превращается в кинетическую энергию:

$$mgh_1 = \frac{mv_1^2}{2}.$$

Из этого уравнения следует, что скорость v_1 первого шара в момент столкновения равна $v_1 = \sqrt{2gh_1}$, а импульс шара равен $mv_1 = m\sqrt{2gh_1}$.

Так как второй шар до столкновения был неподвижным, то общая кинетическая энергия двух шаров перед столкновением равна $E_{к1} = mgh_1$, а общий импульс перед столкновением равен:

$$p_1 = m\sqrt{2gh_1}.$$

После столкновения шары движутся в одном направлении и с одинаковой скоростью v_2. Сумма импульсов двух шаров после столкновения равна:

$$p_2 = mv_2 + mv_2 = 2mv_2.$$

Если сумма импульсов p_1 двух шаров до столкновения равна сумме импульсов p_2 двух шаров после столкновения, то скорость v_2 шаров после столкновения равна:

$$m\sqrt{2gh_1} = 2mv_2, \quad v_2 = \sqrt{\frac{gh_1}{2}}.$$

В этом случае кинетическая энергия двух шаров после столкновения равна:

$$E_{к2} = \frac{2mv_2^2}{2} = \frac{mgh_1}{2}.$$

Найдём высоту h_2 подъёма двух шаров после столкновения. По закону сохранения энергии потенциальная энергия $E_{п2}$ двух шаров при максимальном отклонении равна их кинетической энергии $E_{к2}$ после столкновения:

$$E_{п2} = E_{к2}, \; 2mgh_2 = \frac{mgh_1}{2}, \; h_2 = \frac{h_1}{4}.$$

Мы получили, что если прав Декарт и при столкновении неупругих пластилиновых шаров сохраняется импульс,

то высота h_2 максимального подъёма двух шаров после столкновения будет в 4 раза меньше высоты h_1 подъёма первого шара перед началом движения.

В случае сохранения кинетической энергии при столкновении кинетическая энергия $E_{к1}$ шаров до столкновения равна потенциальной энергии $E_{п1}$ первого шара перед началом движения: $E_{к1} = E_{к2}$ — и потенциальная энергия двух шаров при максимальном отклонении после столкновения равна их кинетической энергии $E_{к2}$ в нижней точке траектории: $E_{п2} = E_{к2}$. Из равенства $E_{п2} = E_{п1}$ следует: $2mgh_2 = mgh_1$.

Таким образом, $h_2 = \frac{h_1}{2}$.

Мы получили, что если прав Лейбниц и при столкновении неупругих пластилиновых шаров сохраняется кинетическая энергия, то высота h_2 максимального подъёма двух шаров после столкновения будет в 2 раза меньше высоты h_1 подъёма первого шара перед началом движения.

Чтобы узнать, кто же был прав, Декарт или Лейбниц, проведём эксперимент.

3. Для удобства проверки результатов эксперимента можно взять четыре деревянных бруска толщиной по 1,5 см и поставить их рядом с первым шаром. Одновременно с отклонением первого шара от положения равновесия будем перемещать бруски до тех пор, пока высота подъёма шара над поверхностью стола не станет равной толщине четырёх брусков (рис. 38).

Потом возьмём два бруска и, отклоняя второй шар в противоположную сторону, найдём такое положение этих брусков, при котором шар будет проходить над краем брусков на высоте

$$h_2 = \frac{h_1}{2}.$$

Затем возьмём один из брусков и найдём такое его положение, при котором второй шар будет проходить над его краем на высоте

$$h_2 = \frac{h_1}{4}.$$

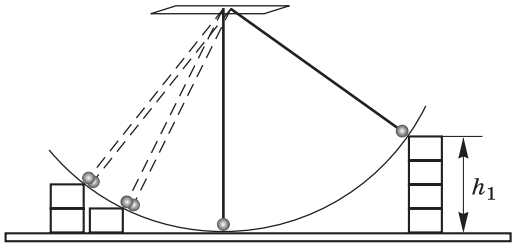

Рис. 38

Теперь остаётся только отклонить первый шар до подъёма на высоту h_1 у края четырёх брусков и отпустить его. Если после столкновения два шара отклонятся до края двух брусков, то прав Лейбниц; если же только до края одного бруска, то прав Декарт. Проведите опыт и сделайте вывод. Объясните результаты опыта.

Дополнительное задание

Проведите аналогичный эксперимент с двумя одинаковыми стальными шарами и объясните результаты опыта.

Решение задач. Важно не только понять и усвоить идею сохранения энергии, но и научиться применять закон сохранения механической энергии на практике. Эта практика для учащихся предоставляется в форме решения задач.

Решение задач на применение закона сохранения механической энергии необходимо начинать, как и решение любой задачи по механике, с выбора инерциальной системы отсчёта. Система тел, к которой следует применить закон сохранения механической энергии, должна быть замкнутой и в ней не должны действовать силы трения.

Далее нужно определить начальное и конечное положения взаимодействующих тел, выбрать нулевой уровень для отсчёта потенциальной энергии. Обычно удобно принимать за нулевой уровень минимальный запас потенциальной энергии. Применив закон сохранения механической энергии, можно найти неизвестную величину.

Если в системе действуют силы трения или происходит неупругое столкновение тел, то часть энергии превращается во внутреннюю энергию тела. Количество теплоты Q, выделившееся при этом, можно найти как разность значений полной механической энергии E_1 в начальном состоянии и энергии E_2 в конечном состоянии:

$$Q = E_1 - E_2.$$

В отличие от закона сохранения механической энергии закон сохранения импульса выполняется в инерциальных системах отсчёта при взаимодействиях тел любыми силами, в том числе и си-

лами трения, и при превращениях механической энергии в другие виды энергии. Эта универсальность закона сохранения импульса позволяет использовать его для вычисления части механической энергии, превратившейся при взаимодействии в другие виды энергии.

Дополнительные задачи

Задача 18.1. Камень брошен со скоростью 20 м/с под углом к горизонту. Чему равна скорость камня в тот момент времени, когда его расстояние от поверхности земли увеличилось на 7,2 м по сравнению с начальным значением?

Решение. По закону сохранения механической энергии при движении под действием силы тяжести изменение потенциальной энергии камня равно по модулю изменению его кинетической энергии и противоположно по знаку:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}, \quad mg\Delta h = -\left(\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}\right).$$

Отсюда искомая скорость камня равна:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2g\Delta h},$$

$$v_2 = \sqrt{400 - 2 \cdot 10 \cdot 7{,}2}\ \text{м/с} = 16\ \text{м/с}.$$

Задача 18.2. Камень брошен со скоростью 15 м/с под углом к горизонту. На сколько увеличилось его расстояние от поверхности земли в тот момент, когда его скорость была равна 5 м/с?

Решение. По закону сохранения механической энергии при движении под действием силы тяжести изменение потенциальной энергии камня равно по модулю изменению его кинетической энергии и противоположно по знаку:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}, \ mg\Delta h = -\left(\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}\right).$$

Отсюда изменение расстояния камня от земли равно:

$$\Delta h = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}, \ \Delta h = \frac{225 - 25}{20}\ \text{м} = 10\ \text{м}.$$

Задача 18.3. В космическом корабле помещены два шара массами 1 и 2 кг. Между ними находится пружина жёсткостью 600 Н/м, сжатая на 0,1 м. Чему равны скорости шаров после распрямления пружины. Массой пружины пренебречь.

Решение. По закону сохранения механической энергии при движении под действием силы упругости изменение потенциальной энергии сжатой пружины равно по модулю сумме изменений кинетической энергии шаров:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}, \quad \frac{kx^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}.$$

По закону сохранения импульса сумма импульсов шаров до взаимодействия (равная нулю) равна сумме их импульсов после взаимодействия:

$$0 = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2, \ m\vec{v}_1 = -m\vec{v}_2.$$

Из этих двух уравнений по известным значениям масс шаров, жёсткости пружины и её деформации найдём модули скоростей шаров:

$$v_1 = \frac{m_2 v_2}{m_1}, \ \frac{kx^2}{2} = \frac{m_1\left(\frac{m_2 v_2}{m_1}\right)^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} =$$

$$= \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_2 v_2^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_2 v_2^2}{2}\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right),$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{kx^2}{m_2\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)}},$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{600 \cdot 0{,}01}{2\left(1 + \frac{2}{1}\right)}}\ \text{м/с} = 1\ \text{м/с},$$

$$v_1 = \frac{m_2 v_2}{m_1}, \ v_1 = \frac{2 \cdot 1}{1}\ \text{м/с} = 2\ \text{м/с}.$$

Задача 18.4. Для растяжения недеформированной пружины на 1 см необходимо совершить работу, равную 1 Дж. Какую работу надо совершить для растяжения пружины ещё на 1 см?

Решение. Работа по растяжению пружины ещё на 1 см равна изменению потенциальной энергии упругой деформации пружины, т. е. разности потенциальной энергии упругой деформации пружины при растяжении на 2 см и потенциальной энергии упругой деформации при растяжении на 1 см:

$$A = E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1} = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}.$$

Жёсткость пружины найдём по известному значению энергии пружины при деформации на 1 см:

$$A_1 = E_{\text{п}1} = \frac{kx_1^2}{2}, \ k = \frac{2A_1}{x_1^2},$$

$$k = \frac{2 \cdot 1}{0{,}0001}\ \text{Н/м} = 20\ 000\ \text{Н/м}.$$

Искомая работа равна:

$$A = \frac{20\ 000 \cdot 0{,}0004}{2}\ \text{Дж} - 1\ \text{Дж} = 3\ \text{Дж}.$$

Задача 18.5. Небольшой груз привязан к нити длиной l и отклонён от положения равновесия на угол α. Чему равна максимальная скорость груза при его колебаниях как маятника?

Решение. По закону сохранения механической энергии при движении под действием силы тяжести изменение потенциальной энергии груза равно по модулю изменению его кинетической энергии:

$$\Delta E_п = -\Delta E_к,\ mg\Delta h = \left(\frac{mv^2}{2} - 0\right) = \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда скорость при прохождении положения равновесия равна:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

В примере решения задачи § 18 учебника было получено выражение для определения высоты h подъёма маятника по известным значениям его длины l и угла α:

$$h = l\ (1 - \cos\alpha).$$

Вычисляем максимальную скорость груза: $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl\ (1 - \cos\alpha)}$.

Задача 18.6. Небольшое тело соскальзывает без трения с высоты H по наклонной плоскости и движется в кольце радиусом R. На какой высоте h тело оторвётся от кольца, если $H = 2R$?

Решение. По второму закону Ньютона в любой точке траектории движения по окружности выполняется равенство (рис. 39)

$$ma = F_{упр} + mg\sin\alpha.$$

Отрыв тела от кольца происходит, если сила упругости $F_{упр}$, действующая со стороны кольца, становится равной нулю: $F_{упр} = 0$, $a = \frac{v^2}{R}$, $\frac{v^2}{R} = g\sin\alpha$, $v^2 = gR\sin\alpha = g\ (h - R)$.

По закону сохранения механической энергии для начального и конечного положений тела имеем:

$$\Delta E_п + \Delta E_к = 0,\ mg\ (h - 2R) + \frac{mv^2}{2} = 0.$$

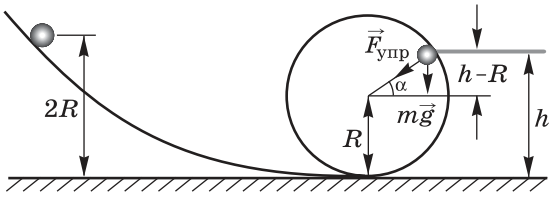

Рис. 39

Отсюда следует равенство

$$2g\ (h - 2R) = g\ (R - h),\ h = \frac{5}{3}R.$$

Задача 18.7. Тело массой 1 кг вращается в вертикальной плоскости на шнуре так, что в верхней точке круговой траектории сила натяжения нити равна нулю. Чему будет равна сила натяжения нити в нижней точке траектории, если тело будет двигаться по инерции? Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с^2.

Решение. Обозначим скорости тела в нижней и верхней точках его траектории через v_1 и v_2. Изменение кинетической энергии тела происходит только под действием силы тяжести, так как работа силы упругости нити при угле 90° между векторами силы и скорости равна нулю. Поэтому к системе тело — Земля применим закон сохранения механической энергии. За нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии примем нижнее положение тела:

$$E_{к_1} + E_{п_1} = E_{к_2} + E_{п_2},$$

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + mg \cdot 2l,$$

где l — длина нити. Отсюда следует:

$$v_1^2 = v_2^2 + 4gl. \qquad (1)$$

По второму закону Ньютона для нижней точки траектории выполняется равенство

$$T - mg = m\frac{v_1^2}{l},\ T = m\left(g + \frac{v_1^2}{l}\right), \qquad (2)$$

а для верхней точки траектории — равенство

$$T + mg = m\frac{v_2^2}{l},$$

где T — сила упругости нити.

При минимально возможной скорости v_2 для прохождения телом верхней точки центростремительное ускорение телу должна сообщить только сила тяжести, т. е.

$$T = 0,\ v_2^2 = gl. \qquad (3)$$

Из уравнений (1) и (3) получаем

$$v_1^2 = 5gl, \qquad (4)$$

а из равенств (2) и (4) получаем

$$T = m\left(g + \frac{5gl}{l}\right) = 6mg,$$

$$T = 6 \cdot 1 \cdot 10\ Н = 60\ Н.$$

Задача 18.8. Первый шар массой m_1 движется со скоростью $\vec{v}$ и сталкивается со вторым, неподвижным шаром массой m_2. Найдите значения скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ шаров после упругого центрального столкновения. Определите долю энергии, переданной второму шару в результате столкновения. Центральным называется такое столкновение, при котором векторы скоростей шаров до столкновения находятся на прямой, соединяющей центры шаров.

Решение. При любом столкновении тел выполняется закон сохранения импульса.

Для проекций на направление вектора $\vec{v}$ согласно этому закону выполняется равенство

$$m_1 v = m_1 v_1 + m_2 v_2.$$

При упругом столкновении выполняется и закон сохранения механической энергии:

$$\frac{m_1 v^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}.$$

Обозначив отношение масс как

$$k = \frac{m_2}{m_1}$$

из двух уравнений получим

$$v = v_1 + k v_2, \qquad (1)$$

$$v^2 = v_1^2 + k v_2^2. \qquad (2)$$

Из уравнения (1) следует:

$$v^2 = v_1^2 + 2k v_1 v_2 + k^2 v_2^2. \qquad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) следует:

$$v_1^2 + k v_2^2 = v_1^2 + 2k v_1 v_2 + k^2 v_2^2,$$

$$v_1 = \frac{1-k}{2} v_2. \qquad (4)$$

Из уравнений (1) и (4) находим значения скоростей:

$$v_2 = \frac{2}{1+k} v, \; v_1 = \frac{1-k}{1+k} v.$$

Задача 18.9. Рассчитайте значение третьей космической скорости, достаточной для преодоления действия сил притяжения Солнца и выхода за пределы Солнечной системы.

Решение. Для того чтобы покинуть пределы Солнечной системы с орбиты Земли, космическая ракета массой m должна обладать скоростью v_{3C} относительно Солнца, определяемой законом сохранения энергии:

$$\frac{m v_C^2}{2} - G\frac{m M_C}{R_{3C}} = 0,$$

где M_C — масса Солнца, равная $2 \cdot 10^{30}$ кг; $R_З$ — радиус земной орбиты, равный $1{,}5 \cdot 10^{11}$ м. Из этого выражения найдём скорость ракеты относительно Солнца:

$$v_C = \sqrt{\frac{2GM_C}{R_З}},$$

$$v_C \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{1{,}5 \cdot 10^{11}}} \text{ м/с} \approx$$

$$\approx 4{,}22 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

Вследствие равномерного движения вместе с Землёй по примерно круговой орбите вокруг Солнца ракета уже обладает скоростью, которую можно найти, применив второй закон Ньютона:

$$G\frac{m M_C}{R_З^2} = \frac{m v_З^2}{R_З},$$

$$v_З = \sqrt{\frac{G M_C}{R_З}} \approx 2{,}98 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

Следовательно, при разгоне ракеты в направлении вектора скорости движения Земли по её орбите вокруг Солнца дополнительная скорость $v_д$ космической ракеты относительно Земли для выхода за пределы Солнечной системы должна быть равна $v_д = v_C - v_З \approx 1{,}24 \cdot 10^4$ м/с.

Для того чтобы удалить корабль из поля тяготения Земли, ему надо сообщить вторую космическую скорость $v_П = 1{,}12 \cdot 10^4$ м/с (её мы рассчитали в § 18 учебника). Кинетическая энергия $E_З$, которую надо сообщить космическому кораблю, для того чтобы он покинул Солнечную систему, складывается из кинетической энергии E_2, необходимой для того, чтобы его удалить из поля тяготения Земли (вторая космическая скорость), и кинетической энергии E_1, необходимой для того, чтобы он с орбиты Земли ушёл на бесконечное расстояние от Солнца:

$$E_З = E_2 + E_1, \; \frac{m v_З^2}{2} = \frac{m v_2^2}{2} + \frac{m v_д^2}{2}.$$

Отсюда получаем

$$v_З = \sqrt{v_2^2 + v_д^2} \approx$$

$$\approx \sqrt{(1{,}12 \cdot 10^4)^2 + (1{,}24 \cdot 10^4)^2} \text{ м/с} \approx$$

$$\approx 1{,}67 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

§ 19. Закон сохранения энергии в тепловых процессах

Идею об эквивалентности теплоты и работы примерно в одно и то же время высказали независимо друг от друга несколько учёных в разных странах. В 1824 г. французский инженер Сади Карно опубликовал свой труд «Размышления о движущей силе огня», где обратил внимание на тот факт, что получение движения в тепловых машинах всегда связано с переходом теплоты от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой.

Исходя из принципа невозможности вечного двигателя, Карно доказал, что для получения работы в тепловой машине необходимо иметь два тела с различными температурами, а максимальный КПД тепловой машины определяется значениями температур нагревателя и холодильника. Карно пришёл к следующему выводу на природу теплоты: «Тепло — это не что иное, как движущая сила, или, вернее, движение, изменившее свой вид. Это — движение частиц тел. Повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратно, всегда при исчезновении теплоты возникает движущая сила. Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она, собственно говоря, никогда не создаётся, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, то есть вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает».

В 1842 г. немецкий врач Роберт Майер опубликовал статью о взаимных превращениях механического движения тел в теплоту и теплоты в механическое движение, в которой фактически сформулировал закон сохранения и превращения энергии. Однако идея сохранения и превращения энергии не была сразу понята и принята современниками прежде всего потому, что ещё не было сформировано понятие энергии, не употреблялось и само слово «энергия». В своей статье Майер говорил лишь о движениях и силах, но словом «сила» он обозначал понятие, которое мы теперь называем энергией.

Майер сумел вычислить механический эквивалент теплоты, не проводя новых экспериментов. Для этого он воспользовался многократно измеренными значениями теплоёмкости воздуха при постоянном давлении c_p и при постоянном объёме c_V. Таким образом, экспериментальные результаты, необходимые для определения механического эквивалента теплоты, были получены ранее, но теоретически осмыслил эти результаты первым Майер.

Английский учёный Джеймс Джоуль в 1843 г. впервые экспериментально установил значение механического эквивалента теплоты с помощью калориметра, внутри которого на вертикальной оси были укреплены восемь рядов лопастей.

Герман Гельмгольц в 1847 г. расширил понятие энергии как сохраняющейся физической величины не только в механических и тепловых, но вообще в любых природных процессах. В своей работе «О сохранении силы» Гельмгольц писал: «Мы исходим из допущения, что невозможно при существовании любой произвольной комбинации тел природы получать непрерывно из ничего движущую силу...»

Немецкий физик Рудольф Клаузиус заметил, что постоянство соотношения между затраченной работой и полученной теплотой соблюдается лишь при циклических процессах, в которых исследуемое тело после ряда изменений возвращается в первоначальное состояние. Если же сравнить количество теплоты, передаваемое пару, с количеством теплоты, передаваемым кипящей воде и пару, то во втором случае при совершении одинаковой работы происходят значительно бóльшие затраты количества теплоты. Для объяснения этого факта Клаузиус ввёл понятие внутренней энергии. При нагревании воды теплота частично преобразуется во внешнюю работу расширения пара, а частично во внутреннюю энергию пара. Эту энергию пар возвращает в виде тепла при конденсации. С введением понятия внутренней энергии принцип эквивалентности теплоты и работы получил точное выражение.

Задача 19.1. Решение. Для решения задачи примем значение начальной температуры пули равным 27 °C, ко-

нечное значение равно 327 °С. Отсюда изменение температуры пули равно $\Delta t = 300$ °С:

$$\frac{mv^2}{2} = cm\Delta t + \lambda m,\ v = \sqrt{2\,(c\Delta t + \lambda)},$$

$$v = \sqrt{2\,(130 \cdot 300 + 25\,000)}\ \text{м/с} \approx 358\ \text{м/с}.$$

Задача 19.2. Решение.

$$mgh = cm\Delta t + rm,\ h = \frac{c\Delta t + r}{g},$$

$$h = \frac{4200 \cdot 75 + 2\,256\,000}{9{,}8}\ \text{м} \approx$$

$$\approx 262\,000\ \text{м} \approx 262\ \text{км}.$$

Задача 19.3. Решение. Изобретатели считали, что в первом «двигателе» при вращении колеса по часовой стрелке металлические шары на правой стороне будут отбрасываться центробежной силой от оси вращения. Из-за увеличения расстояния от оси вращения будет возрастать момент сил, вращающих колесо по часовой стрелке и поддерживающих вращение колеса. Во втором варианте четыре шара на левой наклонной плоскости должны тянуть соединяющую цепь сильнее, чем два шара на правой наклонной плоскости, и все шары должны вечно двигаться против часовой стрелки. В последнем варианте отбрасываемые от оси вращения центробежной силой грузы справа должны поддерживать вращение системы по часовой стрелке. Изобретатели не умели находить равнодействующую нескольких векторов, рассчитывать суммы моментов сил. Во всех случаях равнодействующая сил равна нулю и суммы моментов сил равны нулю.

Дополнительные задачи

Задача 19.4. Поверхность Земли нагревается солнечным светом, от неё происходит теплопередача воздуху. Нагретый воздух расширяется при постоянном атмосферном давлении. Вычислите изменение внутренней энергии 1 м^3 воздуха при нагревании на 10 °С в таком процессе. Удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении 1005 Дж/(кг · °С), плотность воздуха 1,2 кг/м^3, атмосферное давление 10^5 Па.

При постоянном давлении нагревание воздуха на 1 °С приводит к увеличению его объёма на 0,366%.

Решение. Изменение внутренней энергии ΔU воздуха в результате получения количества теплоты Q и совершения работы A над внешними телами определяется уравнением (19.2)

$$\Delta U = Q - A.$$

Количество теплоты равно:

$$Q = c_p m\Delta t = c_p \rho V \Delta t =$$

$$= 1005 \cdot 1{,}2 \cdot 1 \cdot 10 = 12\,060\ \text{Дж}.$$

Работа воздуха в процессе расширения при постоянном давлении равна произведению давления p на изменение объёма ΔV:

$$A = p\Delta V.$$

При нагревании на 10 °С изменение объёма воздуха равно 3,66% от 1 м^3, т. е.

$$\Delta V = 0{,}0366\ \text{м}^3.$$

Работа воздуха равна:

$$A = 10^5 \cdot 0{,}0366\ \text{Дж} = 3660\ \text{Дж}.$$

Изменение внутренней энергии воздуха равно:

$$\Delta U = 12\,060\ \text{Дж} - 3660\ \text{Дж} = 8400\ \text{Дж}.$$

Задача 19.5. Известно, что при постоянном давлении нагревание воздуха на 1 °С приводит к увеличению объёма на 0,366% от его значения при 0 °С. Удельная теплоёмкость воздуха в процессе нагревания при постоянном нормальном давлении 101 325 Па равна $c_p = 240$ кал/(кг · °С). В процессе нагревания при постоянном объёме воздуха его удельная теплоёмкость равна $c_V = 171$ кал/(кг · °С). Плотность воздуха при нормальном давлении равна 1,29 кг/м^3.

Используя эти данные, попробуйте самостоятельно вычислить значение механического эквивалента теплоты.

Эту задачу впервые решил немецкий учёный Роберт Майер в 1842 г. и сделал вывод о существовании в природе закона сохранения и превращения энергии.

Решение. Для экспериментального определения механического эквивалента теплоты нужно найти, какую работу, выраженную в джоулях, может совершить тело за счёт внутренней энергии, полученной путём теплопередачи количества теплоты в одну калорию.

Результаты измерений удельной теплоёмкости воздуха при постоянном объёме c_V и при постоянном давлении c_p можно использовать как результаты экспериментов по определению механического эквивалента теплоты.

По закону сохранения и превращения энергии (19.2) количество теплоты Q, переданное телу, связано с изменением внутренней энергии ΔU и работой A, совершённой телом:

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Используя это выражение, найдём количество теплоты Q_1 в процессе нагревания воздуха при постоянном давлении:

$$Q_1 = \Delta U_1 + A_1 \quad (2)$$

и количество теплоты Q_2 в процессе нагревания воздуха при постоянном объёме:

$$Q_2 = \Delta U_2 + A_2. \quad (3)$$

Если температура воздуха в первом и втором случаях изменялась одинаково, то одинаковы и изменения внутренней энергии воздуха:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2. \quad (4)$$

В процессе нагревания воздуха при постоянном объёме воздух не совершает работу над внешними телами:

$$A_2 = 0. \quad (5)$$

Из выражений (2) — (5) следует, что работа A_1 в процессе расширения газа при постоянном давлении равна разности количеств теплоты Q_1 и Q_2:

$$Q_1 - Q_2 = A_1. \quad (6)$$

Мы получили выражение, связывающее количества теплоты, полученные при одинаковом нагревании воздуха при постоянном давлении Q_1 и постоянном объёме Q_2, с работой A_1, совершённой воздухом в процессе нагревания воздуха при постоянном давлении.

Найдём разность количеств теплоты Q_1 и Q_2 при нагревании 1 кг воздуха на 1 °C:

$$Q_1 - Q_2 = c_p m\Delta t - c_V m\Delta t = \\ = (c_p - c_V)\, m\Delta t.$$

Обозначим через Q разность $Q_1 - Q_2$ и вычислим её значение:

$$Q = Q_1 - Q_2 = \\ = (240 - 171) \cdot 1 \cdot 1 \text{ кал} = 69 \text{ кал}.$$

Найдём работу A_1, совершённую 1 кг воздуха при нормальном давлении 101 325 Па в процессе нагревания на 1 °C. Для этого представим себе, что воздух находится в цилиндре, закрытом подвижным поршнем площадью поперечного сечения S. Сила F давления воздуха на поршень равна $F = pS$. При расширении воздуха поршень под действием силы давления перемещается на некоторое расстояние l. Сила давления F при таком перемещении поршня совершает работу:

$$A_1 = Fl = pSl.$$

Произведение Sl равно изменению объёма ΔV воздуха при расширении:

$$Sl = \Delta V,$$

следовательно, работа A_1 воздуха в процессе расширения при постоянном давлении равна произведению давления p воздуха на изменение его объёма ΔV:

$$A_1 = p\Delta V.$$

Для вычисления работы A_1, совершённой 1 кг воздуха при нагревания на 1 °C, найдём изменение объёма ΔV воздуха. Объём 1 кг воздуха равен:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1 \text{ кг}}{1{,}29 \text{ кг/м}^3} \approx 0{,}7752 \text{ м}^2.$$

Так как в процессе нагревания на 1 °C при постоянном давлении объём воздуха увеличивается на 0,366% от его значения при 0 °C, изменение объёма равно:

$$\Delta V \approx 0{,}7752 \cdot 0{,}00366 \text{ м}^3 \approx 0{,}002837 \text{ м}^3.$$

Вычисляем работу воздуха:

$$A_1 = p\Delta V \approx \\ \approx 101\,325 \text{ Па} \cdot 0{,}002837 \text{ м}^3 \approx 287{,}5 \text{ Дж}.$$

Вычислим отношение совершённой работы к количеству теплоты Q, затраченному на совершение этой работы:

$$\frac{A_1}{Q} = \frac{287{,}5 \text{ Дж}}{69 \text{ кал}} \approx 4{,}2 \text{ Дж/кал}.$$

Мы получили, что механический эквивалент теплоты равен примерно 4,2 Дж/кал. Это значит, что теплопередача телу 1 кал количества теплоты может изменить внутреннюю энергию тела точно так же, как совершение над телом механической работы, равной 4,2 Дж.

§ 20. Принцип работы тепловых машин

Изучение этой темы целесообразно провести в виде конференции с докладами учащихся и обсуждением каждого из докладов. Темы докладов нужно распределить по желанию учащихся заранее, за две-три недели. Минимальный набор тем и краткие материалы по ним представлены в учебнике. Дополнительные темы могут предложить сами учащиеся.

При подготовке докладов желательно использовать материалы из Интернета: их легче обрабатывать, во многих из них имеются иллюстрации и видеофрагменты. Например, при подготовке сообщений об истории изобретения паровых машин можно найти интересные материалы по адресу:

http://www.critical.onego.ru/critical/calendar/1901watt.htm.

При изучении двигателей внутреннего сгорания важно обратить особое внимание на физические принципы их работы, преимущества и недостатки различных типов двигателей, экологические проблемы, связанные с широким использованием тепловых машин.

Тест 2

Законы сохранения

Часть 1

А1. Всякое тело движется равномерно и прямолинейно, если

1) равнодействующая приложенных к нему сил отлична от нуля и вектор равнодействующей силы направлен параллельно вектору скорости
2) равнодействующая приложенных к нему сил отлична от нуля и вектор равнодействующей силы направлен противоположно вектору скорости
3) на него не действуют другие тела или их действия компенсируют друг друга
4) равнодействующая приложенных к нему сил отлична от нуля и вектор равнодействующей силы направлен перпендикулярно вектору скорости

А2. Масса тела

1) является только мерой инертности тела
2) является только мерой способности тела к гравитационному взаимодействию
3) является мерой инертности тела и его способности к гравитационному взаимодействию
4) не связана с инертностью тела и его способностью к гравитационному взаимодействию

А3. Утверждение, что при взаимодействии тела действуют друг на друга силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению, называется

1) первым законом Ньютона
2) вторым законом Ньютона
3) третьим законом Ньютона
4) законом сложения сил

А4. На рисунке 40 представлены траектория движения мяча после броска под углом к горизонту и направления векторов скорости $\vec{v}$ и ускорения $\vec{a}$

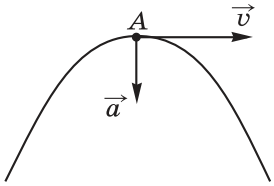

Рис. 40

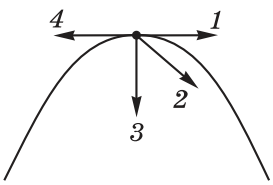

Рис. 41

шара в точке A. Какое из показанных на рисунке 41 направлений имеет вектор $\vec{F}$ равнодействующей всех сил, действующих на мяч в этой точке?

1) *1* 3) *3*
2) *2* 4) *4*

А5. У земной поверхности Земля действует на человека силой тяготения, направленной вертикально вниз. По третьему закону Ньютона равной по модулю силой противодействия является сила

1) упругости, приложенная к человеку и направленная вертикально вверх
2) упругости, приложенная к Земле и направленная вертикально вниз
3) тяготения, приложенная к Земле и направленная вертикально вверх
4) тяготения, приложенная к Земле и направленная вертикально вниз

А6. На рисунке 42 представлены три вектора сил, лежащие в одной плоскости и приложенные к одной точке тела. Модуль вектора $\vec{F}_1$ равен 4 Н. Модуль равнодействующей этих трёх сил равен

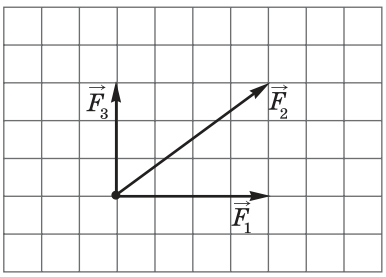

Рис. 42

1) 12 Н
2) 10 Н
3) 5 Н
4) 20 Н
5) 0

А7. Сила гравитационного притяжения космонавта на поверхности Земли равна 800 Н. Чему будет равна сила притяжения космонавта на поверхности планеты, масса которой в 300 раз больше массы Земли и радиус которой в 10 раз больше радиуса Земли?

1) 24 000 000 Н
2) 2 400 000 Н
3) 24 000 Н
4) 2400 Н

А8. Брусок массой m перемещается на расстояние s по прямой на горизонтальной поверхности под действием силы $\vec{F}$, направленной под углом α к горизонту (рис. 43). Коэффициент трения равен μ. Чему равна работа силы тяжести бруска на этом пути?

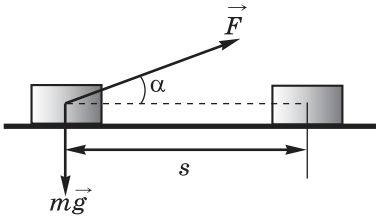

Рис. 43

1) $-\mu mgs$
2) $-\mu\,(mg - F\sin\alpha)\,s$
3) $\mu\,(mg - F\sin\alpha)\,s$
4) $Fs \cdot \cos\alpha$
5) 0

А9. Тело массой 20 кг свободно падает под действием силы тяжести. Какую работу совершила сила тяжести при увеличении скорости тела от 1 до 4 м/с?

1) 300 Дж
2) 180 Дж
3) 150 Дж
4) 90 Дж

А10. При растяжении первоначально недеформированной пружины жёсткостью 800 Н/м на 10 см её потенциальная энергия упругой деформации становится равной

1) 80 000 Дж
2) 40 000 Дж
3) 8 Дж
4) 4 Дж

А11. Если принять потенциальную энергию тела массой 5 кг на поверхности Земли равной нулю, то при ускорении свободного падения 10 м/с^2 на высоте 20 м потенциальная энергия тела будет равна

1) 10 Дж
2) 50 Дж
3) 100 Дж
4) 1000 Дж

А12. При сжатии газа в цилиндре внешние силы совершили над газом работу, равную 200 Дж, газ путём теплопередачи отдал окружающим телам количество теплоты, равное 100 Дж. 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 впишите полученные ответы на поставленные вопросы без записи хода решения.

В1. Ракета массой 50 кг стартует вертикально вверх. С каким ускорением начинает ракета движение, если сила тяги её реактивного двигателя 1500 Н? Ускорение свободного падения 10 м/с^2. Ответ запишите в виде числа (в м/с^2). [20]

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 космического корабля? Масса космонавта 100 кг. Значение массы корабля запишите в виде числа (в кг). [7000]

В3. Вагон массой 5 т при движении со скоростью 1 м/с сталкивается с неподвижным вагоном такой же массы, сцепляется с ним, и далее они движутся вместе. Чему равно количество теплоты, выделившееся при сцеплении вагонов? Ответ запишите в виде числа (в Дж). [1250]

Глава 3

Квантовые явления

§ 21. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома

Изучение квантовых явлений начинается с ознакомления с историей открытия сложного строения атома и свойствами частиц, из которых состоит атом. Для понимания принципиальной новизны результатов опыта Резерфорда по исследованию явления рассеяния альфа-частиц в веществе целесообразно познакомить учащихся с историей открытия электрона, начиная с работ Фарадея по электролизу, и с моделью атома по Дж. Дж. Томсону.

Выполнение экспериментального задания 21.1 по измерению элементарного электрического заряда направлено на выяснение смысла открытия Фарадея. Если фронтальное выполнение этого эксперимента затруднено, то этот эксперимент можно провести коллективно с одним комплектом оборудования на демонстрационном столе учителя и с записью результатов эксперимента на классной доске и в тетрадях учащихся.

Если в комплекте оборудования кабинета физики есть спинтарископ, то перед рассказом об опыте Резерфорда нужно обязательно дать возможность учащимся самим увидеть, какие вспышки света вызывает одна сверхмикроскопическая альфа-частица. Нужно помнить, что наблюдение сцинтилляций в спинтарископе возможно только в затемнённом помещении после адаптации глаза к темноте.

Сведения из истории открытия сложного строения атома, приведённые в учебнике, можно дополнить более подробным рассказом об истории открытия атомного ядра. Ниже дан материал для такого рассказа.

Открытие атомного ядра

Чтобы делать открытия, нужно уметь задавать вопросы Природе и понимать её ответы.

История открытия атомного ядра, как и многих других открытий, начиналась со случайного наблюдения неожиданного явления. Эрнест Резерфорд исследовал прохождение альфа-частиц через газы и тонкие слои металлов. Опыты показали, что и в газах, и в твёрдых телах альфа-частицы движутся практически прямолинейно, отклоняясь от первоначального направления движения лишь на несколько градусов. Такой результат не вызывал особого удивления, так как альфа-частицы движутся со скоростями порядка 10 000 километров в секунду. Для того чтобы отклонить так быстро движущийся «снаряд» от первоначального направления движения, нужны очень большие силы.

На этом этапе экспериментов сотрудник лаборатории Гейгер, изобретатель счётчика Гейгера, обратился к своему шефу Резерфорду с вопросом, не пора ли стажеру Марсдену дать какую-нибудь небольшую тему для самостоятельного экспериментального исследования. Резерфорд согласился и сказал: «Почему бы ему не посмотреть, не рассеиваются ли α-частицы на большие углы?»

Марсден провёл серию наблюдений и сообщил результат: да, изредка наблюдаются альфа-частицы, отражающиеся от золотой фольги в обратном направлении. Резерфорд посоветовал хорошенько почистить стенки экспериментальной установки, чтобы проверить,

не вызваны ли наблюдаемые редкие вспышки загрязнением стенок прибора радиоактивным веществом, и повторить наблюдения. Повторные наблюдения подтвердили существование отражённых частиц. Тогда Резерфорд сам повторил все наблюдения и спланировал дальнейшие исследования для изучения зависимости числа рассеянных частиц от угла рассеяния.

Итак, случай в виде удачной задачи, полученной от Резерфорда, пришёл к Марсдену, и он наблюдал новое явление. В своей статье Гейгер и Марсден сообщили о наблюдении обратного рассеяния альфа-частиц. Однако атомного ядра они не открыли, хотя держали это открытие в своих руках.

Атомное ядро открыл Резерфорд. Вот как рассказал об этом открытии Гейгер: «Однажды Резерфорд вошёл в мою комнату, очевидно, в прекрасном расположении духа и сказал: „Теперь я знаю, как выглядит атом!“»

Как же разгадал Резерфорд внутреннее строение атома? Он узнал из результатов опытов Марсдена и Гейгера, что некоторые альфа-частицы, примерно одна из восьми тысяч, отражаются от листочка золотой фольги в обратном направлении. Зная массу и скорость альфа-частицы, можно оценить радиус шара, в котором должны быть сконцентрированы электрический заряд и масса для такого отражения. И эта оценка дала Резерфорду значение порядка 10^{-15} м, что примерно в 100 тысяч раз меньше радиуса атома.

Затем на основании гипотезы о существовании ядра внутри атома Резерфорд вывел формулу для расчёта числа частиц, рассеиваемых на разные углы, и вычислил ожидаемое число частиц, рассеиваемых под разными углами. Зависимости числа рассеивающихся частиц от угла рассеяния при расчётах на основании модели атома Томсона и ядерной модели Резерфорда были совершенно разными. Если прав Резерфорд и атом имеет очень маленькое массивное ядро, то число рассеиваемых частиц должно убывать обратно пропорционально четвёртой степени синуса половины угла рассеяния. Гейгер и Марсден провели новую серию экспериментов с подсчётами альфа-частиц, рассеиваемых на разные углы. В опытах они использовали серебряную и золотую фольгу, изменяли толщину фольги и во всех экспериментах установили полное соответствие наблюдаемого распределения частиц в зависимости от угла рассеяния с предсказанным теорией Резерфорда. Вот теперь Резерфорд мог сказать, что он знает, как выглядит атом.

Позднее, вспоминая о том, как было сделано открытие, Резерфорд сказал: «Я должен признаться по секрету, что не верил, будто это возможно... Это было, пожалуй, самым невероятным событием, какое я когда-либо переживал в моей жизни. Это было столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас» (рис. 44).

Рис. 44

История открытия атомного ядра показывает, что Природа не скрывает от Человека свои тайны, она всегда готова правдиво ответить на правильно заданные ей вопросы. Но она никогда не даёт случайному человеку готовых ответов на важные свои тайны. Каждый её ответ на вопрос сам есть новая загадка, и разгадать смысл ответа может лишь человек, достойный такого открытия.

Резерфорд, без сомнения, был именно таким человеком, который умел задавать вопросы Природе и умел понимать её ответы. Он первым разгадал природу альфа- и бета-излучений, первым доказал, что при радиоактивном распаде происходит превращение атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента, первым осуществил ядерную реакцию — искусственное превращение ядра атома одного химического элемента в ядро атома другого химического элемента.

§ 22. Линейчатые оптические спектры. Поглощение и испускание света атомами

Изучение линейчатых спектров лучше всего начать с их наблюдения, чтобы учащиеся имели ясное представление о предмете изучения. Для наблюдения линейчатых спектров в настоящее время не требуется никакого специального оборудования. Практически всюду используются для освещения газоразрядные люминесцентные лампы, испускающие свет с линейчатым спектром, а для разложения света в спектр можно использовать любые лазерные диски как прекрасные отражательные дифракционные решетки. Порядок выполнения эксперимента описан в задании 22.1 по наблюдению линейчатого спектра излучения.

Если в кабинете физики имеются лабораторные источники света со спектральными трубками и спектроскопы или дифракционные решётки, нужно провести наблюдение линейчатых спектров различных химических элементов.

После наблюдения линейчатых спектров логично рассмотреть постулаты Бора, объясняющие свойства атомов и происхождение линейчатых спектров, познакомиться с гипотезой о существовании квантов и идеей квантования физических величин.

§ 23. Состав атомного ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядра

Вопрос о составе атомного ядра не вызывает у школьников затруднений, так как изучение этой темы проходит на уровне простого сообщения о факте экспериментального открытия в атомных ядрах двух частиц — протона и нейтрона. Принципиально новым для учащихся фактом является утверждение о существовании ядерных сил, значительно отличающихся от ранее известных гравитационных и электромагнитных сил.

Начать обсуждение свойств ядерных сил можно с постановки проблемы в виде задачи 23.1: может быть, и нет нужды в гипотезе о ядерных силах притяжения, так как между протонами действуют гравитационные силы притяжения?

Для ответа на этот вопрос нужно сравнить силы гравитационного притяжения протонов с силами кулоновского отталкивания между ними. Решим эту задачу.

Задача 23.1. Решение. Вычислим отношение сил гравитационного притяжения протонов к силам кулоновского отталкивания между ними:

$m_p = 1{,}6726485 \cdot 10^{-27}$ кг,

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл,

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

$k = 9 \cdot 10^9$ Н · м^2 · Кл$^{-2}$.

$$F_к = k\frac{e \cdot e}{r^2},\ F_г = G\frac{m_p \cdot m_p}{r^2},$$

$$\frac{F_г}{F_к} = \frac{G \cdot m_p \cdot m_p}{k \cdot e \cdot e},$$

$$\frac{F_г}{F_к} \approx \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot (1{,}67)^2 \cdot 10^{-54}}{9 \cdot 10^9 \cdot (1{,}6)^2 \cdot 10^{-38}} \approx 10^{-36}.$$

Гравитационные силы притяжения между двумя протонами ничтожно малы по сравнению с кулоновскими силами отталкивания: они слабее в миллиард миллиардов миллиардов миллиардов раз! Отсюда и возникает проблема поиска сил притяжения иной природы.

Другая проблема заключается в том, что если в природе существуют особые ядерные силы притяжения, действие которых превышает действие кулоновских сил отталкивания между протонами внутри ядра, то почему же все атомные ядра во Вселенной до сих пор не соединились под действием этих сил в одно гигантское сверхядро?

Эта проблема не обсуждается в учебнике, но учитель должен дать ответ на такой вопрос ученика.

В эксперименте установлено, что на расстоянии 10^{-15} м от центра протона ядерные силы примерно в 35 раз больше кулоновских и в 10^{38} раз больше гравитационных. Но с увеличением расстояния ядерные силы очень быстро убывают. На расстояниях более $1{,}4 \cdot 10^{-15}$ м их действие пренебрежимо мало по сравнению с действием кулоновских сил.

Эта проблема может возникнуть при рассмотрении зависимости энергии связи атомного ядра от числа нуклонов в нём. График на рисунке 23.4 учебника показывает, что с увеличением массового числа A, т. е. числа нуклонов в ядре, примерно от 15 до 240 удельная энергия связи нуклонов в ядре изменяется очень незначительно, в пределах от 7,5 до 8,5 МэВ/нуклон. Это значит, что энергия связи ядра примерно пропорциональна числу нуклонов в нём, т. е. при увеличении числа нуклонов в ядре в 2 раза энергия связи ядра увеличивается примерно в 2 раза.

Совсем иначе изменяется потенциальная энергия тел, взаимодействующих за счёт гравитационных или кулоновских сил. В § 18 учебника при нахождении второй космической скорости было получено выражение для вычисления потенциальной энергии гравитационного взаимодействия двух тел массами m и M:

$$E_{\text{п}R} = -G\frac{mM}{R}.$$

Из этого выражения следует, что при увеличении масс взаимодействующих тел в 2 раза потенциальная энергия их гравитационного взаимодействия увеличивается в 4 раза.

В § 4 учебника 8 класса было получено выражение для вычисления энергии электрического поля заряженного конденсатора:

$$W = \frac{q^2}{2C}.$$

Из него следует, что при увеличении электрических зарядов на пластинах конденсатора в 2 раза потенциальная энергия их электростатического взаимодействия увеличивается в 4 раза.

Это обусловлено тем, что при гравитационном взаимодействии каждая частица одного тела взаимодействует с каждой частицей другого тела и при кулоновском взаимодействии каждый электрический заряд одного тела взаимодействует с каждым электрическим зарядом другого тела.

Пропорциональность энергии связи ядра числу нуклонов является следствием того, что один нуклон способен взаимодействовать за счёт ядерных сил лишь с несколькими соседними нуклонами. Эта особенность ядерных сил называется свойством насыщения. В этом сходство ядерных сил с силами связи атомов в молекулах. Например, атом водорода способен вступать в соединение лишь с одним другим атомом, а атом углерода способен установить связь одновременно не более чем с четырьмя другими атомами. Связь между атомами в молекуле может возникать за счёт обмена валентными электронами.

Для объяснения основных свойств ядерных сил была высказана гипотеза о том, что и нуклоны взаимодействуют между собой путём обмена частицами. Такие частицы были обнаружены экспериментально и получили название пи-мезонов или пионов. Существуют положительный, отрицательный и нейтральный пи-мезоны.

Обменное взаимодействие нуклонов в ядре не во всём сходно со связью атомов в молекулах за счёт обмена электронами. Электроны являются составными частями атомов. Мезоны не являются составными частями протонов и нейтронов, а испускаются и поглощаются ими подобно тому, как атомы испускают и поглощают кванты электромагнитного излучения — фотоны. Протон, испустивший положительный пи-мезон, превращается в нейтрон, а нейтрон после захвата пи-мезона превращается в протон (рис. 45). Частицы пи-мезоны являются квантами поля сильного взаимодействия.

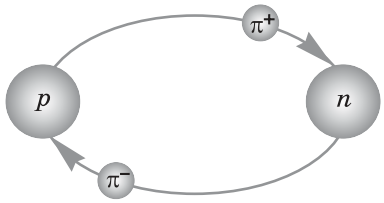

Рис. 45

Энергия связи атомных ядер. Понятие об энергии связи атомных ядер вводится на основании опытных фактов, свидетельствующих о том, что для разделения любого атомного ядра необходимо затратить определённую энергию. Связь между энергией связи и дефектом массы можно вывести как следствие двух экспериментально установленных фактов:

1) масса любого атомного ядра меньше суммы масс свободных протонов и нейтронов, входящих в состав ядра;

2) энергия связи ΔE ядра равна произведению дефекта массы Δm атомного ядра на квадрат скорости света в вакууме:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Важный общий вывод заключается в том, что, кроме кинетической энергии движения и потенциальной энергии взаимодействия тел, в природе существует ещё энергия покоя. Всякое тело массой m обладает энергией покоя E_0, равной

$$E_0 = mc^2.$$

Задача 23.2. Решение.

$m_{\text{He}} = 4{,}00151$ а. е. м.,

$m_p = 1{,}00728$ а. е. м.,

$m_n = 1{,}00866$ а. е. м.

$\Delta E = \Delta mc^2$, $\Delta m = 2m_p + 2m_n - m_{\text{He}}$,

$\Delta m = 2 \cdot 1{,}00728$ а. е. м. + $+ 2 \cdot 1{,}00866$ а. е. м. $- 4{,}00151$ а. е. м. $\approx$ $\approx 0{,}03037$ а. е. м.,

$\Delta E = 931{,}5$ МэВ/а. е. м. $\times$ $\times\ 0{,}03037$ а. е. м. $\approx 28{,}3$ МэВ.

Задача 23.3. Решение.

$m_{\text{N}} = 13{,}99923$ а. е. м.,

$m_p = 1{,}00728$ а. е. м.,

$m_n = 1{,}00866$ а. е. м.

$f = \dfrac{\Delta E}{A} = \dfrac{\Delta mc^2}{A}$,

$\Delta m = 7m_p + 7m_n - m_{\text{N}}$,

$$\Delta m = 7 \cdot 1{,}00728 \text{ а. е. м.} + 7 \cdot 1{,}00866 \text{ а. е. м.} - 13{,}99923 \text{ а. е. м.} = 0{,}11235 \text{ а. е. м.},$$

$$\Delta E = 931{,}5 \text{ МэВ/а. е. м.} \cdot 0{,}11235 \text{ а. е. м.} \approx 104{,}6 \text{ МэВ},$$

$f \approx 7{,}48$ МэВ/нуклон.

Задача 23.4. Решение.

При решении задачи 23.2 мы вычислили энергию связи ΔE ядра гелия $^4_2$He. Она равна 28,3 МэВ. Такое количество энергии освобождается при образовании одного ядра гелия из двух свободных нейтронов и двух свободных протонов. Для вычисления энергии E, освободившейся при образовании 1 кг атомных ядер гелия $^4_2$He из свободных протонов и нейтронов нужно умножить энергию ΔE на число N ядер гелия в 1 кг гелия. Число N найдём делением массы m гелия на массу $m_я$ ядра гелия:

$$m_{\text{He}} = 4{,}00151 \text{ а. е. м.} = 4{,}00151 \text{ а. е. м.} \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг/а. е. м.} = 6{,}64 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

$$N = \frac{m}{m_я},\ N \approx \frac{1 \text{ кг}}{6{,}64 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 1{,}5 \cdot 10^{26},$$

$$E = N\Delta E,$$

$$E \approx 1{,}5 \cdot 10^{26} \cdot 28{,}3 \text{ МэВ} \cdot 1{,}6 \times 10^{-13} \text{ Дж/МэВ} \approx 6{,}8 \cdot 10^{14} \text{ Дж},$$

$$\frac{E}{mq} \approx \frac{6{,}8 \cdot 10^{14} \text{ Дж}}{1 \text{ кг} \cdot 44\,000\,000 \text{ Дж/кг}} \approx 1{,}5 \cdot 10^7.$$

Мы получили, что при синтезе 1 кг гелия из протонов и нейтронов выделяется в 15 миллионов раз больше энергии, чем при сжигании 1 кг бензина.

Задача 23.5. Решение.

Задача подобна задачам 23.3 и 23.4.

$$m_{\text{Al}} = 26{,}974409 \text{ а. е. м.} = 26{,}974409 \text{ а. е. м.} \cdot 1{,}66 \times 10^{-27} \text{ кг/а. е. м.} = 44{,}8 \cdot 10^{-27}\text{кг},$$

$$\Delta E = \Delta mc^2,\ \Delta m = 13m_p + 14m_n - m_{\text{Al}},$$

$$\Delta m \approx 13 \cdot 1{,}00728 \text{ а. е. м.} + 14 \cdot 1{,}00866 \text{ а. е. м.} - 26{,}974409 \text{ а. е. м.} \approx 0{,}24 \text{ а. е. м.},$$

$$\Delta E = 931{,}5 \text{ МэВ/а. е. м.} \cdot 0{,}24 \text{ а. е. м.} \approx 223{,}56 \text{ МэВ},$$

$$N = \frac{m}{m_я},\ N \approx \frac{0{,}001 \text{ кг}}{44{,}8 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 2{,}2 \cdot 10^{22},$$

$$E = N\Delta E,$$

$$E \approx 2{,}2 \cdot 10^{22} \cdot 223{,}56 \text{ МэВ} \cdot 1{,}6 \times 10^{-13} \text{ Дж/МэВ} \approx 7{,}87 \cdot 10^{11} \text{ Дж},$$

$$mq = E,\ m = \frac{E}{q},$$

$$m \approx \frac{7{,}87 \cdot 10^{11} \text{ Дж/кг}}{30\,000\,000 \text{ Дж/кг}} \approx 2{,}6 \cdot 10^4 \text{ кг} = 26 \text{ т}.$$

§ 24. Радиоактивность

Изучение этой темы можно начать с рассказа об истории открытия явления радиоактивности. Материал для такого рассказа приведён в § 35. После знакомства с историей открытия явления радиоактивности нужно объяснить, что называется радиоактивным распадом, назвать два основных вида распада, выяснить, какие изменения испытывает ядро в результате альфа- и бета-распада.

Для объяснения происхождения гамма-излучения при радиоактивном распаде необходимо провести аналогию между атомами и атомными ядрами: как и атомы, атомные ядра имеют дискретный спектр возможных стационарных энер-

гетических состояний. При радиоактивном распаде часть освобождающейся энергии может быть израсходована на переход ядра-продукта из основного состояния в возбуждённое. В возбуждённом состоянии атомное ядро находится очень короткое время, а затем самопроизвольно переходит в основное состояние, испуская квант электромагнитного излучения, называемый гамма-квантом.

При рассмотрении явления бета-распада нужно обратить внимание учащихся на тот факт, что при этом процессе не освобождается из ядра ранее удерживаемый там электрон. Электронов в атомных ядрах нет. Не освобождаются бета-частицы и с электронных оболочек атомов. Бета-распад обусловлен способностью протонов и нейтронов, из которых состоят атомные ядра, к самопроизвольным взаимным превращениям. Если нейтрон в ядре превращается в протон, электрон и антинейтрино, то электрон и антинейтрино вылетают из ядра, протон остается в ядре. Этот 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.

При превращении в ядре протона в нейтрон, позитрон и нейтрино, позитрон и нейтрино вылетают из ядра, нейтрон остается в ядре.

Закон радиоактивного распада является для учащихся примером закона нового типа — вероятностного закона, являющегося, в свою очередь, следствием того, что распад любого ядра — это случайный процесс. Момент времени распада какого-либо ядра предсказать невозможно, но можно узнать вероятность распада каждого из одинаковых ядер в любой момент времени.

Условие радиоактивного распада атомного ядра. Выяснение условия радиоактивного распада атомного ядра A в другое атомное ядро B с выбросом частицы C принципиально важно для понимания причины, по которой одни атомные ядра могут существовать в неизменном виде неограниченно долгое время, а другие обязательно самопроизвольно превращаются в другие ядра путём выброса частиц или деления на части. Тот факт, что радиоактивный распад ядра A в другое атомное ядро B с выбросом частицы C обязательно происходит, если сумма масс ядра B и частицы C меньше массы ядра A:

$$m_A > m_B + m_C,$$

показывает, что процесс радиоактивного распада является одним из проявлений общего закона природы, согласно которому любая система взаимодействующих тел при возможности всегда самопроизвольно переходит из состояния с большим запасом потенциальной энергии в состояние с меньшим запасом энергии. О том, что ядро A обладает бóльшим запасом потенциальной энергии, чем ядро B и частица C, на основании уравнения Эйнштейна свидетельствует тот факт, что сумма масс ядра B и частицы C меньше массы ядра A.

По дефекту массы радиоактивного распада вычисляется энергия радиоактивного распада:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

При весьма распространённой в настоящее время радиофобии полезно знакомство учащихся с тем фактом, что более половины элементов таблицы Менделеева имеет естественные радиоактивные изотопы. В земной коре урана и тория содержится примерно столько же, сколько в ней имеется йода, олова, свинца, кобальта, и больше, чем серебра и ртути.

Естественные радиоактивные изотопы встречаются везде. В воздухе, которым мы дышим, имеется радиоактивный инертный газ радон, возникающий в результате альфа-распада радия, содержащегося практически во всех почвах. В тканях растений и животных содержатся естественные радиоактивные изотопы калия и углерода.

Задача 24.1. Решение.

$m_{^{14}_{6}\mathrm{C}} = 13{,}99995$ а. е. м.,

$m_{^{14}_{7}\mathrm{N}} + m_e = 13{,}99923$ а. е. м. +

+ 0,00055 а. е. м. = 13,99978 а. е. м.,

$m_{^{14}_{6}\mathrm{C}} > m_{^{14}_{7}\mathrm{N}} + m_e$ (распад возможен).

Задача 24.2. Решение.

$m_{^{10}_{5}\mathrm{B}} = 10{,}01019$ а. е. м.,

$m_{^{6}_{3}\mathrm{Li}} + m_{^{4}_{2}\mathrm{He}} = 6{,}01348$ а. е. м. +

+ 4,00151 а. е. м. = 10,01499 а. е. м.,

$m_{^{10}_{5}\mathrm{B}} < m_{^{6}_{3}\mathrm{Li}} + m_{^{4}_{2}\mathrm{He}}$ (распад невозможен).

§ 25. Экспериментальные методы регистрации заряженных частиц

Изучение этой темы ориентировано на практическое ознакомление учащихся с методами регистрации ядерных излучений. Это важно по нескольким причинам. Во-первых, у многих школьников наблюдение следов альфа-частиц в камере Вильсона или счётчика Гейгера в действии способно пробудить интерес к изучению физики намного сильнее, чем самый красочный рассказ о достижениях ядерной физики. Во-вторых, только по рисункам и фотографиям очень трудно понять, что же представляет собой описываемый прибор и как он действует. В-третьих, наблюдение приборов для регистрации ядерных излучений в действии может способствовать формированию правильных представлений о явлении радиоактивности как природном явлении, существующем на Земле с момента её возникновения, в пределах естественного уровня, представляющем не бóльшую опасность для человека, чем, например, солнечный свет. Но при существенном превышении уровня естественного фона ионизирующая радиация может быть смертельно опасной для человека. Человек в современном мире должен иметь адекватные представления о естественном радиационном фоне и способах регистрации ионизирующей радиации.

В учебнике подробно описаны два варианта камеры Вильсона и способы их использования. Это дублирование сделано по той причине, что в разные годы для школьного кабинета физики выпускались различные варианты приборов. Учитель может использовать тот вариант прибора, который имеется в его кабинете. Особо следует отметить, что оба варианта прибора безотказны при умелом их использовании, они не портятся «от старости», очень просты по своему устройству. Но чтобы овладеть способами их использования, нужно внимательно следовать инструкции и проявлять настойчивость. После того как вы получите следы хотя бы один раз, то обязательно будете всегда демонстрировать этот замечательный опыт своим ученикам.

Особых пояснений требует способ использования конвекционной камеры Вильсона (камеры Ляпидевского). Эта камера проще в использовании, так как не нужно овладевать навыком сжатия и отпускания резиновой груши. Но для работы камеры нужен твёрдый оксид углерода (сухой лёд). Для получения сухого льда нужно иметь в кабинете физики углекислотный огнетушитель.

Углекислый газ находится в баллоне под высоким давлением, около 60 атм. При открывании клапана газ выходит из раструба огнетушителя и в результате адиабатного расширения сильно охлаждается. При температуре ниже –78,5 °С газ переходит в твёрдое состояние, превращается в сухой лёд. Чтобы перешла в твёрдое состояние значительная часть выходящего газа, можно

Рис. 46

Рис. 47

использовать мешок объёмом порядка 1 дм^3 из толстой плотной ткани, который надо заранее надеть на раструб огнетушителя и плотно обвязать бечевой или шнуром (рис. 46). Сухой лёд из мешка в контейнер камеры следует пересыпать, не прикасаясь к нему голой рукой либо вытряхивая из мешка или с помощью ложки (рис. 47).

Указанный в описании прибора и в методических руководствах состав жидкости для получения насыщенных паров в камере не является единственно возможным. При отсутствии чистого спирта и ацетона можно воспользоваться водкой.

Вид треков альфа-частиц, наблюдаемых в конвекционной камере Вильсона, представлен на рисунке 48.

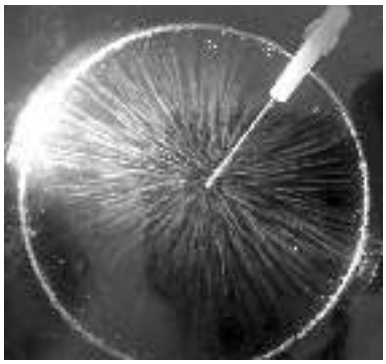

Рис. 48

Дозиметр-радиометр АНРИ-01-02 «Сосна», описанный в экспериментальном задании 25.2 по измерению естественного радиационного фона и исследованию радиоактивности предметов, поставляется магазинами «Учколлектор».

§ 26. Ядерные реакции

При изучении ядерных реакций нужно обратить внимание учащихся на различие явлений ядерной реакции и радиоактивного распада. В первом и во втором процессах происходит превращение одного атомного ядра в другое ядро (или в другие ядра), но между ними есть принципиальное различие: радиоактивным распадом называется самопроизвольное, спонтанное превращение атомного ядра, а ядерной реакцией называется превращение ядра в новое ядро в результате его взаимодействия с частицей или с другим атомным ядром. Например, самопроизвольное деление атомного ядра урана является радиоактивным распадом, а деление атомного ядра урана в результате попадания в него нейтрона является ядерной реакцией.

Учащиеся должны уметь вычислять выходы ΔE ядерных реакций по разности Δm масс частиц, вступающих в реакцию, и продуктов реакции:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Специального рассмотрения требуют особенности цепных ядерных реакций деления тяжёлых ядер и термоядерных реакций.

При желании учитель может оживить изучение данной темы рассказом об истории открытия цепной реакции деления ядер урана. Материал для такого рассказа дан в конце этого параграфа.

Задача 26.1. Решение. Сумма зарядовых чисел атомных ядер изотопов водорода дейтерия — ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$, вступающих в ядерную реакцию, равна 2. Образовавшееся в результате ядерной реакции ядро изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ обладает зарядовым числом 2, следовательно, второй продукт реакции — частица X — не обладает электрическим зарядом, её зарядовое число равно нулю. Сумма массовых чисел атомных ядер изотопов водорода — дейтерия и трития — равна 5, а массовое число ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ равно 4. Следовательно, массовое число частицы X равно 1. Такими параметрами обладает нейтрон.

Задача 26.2. Решение. При попадании альфа-частицы в атомное ядро изотопа бериллия происходит ядерная реакция

$${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_0n + {}^A_ZX,$$

$$9 + 4 = 1 + A,\ A = 12,$$

$$4 + 2 = 0 + Z,\ Z = 6.$$

Шестой элемент таблицы Менделеева — углерод, продуктом ядерной реакции является ядро изотопа углерода ${}^{12}_6\text{C}$.

Задача 26.3. Решение.

$${}^A_ZX + {}^1_0n \rightarrow {}^{93}_{36}\text{Kr} + {}^{140}_{56}\text{Ba} + 3\,{}^1_0n,$$

$$A + 1 = 93 + 140 + 3,\ A = 235,$$

$$Z + 0 = 36 + 56 + 0,\ Z = 92.$$

Девяносто второй элемент таблицы Менделеева — уран. Нейтрон попал в ядро изотопа урана $^{235}_{92}U$.

Задача 26.4. Решение.

1) $\Delta E = \Delta mc^2$, $\Delta m = m_{^1_1H} + m_{^2_1H} - m_{^3_2He}$,

$\Delta m \approx 1{,}00728$ а. е. м. + 2,01355 а. е. м. – – 3,01493 а. е. м. ≈ 0,00590 а. е. м.,

$\Delta E \approx 0{,}00590$ а. е. м. · 931,5 МэВ/а. е. м. ≈ ≈ 5,5 МэВ.

2) $\Delta E = \Delta mc^2$, $\Delta m = m_{^2_1H} + m_{^2_1H} - m_{^3_1H} - m_{^1_1H}$,

$\Delta m = 2{,}01355$ а. е. м. + 2,01355 а. е. м. – – 3,01550 а. е. м. – 1,00728 а. е. м. = = 0,00432 а. е. м.,

$\Delta E \approx 0{,}00432$ а. е. м. · 931,5 МэВ/а. е. м. ≈ ≈ 4,02 МэВ.

3) $\Delta E = \Delta mc^2$, $\Delta m = m_{^2_1H} + m_{^3_1H} - m_{^4_2He} - {}^1_0n$,

$\Delta m \approx 2{,}01355$ а. е. м. + 3,01550 а. е. м. – – 4,00151 а. е. м. – 1,00866 а. е. м. = = 0,01888 а. е. м.,

$\Delta E \approx 0{,}01888$ а. е. м. · 931,5 МэВ/а. е. м. ≈ ≈ 17,6 МэВ.

4) $\Delta E = mc^2$, $\Delta m = m_{^3_2He} + m_{^3_2He} - m_{^4_2He} - m_{^1_1H} - m_{^1_1H}$,

$\Delta m \approx 3{,}01493$ а. е. м. + + 3,01493 а. е. м. – 4,00151 а. е. м. – – 1,00728 а. е. м. – 1,00728 а. е. м. ≈ ≈ 0,01379 а. е. м.,

$\Delta E \approx 0{,}01379$ а. е. м. · 931,5 МэВ/а. е. м. ≈ ≈ 12,8 МэВ.

5) $\Delta E = \Delta mc^2$, $\Delta m = m_{^{27}_{13}Al} + m_{^4_2He} - m_{^{30}_{15}P} - m_{^1_0n}$,

$\Delta m \approx 26{,}97441$ а. е. м. + + 4,00151 а. е. м. – 29,97008 а. е. м. – – 1,00866 а. е. м. ≈ –0,00282 а. е. м.,

$\Delta E \approx -0{,}00282$ а. е. м. · 931,5 МэВ/а. е. м. ≈ ≈ –2,6 МэВ.

Из пяти предложенных в этой задаче примеров на расчёт выхода ядерной реакции один пример целесообразно решить у доски, а остальные четыре примера распределить между учащимися для стимуляции самостоятельного выполнения расчёта каждым из них.

Знак «минус» в последнем примере показывает, что при осуществлении данной ядерной реакции энергия не выделяется, а поглощается.

Обратите внимание на одну деталь. Сведения о массах атомных ядер приведены в условиях задач не только для облегчения учащимся поисков табличных данных. В справочных таблицах обычно приводятся сведения не о массах атомных ядер, а о массах атомов. Это необходимо учитывать при расчётах. Если для всех слагаемых (кроме нейтрона) при вычислении изменения суммы масс используются массы атомов вместо масс ядер, то результат автоматически получится точно таким же, как и при использовании масс атомных ядер, так как сумма масс электронов в атомах, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме масс в атомах-продуктах.

Этот вариант таит опасность ошибок. Обычно в задаче резонно указывается не о попадании в атомное ядро атома водорода или атома гелия, а о попадании протона или альфа-частицы. Масса протона отличается от массы атома водорода на массу электрона ($m_e = 0{,}00055$ а. е. м.), масса альфа-частицы отличается от массы атома гелия на массу двух электронов ($2m_e = 0{,}0011$ а. е. м.). Если использовать в расчётах массу атома и массу протона или альфа-частицы, то нужно вносить поправки на массу электронов. Чтобы не затруднять учащимся понимание сути дела, в учебнике приведён вариант расчётов с использованием только масс атомных ядер и частиц.

Открытие реакции деления ядер урана

Замечательная закономерность: самая сладкая малина бывает на ветвях, свесившихся из соседского сада.

Как ни странно, эта закономерность работает и на участках соседствующих наук. Очень многие открытия делаются на границах раздела наук или даже на «соседских участках». В этом нет ничего удивительного, так как деление научного знания о мире на отдельные науки довольно условно и во многих случаях мешает понять какую-то простую истину «хозяину участка», тогда

как «соседу» она кажется очевидной. В результате происходит сбор урожая с соседского участка. Именно такой случай произошёл с открытием реакции деления ядра урана.

После открытия в 1934 г. французскими физиками Фредериком и Ирен Жолио-Кюри явления искусственной радиоактивости — образования радиоактивных ядер при облучении стабильных

Энрико Ферми

ядер альфа-частицами — итальянский физик Энрико Ферми предположил, что возможно получение искусственных радиоактивных изотопов путём облучения стабильных ядер нейтронами. С группой сотрудников он провел в 1934 г. серию таких экспериментов с различными элементами и обнаружил возникновение радиоактивных ядер. Когда очередь дошла до урана, исследователи обнаружили новые радиоактивные изотопы, но их химические свойства отличались как от свойств урана, так и от свойств его ближайших соседей слева в таблице Менделеева. Ферми предположил, что это результат возникновения изотопов заурановых элементов.

С выводом Ферми не согласилась Ида Ноддак — молодой немецкий химик. Она опубликовала в 1934 г. статью, в которой указывала, что обнаруженные в опытах Ферми химические свойства новых радиоактивных изотопов не соответствуют ожидаемым согласно периодическому закону свойствам заурановых элементов. Далее она высказала следующее предположение: «...Можно было бы допустить, что при

Ида Ноддак

обстреле тяжёлых ядер нейтронами эти ядра распадаются на несколько осколков, которые могут представлять собой изотопы известных элементов, однако не быть соседями элементов, подвергшихся действию лучей».

Позднее немецкий химик Отто Ган отмечал, что доводы Ноддак «не были восприняты серьёзно, так как казалось, что они находятся в противоречии со всеми физическими взглядами о структуре ядер».

Среди сомневавшихся в правильности гипотезы Ферми была и Ирен Жолио-Кюри, дочь Марии Кюри. Она провела совместно с югославским физиком Павле Савичем в 1938 г. эксперименты по облучению урана нейтронами. Исследовав химические свойства получившихся радиоактивных изотопов, она пришла к выводу, что среди них есть изотопы, по химическим свойствам неотличимые от лантана, находящегося

Ирен Жолио-Кюри

Отто Ган

в середине таблицы Менделеева. Сообщение об этом открытии было опубликовано, но возможность открыть явление деления ядер урана Ирен Кюри, как и Ферми, упустила.

Немецкий химик О. Ган, узнав о результатах эксперимента И. Кюри и П. Савича, не поверил в эти результаты, как и в случае с гипотезой И. Ноддак. Он считал, что такого результата быть не должно, всё дело в недостаточной чистоте эксперимента. И Ган предложил своему сотруднику Фрицу Штрассманну подготовить установку для повторения опыта И. Кюри. Ган и Штрассманн провели эксперимент и убедились, что среди продуктов облучения урана нейтронами действительно есть радиоактивные изотопы, неотличимые по химическим свойствам от лантана и бария. И вот только теперь, через четыре года после опубликования гипотезы И. Ноддак о возможности деления ядер урана под действием нейтрона, О. Ган решился высказать ту же самую гипотезу, но с такими оговорками, что от неё было легко и отказаться. В статье он писал: «...как химики, мы, собственно, должны были бы на основе только проведенных опытов переименовать приведённую схему и... поставить символы Ba, La, Ce. Как „ядерные химики“, в определённой мере близко стоящие к физике, мы ещё не можем решиться на этот противоречащий всему прошлому опыту ядерной физики прыжок. Может быть, в наши результаты закрался ряд странных случайностей».

Рассказывают, что утром следующего дня после завершения статьи о результатах эксперимента Ган пришёл в лабораторию и сказал, что он хорошо подумал и решил, что химики не должны высказывать какие-то гипотезы по поводу физических процессов, тем более таких сложных, в которых и сами физики не вполне разбираются. Письмо в журнал не следует отправлять, так как оно может сделать их просто смешными в глазах специалистов-физиков. На это Штрассманн ответил, что письмо уже ушло и вернуть его невозможно. Письмо было опубликовано 6 января 1939 г., и за Ганом и Штрассманном был признан во всём мире приоритет открытия деления ядер урана. За это открытие они были награждены Нобелевской премией.

В действительности Ган и Штрассманн, как и Ноддак, и И. Кюри, ещё не доказали экспериментально факт деления ядер урана при попадании в него нейтрона. Они лишь подтвердили правильность эксперимента И. Кюри и вслед за И. Ноддак повторно высказали гипотезу о возможности явления деления ядер урана на основании изучения химических свойств новых радиоактивных изотопов.

Первым сообщил об экспериментальном обнаружении явления деления ядер урана 30 января 1939 г. Фредерик Жолио-Кюри. Одновременно он высказал предположение о возможности освобождения нескольких нейтронов при каждом делении ядра урана.

Статья Отто Фриша и Лизе Мейтнер, сотрудничавших с Ганом, об экспериментальном открытии явления деления ядер урана под действием нейтронов была опубликована 18 февраля 1939 г.

А 8 марта 1939 г. Фредерик Жолио-Кюри сообщил о результатах нового опыта, проведённого совместно с Хансом Халбаном и Львом Коварски. В этом опыте было экспериментально доказано, что при делении ядер урана освобождается несколько нейтронов.

Через несколько дней или несколько недель аналогичные опыты были проведены учёными в Дании, СССР и США. Почему одновременно возник интерес учёных разных стран к одной и той же физической проблеме и почему впереди всех оказались Фредерик и Ирен Жолио-Кюри?

Фредерик Жолио-Кюри

В это время многие физики поняли, что человечество находится на пороге одного из величайших научных открытий в своей истории — открытия способа овладения ядерной энергией. О том, что при радиоактивном распаде и ядерных реакциях выделяется очень большая энергия, было известно с момента открытия явления радиоактивности и осуществления первой ядерной реакции Резерфордом. Но ни Резерфорд, ни Эйнштейн, по уравнению которого вычисляется выход ядерной энергии, не верили в возможность использования ядерной энергии для практических целей.

В отличие от большинства других учёных, работавших в области ядерной физики, Фредерик Жолио-Кюри был уверен в принципиальной возможности освобождения ядерной энергии в больших количествах. Ещё в своей лекции при получении Нобелевской премии за открытие явления искусственной радиоактивности он высказал предположение, что освобождение ядерной энергии в больших количествах станет возможным при осуществлении цепных ядерных реакций, в которых освобождающиеся при реакции частицы будут вызывать новые ядерные реакции. Нужно лишь найти реакции, способные обеспечить развитие лавины ядерных реакций.

Фредерик и Ирен Жолио-Кюри оказались впереди других, потому что целенаправленно искали такие реакции.

Когда Нильс Бор узнал об открытии явления деления ядер урана под действием нейтронов, он воскликнул: «Какими же мы были идиотами! Ведь именно так всё и должно быть!»

§ 27. Ядерная энергетика

В этой теме основной задачей является рассмотрение устройства и принципа действия ядерного реактора. Необходимо объяснить, почему в природных месторождениях урана не осуществляется сама собой цепная реакция деления ядер, для чего в ядерных реакторах используются вещества, называемые замедлителями, что замедляет замедлитель, почему цепная реакция деления ядер в природном уране может происходить только на медленных нейтронах, что такое критическая масса ядерного горючего, для чего в реакторе используются управляющие стержни и какие элементы в них применяются, для чего реактор окружён толстыми стенами из бетона.

Проблемы ядерной энергетики можно обсудить на уроке с заранее подготовленными выступлениями учащихся, в которых приводятся аргументы за развитие ядерной энергетики и против. После вводных выступлений может быть продолжено обсуждение с высказываниями собственных мнений другими учащимися.

В качестве основных аргументов в пользу необходимости развития ядерной энергетики обычно выдвигают, во-первых, проблему близости к исчерпанию запасов нефти и газа на Земле. Энергия цепной реакции деления ядер урана предлагается в качестве одного из альтернативных источников энергии.

Во-вторых, себестоимость выработанной на АЭС электроэнергии более чем в 2 раза ниже себестоимости электроэнергии при сжигании нефти и газа на тепловых электростанциях.

В-третьих, АЭС значительно меньше загрязняют атмосферу и поверхность Земли, чем тепловые электростанции, работающие на каменном угле.

Противники развития ядерной энергетики прежде всего указывают на последствия аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., где 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.

Указывают на угрозу террористических атак на АЭС, на до сих пор не решённую проблему надёжного захоронения радиоактивных отходов. Кроме того, обращается внимание на тот факт, что запасы урана столь же ограничены, как и запасы нефти.

Ещё одно возможное направление развития ядерной энергетики связано с осуществлением термоядерного синтеза.

Современное состояние этой проблемы заслуживает обсуждения. Необходимые материалы по данной теме имеются на втором развороте этого параграфа в учебнике.

§ 28. Дозиметрия

Развитие ядерной энергетики, разработка и испытания ядерного оружия сделали актуальной для всех людей на Земле проблему радиоактивной опасности. В XXI в. каждый человек должен иметь представление о возможных последствиях облучения ионизирующей радиацией, об опасных и безопасных дозах облучения, о способах измерения дозы облучения.

Воздействие любых видов ионизирующей радиации на живые организмы определяется энергией, поглощённой единицей массы облучённого тела. Поэтому физическое воздействие радиации характеризуется поглощённой дозой. Важно понимать, что абсолютная защита от ионизирующей радиации невозможна, и знать, какие уровни облучения организма человека опасны для его здоровья и какие не представляют никакой реальной опасности.

После введения понятий поглощённой дозы излучения, мощности дозы излучения, эквивалентной дозы излучения и единиц этих величин нужно подробно рассмотреть проблемы биологического действия ионизирующих излучений, естественного радиационного фона и предельно допустимых доз облучения.

Оптимальным вариантом завершения изучения этой темы является измерение мощности дозы излучения от естественного радиационного фона. Описание этой работы дано в экспериментальном задании 28.1.

При наличии в кабинете физики прибора со счётчиком Гейгера можно предложить желающим подготовить сообщение о естественной радиоактивности калия и провести эксперимент по обнаружению естественной радиоактивности калия с любой солью калия. Для такого эксперимента нужно поместить счётчик Гейгера — Мюллера над солью калия на расстоянии около 1 см.

В качестве темы для самостоятельного исследования учащимся может быть предложен эксперимент по обнаружению естественной радиоактивности атмосферного воздуха. Этот опыт можно поставить следующим образом. Фильтр из тонкого слоя ваты на марлевой подложке или листе фильтровальной бумаги помещают перед всасывающим патрубком пылесоса. Включают пылесос на 5—10 мин. Затем быстро снимают фильтр и помещают его под счётчик радиометра. Счётчик регистрирует радиоактивное излучение, превышающее фоновое значение. Это объясняется тем, что пылинки, частицы дыма и тумана, содержащиеся в воздухе, обладают небольшой радиоактивностью. Собранные на фильтре из большого объёма воздуха, эти частицы обладают заметной радиоактивностью.

Происхождение естественной радиоактивности атмосферного воздуха объясняется тем, что небольшие количества радия имеются в почве и в горных породах. Продуктом распада радия является инертный радиоактивный газ радон. Продуктами распада радона являются радиоактивные изотопы полония, свинца и висмута. Атомы этих веществ легко прилипают к поверхности пылинок и вместе с ними задерживаются фильтром.

Глава 4

Строение Вселенной

§ 29. Геоцентрическая система мира

Изучение геоцентрической системы мира может показаться анахронизмом, загружающим ум учащихся устаревшими, ненужными сведениями. Но в действительности картина существенно иная. Большинство современных людей со средним и высшим образованием имеют более скудные представления о видимых движениях звёзд, планет, Солнца и Луны, чем имели создатели геоцентрической системы мира более двух тысяч лет назад. Нужно осознать, что создание геоцентрической системы мира было не грубой ошибкой невежественных людей, а первым шагом на пути к разгадке устройства Вселенной, сделанным гениальными мыслителями.

Доказательства шарообразности Земли и уединенности её в мировом пространстве были получены древнегреческими учёными, и, чтобы понять эти доказательства, нужно подняться до уровня их знаний о видимых движениях небесных светил. Никакие рассказы и объяснения не могут заменить собственных наблюдений за небесными светилами. Поэтому первой задачей учителя является организация вечерних наблюдений звёздного неба для ознакомления с основными созвездиями и яркими звёздами, наблюдений суточного движения звёзд и движения Луны, Солнца и планет.

Ясные вечера в природе не совпадают с расписанием уроков, поэтому астрономические наблюдения не нужно связывать с темой урока, а лучше начинать заранее с осени.

Ниже приводятся примеры изложения взглядов на устройство мира учёных древности.

Вот как представление о Вселенной изложено Цицероном: «Вселенная состоит из девяти сфер... Наружная сфера, небо, обнимает все остальные. Это — верховное божество, которое их содержит и окружает. В небе укреплены звёзды, и оно уносит их в своём вечном движении. Ниже катятся семь сфер, увлекаемых движением неба. Первую из них занимает звезда, которую люди зовут Сатурном. На второй блестит то благодетельное и благосклонное к человеческому роду светило, которое известно под именем Юпитера. Потом — ненавистный Земле Марс, окружённый кровавым сиянием. Ниже Солнце, царь, повелитель других светил и мировая душа: страшной величины шар его наполняет своим светом беспредельное пространство. Его сопровождают сферы Меркурия и Венеры, составляющие как бы его свиту. Наконец, ниже всех Луна, заимствующая свой свет от Солнца. Под нею — всё смертно и тленно, за исключением душ, дарованных человеческой расе милостью богов. Над нею — всё вечно. Земля, помещённая в центре мира, наиболее удалённая от неба, образует девятую сферу: она неподвижна, и все тяжёлые тела падают к ней, в силу собственной тяжести».

И Аристотель, и Птолемей были знакомы с взглядами Аристарха Самосского на устройство мира, но считали их ошибочными. Ведь если Солнце неподвижно, то для объяснения суточного движения всех небесных светил нужно предположить, что громадный земной шар делает оборот вокруг своей оси за сутки, а для объяснения годового движения Солнца среди звёзд нужно было предположить, что Земля совершает один оборот вокруг Солнца за один год. Разделив длину земного экватора (40 000 км) на время оборота Земли (24 ч), мы получим скорость

движения земной поверхности вблизи экватора, равной около 1600 км/ч. Получив такие результаты, Аристотель, Птолемей и другие учёные древности посчитали гипотезу о вращении Земли противоречащей наблюдаемым фактам. Вот, например, что писал Птолемей: «Существуют люди, которые утверждают, будто бы ничто не мешает допустить, что небо неподвижно, а Земля вращается около своей оси от запада к востоку, и что она делает такой оборот каждые сутки. Правда, говоря о светилах, ничто не мешает для большей простоты, хоть этого нет, допустить это, если принять в расчёт только видимые явления. Но эти люди не сознают, до какой степени смешно такое мнение, если присмотреться ко всему, что совершается вокруг нас в воздухе. Если бы мы согласились с ними, чего в действительности нет... то всё-таки эти люди должны были бы сознаться, что Земля вследствие своего вращения имела бы скорость, значительно большую всех тех, какие мы можем наблюдать, так как она описывала бы огромную окружность в такой малый промежуток времени. Таким образом, тела, которые не поддерживались бы Землёю, казались бы всегда двигающимися по противоположному с ней направлению, и никакое облако, ничто летящее или брошенное никогда не казалось бы направляющимся к востоку, ибо Земля упреждала бы всякое движение в этом направлении».

§ 30. Гелиоцентрическая система мира

При ознакомлении с историей разработки гелиоцентрической системы мира нужно обратить внимание на экспериментальные факты, доказывающие существование суточного вращения Земли и её годового движения вокруг Солнца.

Об открытиях Галилея нужно не только рассказать, но и пояснить, каким образом эти открытия доказывали правоту Коперника.

Борьба за утверждение учения Коперника в России. В Россию сведения об учении Коперника проникли в эпоху Петра I. Во время «Великого посольства» Пётр I посетил в Англии Гринвичскую обсерваторию и пригласил Галлея, ученика Ньютона, на работу в Россию для обучения моряков астрономии. Яков Брюс, сподвижник Петра I, организовал первую в России обсерваторию и обучал астрономическим наблюдениям учеников. Он же перевёл на русский язык и издал в 1698 г. книгу Х. Гюйгенса, в которой излагалось учение Коперника.

Великий русский учёный Михаил Васильевич Ломоносов был приверженцем учения Коперника и боролся за его утверждение в России. В качестве одного из средств в этой борьбе он использовал написание памфлетов в стихотворной форме. Примером такого памфлета является следующее стихотворение:

Случились вместе два Астронома в пиру
И спорили весьма между собой в жару.
Один твердил: «Земля, вертясь, вкруг
Солнца ходит»;
Другой, что Солнце все с собой
планеты водит.
Один Коперник был, другой
слыл Птолемей.
Тут повар спор решил усмешкою своей.
Хозяин спрашивал: «Ты звёзд теченье знаешь?
Скажи, как ты о сём сомненье
рассуждаешь?»
Он дал такой ответ:
«Что в том Коперник прав,
Я правду докажу, на Солнце не бывав,
Кто видел простака из поваров такова,
Который бы вертел очаг вокруг жаркова?

Редкое астрономическое явление — прохождение Венеры по диску Солнца — 26 мая 1761 г. наблюдали многие астрономы в Европе и других странах. Но только Ломоносов заметил, описал и объяснил замечательное явление, служащее серьёзным подтверждением теории Коперника. Он заметил, что при вступлении диска Венеры на диск Солнца край солнечного диска слегка прогнулся, как бы уступая диску Венеры, и стушевался, а на заднем краю диска Венеры возник светлый выступ (рис. 49). Подобные явления наблюдались и при выходе Венеры с солнечного диска: когда Венера находилась от края

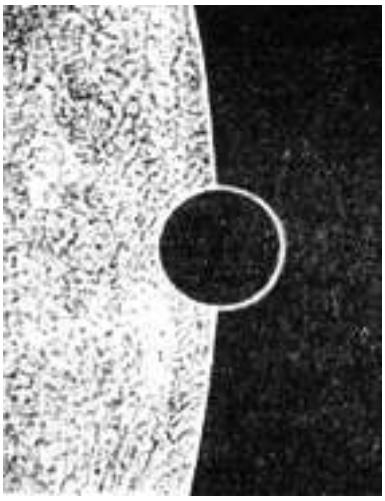

Рис. 49

солнечного диска на расстоянии около 0,1 своего диаметра, на краю солнечного диска возник «...пупырь, который тем явственнее учинялся, чем ближе Венера к выступлению приходила...». Подводя итог описанию своих наблюдений, Ломоносов написал в своём отчёте: «По сим замечаниям господин советник Ломоносов рассуждает, что планета Венера окружена знатной атмосферой, таковой (лишь бы не большею), какова обливается около нашего шара земного».

Это было первое исследование физической природы другой планеты Солнечной системы и первое экспериментальное доказательство сходства физических условий около поверхности Земли и около одного из небесных тел — планеты Венеры. На вопрос о согласовании гипотезы о возможности жизни на других планетах со Священным Писанием Ломоносов дал очень смелый ответ: «Некоторые спрашивают, ежели де на планетах есть живущие нам подобные люди, то какой они веры? Проповедано ли им Евангелие? Крещёны ли они в веру Христову? Сим даётся ответ вопросной. В южных великих землях, коих берега в нынешние времена почти только примечены мореплавателями, тамошние жители, также и в других неведомых землях обитатели, люди видом, языком и всеми поведениями от нас отменные, какой веры? И кто им проповедал Евангелие? Ежели кто про то знать или их обратить и крестить хочет, тот пусть по Евангельскому слову... туда пойдёт. И как свою проповедь окончит, то после поедет для того же и на Венеру. Только бы труд его не был напрасен. Может быть тамошние люди в Адаме не согрешили: и для того всех из того следствий не надобно».

Задача 30.1. Решение. Как было получено в примере решения задачи о расстоянии до α Центавра, 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 0,375″ равно:

$$r \approx \frac{R}{p}\,206\,265 \approx \frac{1{,}5 \cdot 10^{11} \cdot 206\,265}{0{,}375}\ \text{м} \approx$$

$$\approx 8{,}2506 \cdot 10^{16}\ \text{м} \approx \frac{8{,}2506 \cdot 10^{16}}{3{,}086 \cdot 10^{16}}\ \text{пк} \approx$$

$$\approx 2{,}67\ \text{пк} \approx 2{,}67 \cdot 3{,}26\ \text{св. лет} \approx 8{,}7\ \text{св. лет}.$$

§ 31—34. Солнечная система. Физическая природа Солнца и звёзд. Строение и эволюция Вселенной

Материал этих параграфов согласно образовательному стандарту не подлежит обязательному контролю. Но он важен для формирования современных научных представлений о мире. Едва ли целесообразно излагать весь материал самому учителю, более эффективным будет проведение трёх-четырёх уроков в форме заслушивания и обсуждения докладов учащихся. Для этого можно разбить материал трёх-четырёх параграфов на небольшие темы по числу учащихся в классе и дать возможность каждому выбрать себе тему для доклада. Для подготовки доклада можно использовать дополнительные источники информации, в том числе ресурсы Интернета.

Для успешного проведения таких занятий очень много значит использование ярких фотографий небесных тел, полученных при помощи современных наземных и космических телескопов.

Для демонстрации фотографий, взятых из Интернета, нужно использовать компьютерную презентацию, желательно с проекцией на экран.

Задача 33.1. Решение.

Вычислим массу водорода, расходуемую Солнцем за 1 млрд лет:

$$m \approx 600 \cdot 10^9 \text{ кг/с} \cdot 10^9 \cdot 365{,}25 \times \times 24 \cdot 3600 \text{ с} \approx 2 \cdot 10^{28} \text{ кг}.$$

Масса Земли равна примерно $6 \cdot 10^{24}$ кг, масса Солнца равна примерно $2 \cdot 10^{30}$ кг.

Мы получили, что за 1 млрд лет расход водорода Солнцем по массе превосходит массу Земли более чем в 3333 раза, но это составляет лишь 1% от массы Солнца.

Тест 3

Квантовые явления. Строение Вселенной

А1. При прохождении через тонкие слои вещества рассеяние альфа-частиц происходит в результате

1) взаимного отталкивания одноимённых электрических зарядов альфа-частицы и ядра
2) взаимного притяжения разноимённых электрических зарядов альфа-частицы и ядра
3) взаимного притяжения масс альфа-частицы и ядра
4) взаимного притяжения альфа-частицы и ядра ядерными силами

А2. Согласно модели атома, предложенной Резерфордом,

1) атом представляет собой положительно заряженный шар, внутри которого находятся отрицательно заряженные электроны
2) атом состоит из положительно заряженного ядра и обращающихся вокруг него электронов. Масса ядра значительно больше массы электронов, радиусы орбит электронов значительно больше радиуса ядра
3) атом состоит из положительно заряженного ядра и обращающихся вокруг него электронов. Масса ядра примерно равна массе электронов, радиусы орбит электронов значительно больше радиуса ядра
4) атом состоит из положительно заряженного ядра и обращающихся вокруг него электронов. Масса ядра значительно больше массы электронов, радиусы орбит электронов в 2—3 раза больше радиуса ядра
5) атом состоит из отрицательно заряженного ядра и обращающихся вокруг него электронов. Масса ядра значительно больше массы электронов, радиусы орбит электронов значительно больше радиуса ядра

А3. На рисунках 50, *а* и 50, *б* представлены переходы атомов из одного стационарного состояния в другое. Какие спектры могут наблюдаться при таких переходах?

1) линейчатый спектр излучения (рис. 50, *а*), линейчатый спектр поглощения (рис. 50, *б*)

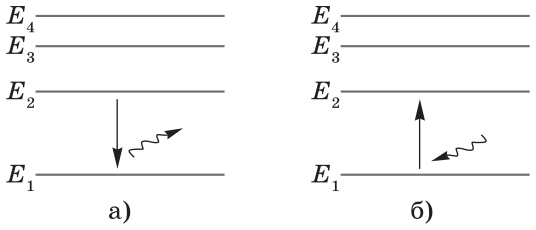

Рис. 50

2) линейчатый спектр излучения (рис. 50, *б*), линейчатый спектр поглощения (рис. 50, *а*)
3) сплошной спектр излучения (рис. 50, *а*), сплошной спектр поглощения (рис. 50, *б*)
4) сплошной спектр излучения (рис. 50, *б*), сплошной спектр поглощения (рис. 50, *а*)

А4. Какой из перечисленных ниже величин пропорциональна энергия фотона?

1) времени излучения
2) скорости фотона
3) частоте излучения
4) длине волны
5) квадрату скорости фотона

А5. Самопроизвольное превращение в ядро другого химического элемента
1) может испытать любое атомное ядро
2) невозможно ни для какого атомного ядра
3) может испытать только атомное ядро, способное к радиоактивному распаду
4) могут испытывать только ядра урана и радия

А6. В ядре атома с массовым числом 3 и зарядовым числом 2 содержатся
1) 3 нейтрона и 2 протона
2) 3 протона и 2 нейтрона
3) 1 нейтрон и 2 протона
4) 2 нейтрона и 1 протон

А7. Энергия покоя атомного ядра меньше суммы энергий покоя свободных протонов и нейтронов, входящих в состав ядра, на величину энергии связи $\Delta E_{св} = \Delta mc^2$
1) у всех атомных ядер
2) только у радиоактивных ядер
3) только у стабильных ядер
4) только у ядер урана

А8. После того как ядро тория $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ испытало электронный бета-распад, получилось ядро-продукт с зарядовым числом Z и массовым числом A, равными
1) $Z = 90,\ A = 234$
2) $Z = 91,\ A = 235$
3) $Z = 91,\ A = 234$
4) $Z = 89,\ A = 234$

А9. Радиоактивное излучение, называемое альфа-излучением, является потоком
1) ядер атомов водорода
2) ядер атомов гелия
3) электронов
4) коротковолнового электромагнитного излучения

А10. Если имеется 1000 радиоактивных ядер с периодом полураспада 2 ч, то через 4 ч не распавшихся ядер
1) не останется
2) останется точно 250
3) останется примерно 250
4) останется точно 750
5) останется примерно 750

А11. Камера Вильсона регистрирует быстрые заряженные частицы 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

А12. Явление радиоактивности было открыто А. Беккерелем при исследовании невидимого излучения урана
1) методом сцинтилляций
2) с помощью камеры Вильсона
3) счётчиком Гейгера
4) с помощью фотографической пластинки

А13. При столкновении ядра дейтерия $^{2}_{1}\mathrm{H}$ с ядром трития $^{3}_{1}\mathrm{H}$ произошла ядерная реакция с образованием ядра X и освобождением нейтрона n:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{A}_{Z}X + ^{1}_{0}n.$$

Чему равны зарядовое число Z и массовое число A ядра X?
1) $Z = 2,\ A = 6$
2) $Z = 2,\ A = 5$
3) $Z = 2,\ A = 4$
4) $Z = 1,\ A = 4$

А14. Для осуществления термоядерной реакции слияния ядер водорода в ядро гелия нужно нагреть водород до температуры в сотни миллионов градусов потому, что
1) ядерные силы притяжения действуют только на очень малых расстояниях, а сближение одноимённо заряженных ядер на такие расстояния при не очень высоких температурах невозможно из-за действия электрических сил отталкивания
2) при таких температурах ядра размягчаются и становится возможным их соединение
3) при низких температурах ядра движутся медленно и при малых размерах очень редко сталкиваются друг с другом
4) при низких температурах ядра движутся медленно и при их столкновениях не возникают гамма-кванты достаточно высокой энергии

А15. Какая система мира соответствует действительности?
1) система мира, в которой Земля находится в центре, а вокруг неё вращаются Луна, Солнце, плане-

ты и звёзды. Такая система называется геоцентрической
2) система мира, в которой Земля находится в центре, а вокруг неё вращаются Луна, Солнце, планеты и звёзды. Такая система называется гелиоцентрической
3) система мира, в которой Солнце находится в центре, а вокруг него вращаются Земля и планеты. Видимое вращение звёзд объясняется вращением Земли вокруг оси. Такая система называется гелиоцентрической
4) система мира, в которой Солнце находится в центре, а вокруг него вращаются Земля и планеты. Видимое вращение звёзд объясняется вращением Земли вокруг оси. Такая система называется геоцентрической

§ 35. Как и зачем делаются научные открытия

В семинаре по теме «Возникновение и развитие наук о природе» могут участвовать все школьники без специальной подготовки. Но в начале дискуссии трое-четверо «зачинщиков» должны высказать гипотезы, кажущиеся наиболее очевидными. Этих «зачинщиков» нужно подготовить.

Володя. Науки появляются, когда у людей возникает потребность в соответствующих знаниях. В Древнем Вавилоне и Египте с развитием земледелия для выбора сроков посева понадобились астрономические наблюдения за продолжительностью года и временем разлива рек. Когда люди научились строить корабли и отправились открывать новые земли, понадобились знания о форме и размерах Земли.

Игорь. По-моему, Володя в основном прав. А в какой стране сегодня естественные науки достигли высокого уровня развития? Правильно, в США. А какая страна больше всех расходует средств на разработку новых типов вооружений? Опять США. Вот вам и ответ: главная движущая сила развития наук о природе — войны. Никто бы и не узнал, что был такой учёный Архимед, если бы он не разработал самые совершенные для того времени образцы оружия. И Леонардо да Винчи создал много изобретений, которые применяются в военном деле. А что изобрёл Нобель? Динамит он изобрёл! Так что войны — движущая сила развития науки!

Таня. Я с Володей не согласна, а уж с Игорем — тем более. Все расходы на войны не причина прогресса науки, а самый большой тормоз. Если бы все затраченные средства шли на мирные научные исследования, то автомобили, отравляющие воздух, наверняка уже были бы в музеях и тепловые электростанции перестали бы загрязнять Землю.

Я не верю и в то, что наука возникла для удовлетворения практических потребностей человека. Зачем наблюдать звёзды для предсказания разлива Нила? Если он разливается регулярно, то сосчитали дни от разлива до разлива — и всё, а если разливы не регулярны, никакие астрономические наблюдения не помогут.

Потребности у человека возникают тогда, когда он знакомится с чем-то новым, пробует, вкусно ли, полезно ли, удобно ли. Ведь до открытия электромагнитных волн ни один король не заказывал учёным изобрести мобильный телефон. А если бы и заказал, то ничего бы из этого не получилось, как у алхимиков, пытавшихся по заказам королей открыть «философский камень», способный превращать простые металлы в золото. Учёные могут открыть только то, что существует в природе. На заказ можно разрабатывать только практические применения уже сделанных научных открытий.

Аня. Я с Таней согласна. Конечно, сначала открытия, а уж потом потребности к их использованию. Но почему же люди стали заниматься наукой, если никто не ждал от них открытий, не обещал за них награды? А многих учёных современники преследовали за их открытия и некоторых даже казнили. Мне кажется, что ответ можно найти, заглянув в далёкое прошлое.

Если всё было по Дарвину, то почему предки человека вдруг вышли на первое место в соревновании всех видов животных на Земле? Они ведь не были

ни самыми сильными, ни самыми быстрыми, ни самыми зубастыми.

Особенности наших предков можно узнать, наблюдая за маленькими детьми. Они не дерутся непрерывно, как волчата, не слоняются бесцельно, как телята, не сидят смирно, как птенцы в гнезде до очередного прилёта родителей с кормом. Ребёнок, как только начинает управлять своими руками, тянется за всем, что попадает ему на глаза, достаёт всё, что может, тянет в рот и пробует, вкусно ли, гремит ли, разбивается ли, если это бросить. Одна из главных особенностей ребёнка — любопытство к предметам окружающего мира.

Способностями исследовать окружающий мир обладают все животные, но у предков человека они, наверное, оказались самыми лучшими. Благодаря этой способности человек развил ум, осознал своё существование и стал задавать себе вопросы о том, что представляет собой окружающий мир.

Учёные — это люди, у которых на всю жизнь сохраняется детское любопытство к познанию окружающего мира, которым интересно задавать Природе всё новые вопросы и думать над её замысловатыми ответами. Чтобы человек мог каждый день думать о звёздах, об атомах, о магнитах и т. п., ему нужно иметь время, свободное от забот о пище, доме, одежде. Больше научных успехов в тех странах, где больше людей имеет возможность удовлетворять своё любопытство к познанию мира без забот о том, что завтра будет на обед.

Галя. А я не согласна ни с кем из четверых. Вы все говорите о мире и о человеке, познающем этот мир. И даже не задумываетесь над тем, а откуда взялись этот мир и человек? Если человек знает, насколько сложен мир и как согласовано в нём до мельчайших частей назначение каждому камню, цветку, птице и бабочке, то он не может поверить, что такой мир мог возникнуть сам собой. Творец этого мира по своим способностям и могуществу ни в какое сравнение не идёт с человеком. Этого творца называют Бог.

Он сотворил все атомы и элементарные частицы, звёзды, галактики, населил нашу планету животными и растениями, создал человека. Он задал и все законы природы.

Если бы он считал нужным, то сразу открыл бы человеку все тайны Вселенной. Он этого не делает, может быть, потому, что поступает с человеком как добрая мать со своим ребёнком, давая ему лишь то, что он может понять и что не принесёт ему вреда. Развитие науки идёт по его плану, кому и когда открыть очередную тайну — это его выбор.

Витя. Мнение Гали опровергнуть невозможно, так как она не приводит научные доводы, а говорит о своей вере. А верить каждый человек может во что угодно. Мне очень хотелось бы жить в таком мире, каким он видится Гале. Чтобы выше всех был добрый и справедливый Бог, чтобы всем воздавал он по делам их. И чтобы у меня была бессмертная душа, способная бесконечно долго жить в раю, где будут находиться только души добрых и отзывчивых людей. Но я не могу поверить в такой мир. Если есть Бог, то почему в этом мире нет доброты и справедливости? Говорят, что это грешные люди всё портят. Да как может человек, созданный Богом по своему образу и подобию, сделать что-то в этом мире против воли Бога? А тысячи различных видов бактерий и вирусов, заражающих человека самыми разнообразными болезнями с первого дня его рождения, с первого вздоха воздуха, разве плохие люди изобрели? Нет же, это всё творения Всемогущего. Это он создал вирусы гриппа, чумы и СПИДа, микробы холеры и оспы. И рак он изобрёл.

Я бы мог понять Бога, если бы видел, что его кара настигает действительно плохих людей — преступников. Но нет на них ни грома небесного, ни чумы. И живёт в этом мире большинство из них значительно комфортнее, чем честные добрые люди. Нет, мне легче поверить в мир, где всё произошло случайно — и вирусы, и человек. Так хоть не на кого обижаться.

Федя. Но вы забыли ещё об одной возможности. Во Вселенной миллиарды миллиардов звёзд, и на каких-то из них жизнь зародилась на миллиарды лет раньше, чем на Земле. Оттуда она начала распространяться по всей Вселенной. На планеты, в то время непригодные для высокоорганизованной жизни, пришельцы забрасывали особые «семена жизни», в которых были закодированы не только процессы питания и размно-

жения, но и ход эволюции по мере изменения условий. Так что мы — продукт саморазвивающейся программы, заброшенной на Землю пришельцами несколько миллиардов лет тому назад. И никакого Дарвина не требуется. Как вам мой вариант?

Кто ещё хочет высказать своё мнение?

Итоговый тест

Вариант 1

Часть 1

А1. Из четырёх природных явлений — неограниченного расширения газа в свободном пространстве, беспрерывного хаотического движения молекул, диффузии и броуновского движения — причиной трёх остальных является

1) беспрерывное хаотическое движение молекул
2) диффузия
3) броуновское движение
4) неограниченное расширение газа в свободном пространстве

А2. Если физическая теория объяснила все известные в данной области физики явления и предсказала существование неизвестных ранее явлений, то эта теория может быть опровергнута

1) созданием новой теории, предсказывающей другие неизвестные явления
2) результатами эксперимента, противоречащими предсказаниям теории
3) проведением такого эксперимента, в котором будут обнаружены новые явления, не связанные с этой теорией
4) выдвижением новой гипотезы, полностью опровергающей эту теорию

А3. При равноускоренном прямолинейном движении скорость тела увеличилась от 1 м/с до 5 м/с за 2 с. Чему равен модуль ускорения тела?

1) 2 м/с^2
2) 2,5 м/с^2
3) 3 м/с^2
4) 4 м/с^2

А4. Какие из трёх графиков (рис. 51) являются графиками скорости равномерного движения?

1) 1, 2 и 3
2) 1 и 2
3) только 1
4) только 2
5) только 3

А5. Если при равноускоренном прямолинейном движении зависимость пройденного телом пути от времени имеет вид $s = 5t + 2t^2$ (м), то ускорение тела равно

1) 5 м/с^2
2) 4 м/с^2
3) 2 м/с^2
4) 1 м/с^2

А6. Если при прямолинейном движении скорость тела изменяется со временем t по закону $v = 3 + 2t$ (м/с), то начальная скорость движения тела равна

1) 6 м/с
2) 4 м/с
3) 3 м/с
4) 2 м/с

А7. На рисунке 52 представлен график зависимости модуля скорости дви-

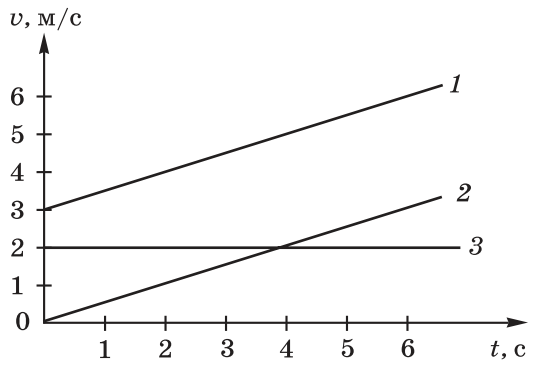

Рис. 51

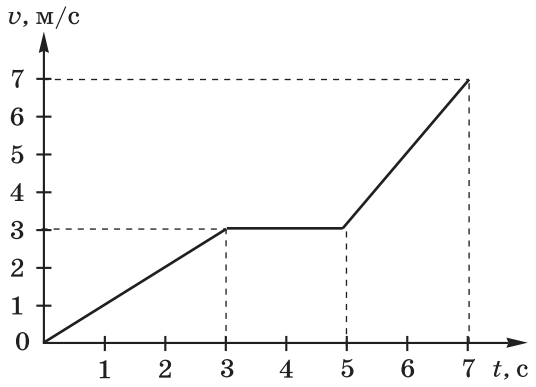

Рис. 52

жения тела от времени. С каким ускорением тело двигалось от момента времени $t = 3$ с до момента времени $t = 5$ с?

1) 3 м/с^2 3) 1 м/с^2
2) 1,5 м/с^2 4) 0 м/с^2

А8. Два велосипедиста движутся равномерно по одному круговому треку. Скорость первого велосипедиста 12 м/с, скорость второго велосипедиста 3 м/с. С каким центростремительным ускорением движется первый велосипедист, если центростремительное ускорение движения второго велосипедиста равно 0,4 м/с^2?

1) 0,1 м/с^2 4) 1,6 м/с^2
2) 0,2 м/с^2 5) 6,4 м/с^2
3) 0,4 м/с^2

А9. Луна движется по орбите вокруг Земли со скоростью 1 км/с. Если бы сила тяготения со стороны Земли вдруг исчезла, то Луна

1) по инерции двигалась бы равномерно прямолинейно со скоростью 1 км/с
2) по инерции двигалась бы равномерно по окружности со скоростью 1 км/с
3) мгновенно остановилась бы
4) постепенно остановилась бы
5) упала бы на Землю

А10. Согласно второму закону Ньютона

1) скорость движения тела прямо пропорциональна произведению массы тела на действующую силу
2) скорость движения тела прямо пропорциональна действующей силе и обратно пропорциональна массе тела
3) ускорение движения тела прямо пропорционально произведению массы тела на действующую силу
4) ускорение движения тела прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела

А11. Спутник движется вокруг планеты. Направление вектора скорости спутника в некоторый момент времени указано на рисунке 53 стрелкой *1*, а направление вектора его ускорения — стрелкой *3*. Какая стрелка на рисунке указывает направление вектора равнодействующей сил, действующих на спутник?

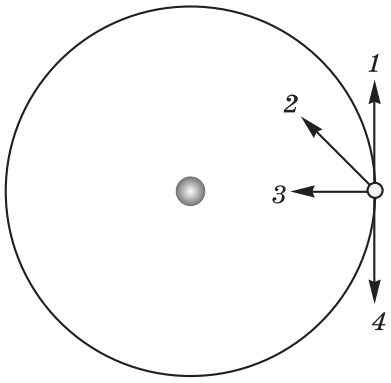

Рис. 53

1) 1 2) 2 3) 3 4) 4
5) ни одна из четырёх, так как равнодействующая равна нулю

А12. На гирю, подвешенную на стальной пружине, действует направленная вертикально вверх сила упругости со стороны пружины. По третьему закону Ньютона равной по модулю силой противодействия является сила

1) упругости, приложенная к пружине со стороны гири и направленная вертикально вверх
2) упругости, приложенная к пружине со стороны гири и направленная вертикально вниз
3) тяготения, приложенная к гире и направленная вертикально вниз
4) тяготения, приложенная к пружине и направленная вертикально вниз

А13. На рисунке 54 представлены три вектора сил, лежащие в одной плоскости и приложенные к одной точке тела. Модуль вектора $\vec{F}_2$ равен 10 Н. Модуль равнодействующей этих трёх сил равен

1) 10 Н 2) 15 Н 3) 20 Н 4) 24 Н

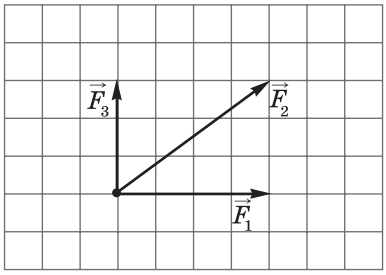

Рис. 54

А14. На автоматическую межпланетную станцию на поверхности Земли действует сила гравитационного притяжения 3600 Н. Чему равен модуль силы гравитационного притяжения, действующей на эту станцию на расстоянии от поверхности Земли в 2 радиуса Земли?

1) 400 Н 3) 1200 Н
2) 900 Н 4) 1800 Н

А15. Пружина жёсткостью 2000 Н/м, сжатая на 10 см, может подбросить гирю массой 0,5 кг из состояния покоя на высоту

1) 400 м 3) 4 м
2) 40 м 4) 2 м

А16. При движении искусственного спутника вокруг Земли по эллиптической орбите его потенциальная энергия при минимальном расстоянии от Земли равна $8 \cdot 10^5$ Дж. В точке максимального удаления от Земли потенциальная энергия спутника увеличивается на $4 \cdot 10^5$ Дж. Как изменяются при этом кинетическая энергия спутника и его полная механическая энергия?

1) кинетическая энергия увеличивается на $4 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия не изменяется
2) кинетическая энергия уменьшается на $4 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия не изменяется
3) кинетическая энергия не изменяется, полная механическая энергия не изменяется
4) кинетическая энергия уменьшается на $4 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия увеличивается на $4 \cdot 10^5$ Дж
5) кинетическая энергия увеличивается на $4 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия уменьшается на $4 \cdot 10^5$ Дж

А17. Если за один цикл работы двигателя внутреннего сгорания поршень совершил механическую работу 20 Дж, а продукты сгорания передали атмосферному воздуху 30 Дж энергии путём теплопередачи, то при сжигании топлива в цилиндре выделилась энергия не менее

1) 10 Дж 3) 30 Дж
2) 20 Дж 4) 50 Дж

А18. Экспериментальные доказательства существования атомного ядра были получены в опытах Резерфорда. В этих опытах было обнаружено, что

1) большинство альфа-частиц проходит через тонкий слой металла почти прямолинейно, а небольшая доля частиц отклоняется на бóльшие углы от первоначального направления движения
2) большинство альфа-частиц отклоняется на бóльшие углы от первоначального направления движения, а небольшая доля частиц проходит через тонкий слой металла почти прямолинейно
3) все альфа-частицы проходят через тонкий слой металла почти прямолинейно
4) все альфа-частицы при прохождении через тонкий слой металла отклоняются на бóльшие углы от первоначального направления движения

А19. Альфа-распадом называется процесс самопроизвольного

1) превращения атомного ядра с выбросом одного быстрого электрона
2) превращения атомного ядра с выбросом одного быстрого протона
3) превращения атомного ядра с выбросом ядра атома гелия из двух протонов и двух нейтронов
4) распада атомного ядра на составляющие его частицы

А20. Энергия атома как системы, состоящей из атомного ядра и электронов, при взаимодействии с другими частицами

1) изменяться не может. Атом может лишь увеличивать или уменьшать свою кинетическую энергию как неизменная частица
2) может изменяться как угодно в зависимости от передаваемой ему энергии
3) может изменяться только квантовано, значения возможных изменений энергии атомов каждого химического элемента свои особые
4) может увеличиваться на любое значение, но излучают энергию атомы только особыми порциями-квантами

А21. Атомное ядро с массовым числом 17 и зарядовым числом 8 содержит

1) 8 протонов и 17 нейтронов
2) 17 протонов и 8 нейтронов

3) 8 протонов и 9 нейтронов
4) 9 протонов и 8 нейтронов

А22. Масса атомного ядра, состоящего из Z протонов и N нейтронов
1) равна сумме масс из Z протонов и N нейтронов
2) больше суммы масс из Z протонов и N нейтронов
3) меньше суммы масс из Z протонов и N нейтронов
4) меньше суммы масс из Z протонов и N нейтронов, если ядро стабильно, но больше суммы масс из Z протонов и N нейтронов, если ядро радиоактивно

А23. Как изменяются зарядовое число Z и массовое число A атомного ядра при электронном бета-распаде?
1) зарядовое число уменьшается на 1, массовое число не изменяется
2) зарядовое число увеличивается на 1, массовое число не изменяется
3) зарядовое число уменьшается на 1, массовое число увеличивается на 1
4) зарядовое число увеличивается на 1, массовое число уменьшается на 1

А24. Определите, какая частица X вылетела при осуществлении ядерной реакции, в которой ядро алюминия под действием альфа-частицы превратилось в ядро фосфора:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + X$$

1) электрон
2) протон
3) нейтрон
4) гамма-квант

А25. Для осуществления термоядерных реакций синтеза ядер гелия из ядер водорода требуется нагреть вещество до температуры в десятки миллионов градусов
1) потому что между одноимённо заряженными ядрами водорода действуют кулоновские силы отталкивания. Для их сближения до расстояния, на котором действуют ядерные силы притяжения, нужна бóльшая кинетическая энергия
2) чтобы сначала разрушить атомные ядра на составляющие их нуклоны, а затем синтезировать из них ядра гелия
3) чтобы накопленная при нагревании энергия выделилась при взрыве
4) чтобы осуществить радиоактивный распад ядер водорода

А26. Какова система устройства мира по Копернику и как она называется?
1) система мира, в которой Земля находится в центре, а вокруг неё вращаются Луна, Солнце, планеты и звёзды. Такая система называется геоцентрической
2) система мира, в которой Земля находится в центре, а вокруг неё вращаются Луна, Солнце, планеты и звёзды. Такая система называется гелиоцентрической
3) система мира, в которой Солнце находится в центре, а вокруг него вращаются Земля и планеты. Видимое суточное вращение звёзд и других светил объясняется вращением Земли вокруг оси. Такая система называется гелиоцентрической
4) система мира, в которой Солнце находится в центре, а вокруг него вращаются Земля и планеты. Видимое суточное вращение звёзд и других светил объясняется вращением Земли вокруг оси. Такая система называется геоцентрической

Часть 2

Выполните задания В1—В4 и впишите полученные ответы на поставленные вопросы без записи хода решения.

В1. Самолёт массой 200 т под действием общей силы тяги двигателей $5 \cdot 10^5$ Н движется по взлётной полосе с ускорением 2 м/с^2. Чему равна общая сила сопротивления во время этого движения самолёта? Ответ запишите в ньютонах.

В2. Человек массой 50 кг в неподвижной лодке массой 200 кг прыгнул в горизонтальном направлении от носа к корме лодки. Скорость движения человека относительно лодки во время прыжка была равна 5 м/с. С какой скоростью двигалась лодка относительно

воды во время полёта человека над лодкой? Ответ запишите в метрах в секунду.

В3. Автомобиль массой 500 кг двигался по шоссе со скоростью 20 м/с и столкнулся с автомобилем массой 2 т, двигавшимся со скоростью 10 м/с в том же направлении. После столкновения автомобили стали двигаться вместе. Какое количество энергии было израсходовано на разрушение автомобилей в момент столкновения? Ответ запишите в джоулях.

В4. Вычислите энергию связи нуклонов в ядре гелия $^3_2$He. Масса ядра гелия $^3_2$He равна 3,01493 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., 1 а. е. м. = 931,5 МэВ. Ответ запишите в мэгаэлектронвольтах с точностью до трёх значащих цифр.

Вариант 2

Часть 1

А1. Существуют следующие природные явления: гравитационное притяжение тел; свободное падение тел на Землю; атмосферное давление; движение планет вокруг Солнца. Из них причиной трёх других является

1) свободное падение тел на Землю
2) гравитационное притяжение тел
3) атмосферное давление
4) движение планет вокруг Солнца

А2. Размышляя о причине движения Луны по окружности вокруг Земли, Ньютон предположил, что причиной такого движения является сила притяжения Луны со стороны Земли. Чем было это предположение?

1) физическим опытом
2) гипотезой
3) теорией
4) результатом расчётов
5) физическим законом

А3. При равноускоренном прямолинейном движении скорость автомобиля увеличилась от 10 до 25 м/с за 5 с. Чему равен модуль ускорения автомобиля?

1) 7 м/с 2) 5 м/с 3) 3 м/с 4) 2 м/с

А4. Какие из трёх графиков (рис. 55) являются графиками скорости равноускоренного движения с модулем ускорения, отличным от нуля?

1) 1, 2 и 3
2) 1 и 2
3) 1 и 3
4) только 1
5) только 2

А5. Зависимость пройденного телом пути от времени при прямолинейном движении имеет вид $s = 10t + 2t^2$ (м). Чему равна начальная скорость тела?

1) 20 м/с
2) 10 м/с
3) 4 м/с
4) 2 м/с
5) 1 м/с

А6. Зависимость скорости тела от времени при прямолинейном движении имеет вид $v = 16 + 2t$ (м/с). Чему равно ускорение тела?

1) 16 м/с^2
2) 8 м/с^2
3) 4 м/с^2
4) 2 м/с^2
5) 1 м/с^2

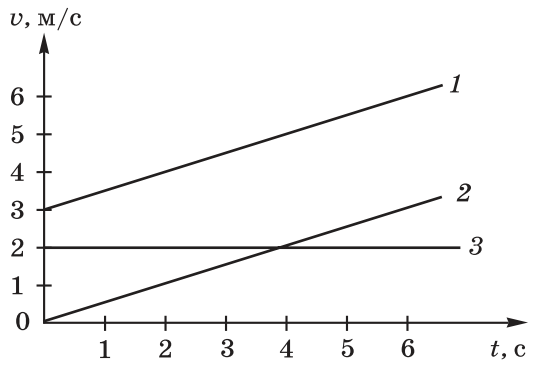

Рис. 55

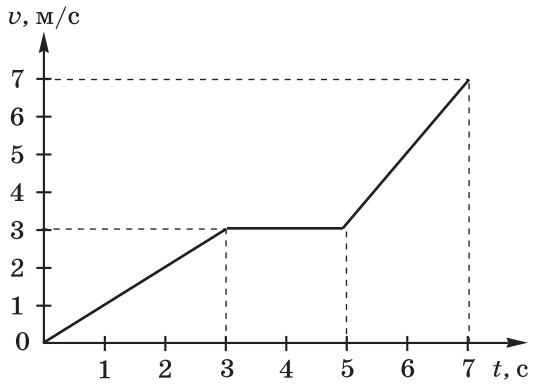

Рис. 56

А7. На рисунке 56 представлен график зависимости модуля скорости движения тела от времени. Каким было ускорение движения тела от момента времени $t = 5$ с до момента времени $t = 7$ с?

1) 7 м/с^2
2) 4 м/с^2
3) 2 м/с^2
4) 1 м/с^2
5) 0 м/с^2

А8. При равномерном движении автомобиля по окружности со скоростью 10 м/с его центростремительное ускорение равно 2 м/с^2. Чему будет равно центростремительное ускорение автомобиля при равномерном движении по той же траектории со скоростью 5 м/с?

1) 8 м/с^2
2) 4 м/с^2
3) 1 м/с^2
4) 0,5 м/с^2

А9. Земля движется вокруг Солнца по орбите со скоростью 30 км/с. Если бы сила тяготения со стороны Солнца вдруг исчезла, то Земля

1) по инерции двигалась бы равномерно прямолинейно со скоростью 30 км/с
2) по инерции двигалась бы равномерно по окружности со скоростью 30 км/с
3) мгновенно остановилась бы
4) постепенно остановилась бы
5) упала бы на Солнце

А10. Согласно второму закону Ньютона

1) ускорение движения тела прямо пропорционально произведению массы тела на действующую силу
2) ускорение движения тела прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела
3) скорость движения тела прямо пропорциональна произведению массы тела на действующую силу
4) скорость движения тела прямо пропорциональна действующей силе и обратно пропорциональна массе тела

А11. Планета движется вокруг звезды. Направление вектора скорости планеты в некоторый момент времени указано на рисунке 57 стрелкой *1*, направление вектора её ускорения — стрелкой *3*. Какая стрелка на рисунке указывает направление вектора равнодействующей сил, действующих на планету?

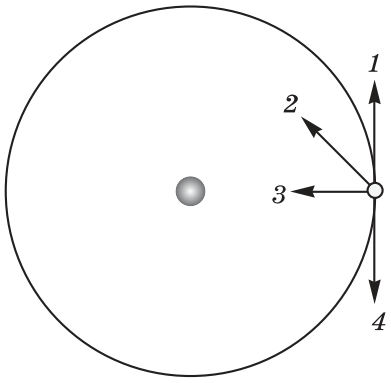

Рис. 57

1) 1 2) 2 3) 3 4) 4
5) равнодействующая равна нулю

А12. На гирю, подвешенную на стальной пружине, действует направленная вертикально вниз сила тяготения со стороны Земли. По третьему закону Ньютона равной по модулю силой противодействия является сила

1) упругости, приложенная к гире со стороны пружины и направленная вертикально вверх
2) упругости, приложенная к пружине и направленная вертикально вниз
3) тяготения, приложенная к Земле и направленная вертикально вверх
4) тяготения, приложенная к пружине и направленная вертикально вниз

А13. На рисунке 58 представлены три вектора сил, лежащих в одной плоскости и приложенных к одной точке тела. Модули векторов $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$ равны соответственно 8, 10 и 6 Н. Модуль равнодействующей этих трёх сил равен

1) 0 Н
2) 10 Н
3) 20 Н
4) 24 Н

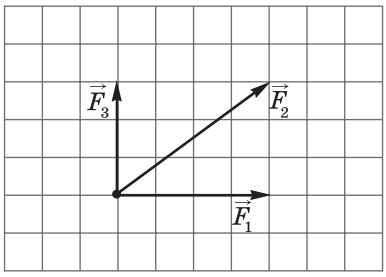

Рис. 58

А14. 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?

1) 100 Н
2) 200 Н
3) 800 Н
4) 1600 Н

А15. Если гиря массой 0,5 кг из состояния покоя упадёт с высоты 2 м на пружину жёсткостью 2000 Н/м, то в случае полного превращения кинетической энергии гири в потенциальную энергию упругой деформации сжатой пружины максимальное значение деформации пружины будет равно

1) 0,01 м
2) ≈0,03 м
3) ≈0,07 м
4) 0,1 м

А16. 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?

1) потенциальная энергия увеличивается на $6 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия не изменяется
2) потенциальная энергия уменьшается на $6 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия не изменяется
3) потенциальная энергия не изменяется, полная механическая энергия не изменяется
4) потенциальная энергия увеличивается на $6 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия увеличивается на $6 \cdot 10^5$ Дж
5) потенциальная энергия уменьшается на $6 \cdot 10^5$ Дж, полная механическая энергия уменьшается на $12 \cdot 10^5$ Дж

А17. Если 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, то поршень совершил механическую работу не более чем

1) 80 Дж
2) 50 Дж
3) 30 Дж
4) 20 Дж

А18. Рассеяние небольшой доли альфа-частиц после прохождения через тонкий слой металла на большие углы от первоначального направления движения Резерфорд объяснил тем, что

1) масса альфа-частицы значительно больше массы электрона
2) в атоме электроны находятся внутри большого положительно заряженного шара, поэтому электрическое поле в атоме очень слабое
3) внутри атома имеется положительно заряженное ядро малых размеров с большой массой и сильным электрическим полем
4) отрицательный электрический заряд электронов атома равен по модулю положительному заряду атомного ядра, в целом атом нейтрален

А19. Электронным бета-распадом называется процесс

1) выброса атомом электронов с электронной оболочки
2) выбивания альфа-частицей электрона из оболочки атома
3) выбивания альфа-частицей электрона из атомного ядра
4) самопроизвольного превращения ядра с выбросом одного электрона

А20. Спектр излучения вещества в газообразном состоянии при высокой температуре и низком давлении состоит из отдельных цветных линий потому, что в таком состоянии

1) атомы вещества не взаимодействуют с друг другом. Энергия любого атома может изменяться лишь определёнными порциями, квантовано. При переходе атома из одного квантового состояния в другое испускается свет определённой частоты
2) атом каждого вещества способен колебаться со своей собственной частотой. Каждой частоте колебаний соответствует свой цвет излучаемого света
3) излучение света происходит при движении заряженных частиц. В горячем газе атомы разной массы движутся с разными скоро-

стями и излучают свет разного цвета
4) излучение света происходит при движении электронов вокруг ядра. В атомах разных химических элементов электроны движутся по разным орбитам, поэтому спектр излучений у них различный

А21. Атомное ядро, состоящее из 8 протонов и 9 нейтронов, имеет
1) зарядовое число 8, массовое число 9
2) зарядовое число 9, массовое число 8
3) зарядовое число 8, массовое число 17
4) зарядовое число 9, массовое число 17

А22. Если сравнить сумму энергии покоя свободных Z протонов и N нейтронов с энергией покоя атомного ядра из этих протонов и нейтронов и с энергией связи этих протонов и нейтронов в атомном ядре, то окажется, что
1) самое большое значение имеет сумма энергий покоя свободных Z протонов и N нейтронов
2) самое большое значение имеет энергия покоя атомного ядра
3) самое большое значение имеет энергия связи атомного ядра
4) все эти три энергии одинаковы

А23. Как изменяются зарядовое число Z и массовое число A атомного ядра при альфа-распаде?
1) зарядовое число уменьшается на 2, массовое число уменьшается на 2
2) зарядовое число уменьшается на 2, массовое число уменьшается на 4
3) зарядовое число увеличивается на 1, массовое число не изменяется
4) зарядовое число увеличивается на 2, массовое число уменьшается на 4

А24. Определите, какая частица X освободилась при осуществлении ядерной реакции, в которой под действием нейтрона ядро азота превратилось в ядро углерода:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + X$$

1) электрон
2) протон
3) нейтрон
4) гамма-квант

А25. На практике осуществляются цепные реакции деления ядер урана и реакции синтеза ядер гелия из ядер водорода. При этом нагревание вещества до температуры в десятки миллионов градусов
1) требуется только для осуществления цепных реакций деления
2) требуется только для осуществления реакций синтеза ядер гелия
3) требуется и для осуществления цепных реакций деления, и для осуществления реакций синтеза ядер гелия
4) не требуется ни для осуществления цепных реакций деления, ни для осуществления реакций синтеза ядер гелия

А26. Какова система устройства мира по Птолемею и как она называется?
1) система мира, в которой Земля находится в центре мира, а вокруг неё вращаются Луна, Солнце, планеты и звёзды. Такая система называется геоцентрической
2) система мира, в которой Земля находится в центре мира, а вокруг неё вращаются Луна, Солнце, планеты и звёзды. Такая система называется гелиоцентрической
3) система мира, в которой Солнце находится в центре планетной системы, вокруг него вращаются Земля и планеты. Видимое суточное вращение звёзд и других светил объясняется вращением Земли вокруг оси. Такая система называется гелиоцентрической
4) система мира, в которой Солнце находится в центре планетной системы, вокруг него вращаются Земля и планеты. Видимое суточное вращение звёзд и других светил объясняется вращением Земли вокруг оси. Такая система называется геоцентрической

Часть 2

Выполните задания B1—B4 и впишите полученные ответы на поставленные вопросы без записи хода решения.

B1. 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 м/с^2. Чему равен модуль силы трения, действующей на поезд?

B2. 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?

B3. 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?

B4. Вычислите энергию связи нуклонов в ядре атома изотопа водорода $^3_1$H. Масса $m_я$ ядра изотопа водорода $^3_1$H 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., 1 а. е. м. = 931,5 МэВ. Ответ запишите в мэгаэлектронвольтах с точностью до трёх значащих цифр.

Коды правильных ответов на задания тестов

Тест 1

Номер задания	Номер правильного ответа				
	1	2	3	4	5
1	×				
2				×	
3		×			
4			×		
5				×	
6				×	
7				×	
8		×			
9			×		
10			×		
11					×
B1	10				
B2	10				
B3	0,25				

Тест 2

Номер задания	Номер правильного ответа				
	1	2	3	4	5
1			×		
2			×		
3			×		
4			×		
5			×		
6		×			
7				×	
8					×
9			×		
10				×	
11				×	
12			×		
B1	20				
B2	7000				
B3	1250				

Тест 3

Номер задания	Номер правильного ответа				Номер задания	Номер правильного ответа			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	×				8			×	
2		×			9		×		
3	×				10			×	
4			×		11		×		
5			×		12				×
6			×		13			×	
7	×				14	×			

Итоговый тест

Вариант 1

Часть 1, 2

Номер задания	Номер правильного ответа				
	1	2	3	4	5
1	×				
2		×			
3	×				
4					×
5		×			
6			×		
7				×	
8					×
9	×				
10				×	
11			×		
12		×			
13			×		
14	×				
15				×	
16		×			
17				×	
18	×				
19			×		
20			×		
21			×		
22			×		
23		×			
24			×		
25	×				
26			×		
B1	100 000				
B2	1				
B3	20 000				
B4	7,72				

Вариант 2

Часть 1, 2

Номер задания	Номер правильного ответа				
	1	2	3	4	5
A1		×			
A2		×			
A3			×		
A4		×			
A5		×			
A6				×	
A7			×		
A8				×	
A9	×				
A10		×			
A11			×		
A12			×		
A13			×		
A14	×				
A15				×	
A16	×				
A17				×	
A18			×		
A19				×	
A20	×				
A21			×		
A22	×				
A23		×			
A24		×			
A25		×			
A26	×				
B1	250 000				
B2	5				
B3	180 000				
B4	848				

Оглавление

Глава 1. Цели и задачи обучения физике в основной школе 3

Программа по физике 6

Тематическое поурочное планирование . . 7

Глава 2. Физика и физические методы изучения природы. Законы механического движения 9

§ 1. Методы научного познания . . . . . —

§ 2. Система отсчёта и координаты точки 12

§ 3. Мгновенная скорость. Ускорение . . 15

§ 4. Путь при равноускоренном движении 20

§ 5. Равномерное движение по окружности 24

§ 6. Относительность механического движения 25

§ 7. Первый закон Ньютона 30

§ 8. Второй закон Ньютона 34

§ 9. Сложение сил 39

§ 10. Третий закон Ньютона 41

§ 11. Закон всемирного тяготения 42

§ 12. Движение тел под действием силы тяжести 46

Тест 1 48

Глава 3. Законы сохранения 51

§ 13. Закон сохранения импульса . . . . —

§ 14. Кинетическая энергия 57

§ 15. Работа 60

§ 16. Потенциальная энергия гравитационного притяжения тел 62

§ 17. Потенциальная энергия упругой деформации тел 65

§ 18. Закон сохранения механической энергии 67

§ 19. Закон сохранения энергии в тепловых процессах 74

§ 20. Принцип работы тепловых машин 77

Тест 2 . . . . . —

Глава 3. Квантовые явления 80

§ 21. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома . . . . . —

§ 22. Линейчатые оптические спектры. Поглощение и испускание света атомами 82

§ 23. Состав атомного ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядра . . . . . —

§ 24. Радиоактивность 84

§ 25. Экспериментальные методы регистрации заряженных частиц 86

§ 26. Ядерные реакции 87

§ 27. Ядерная энергетика 91

§ 28. Дозиметрия 92

Глава 4. Строение Вселенной 93

§ 29. Геоцентрическая система мира . . . —

§ 30. Гелиоцентрическая система мира 94

§ 31—34. Солнечная система. Физическая природа Солнца и звёзд. Строение и эволюция Вселенной 95

Тест 3 96

§ 35. Как и зачем делаются научные открытия 98

Итоговый тест 100

Коды правильных ответов на задания тестов 109

Учебное издание

Кабардин Олег Фёдорович
Кабардина Светлана Ильинична

ФИЗИКА

Книга для учителя

9 класс

Пособие для общеобразовательных учреждений

ЦЕНТР ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Руководитель Центра *В. И. Егудин*
Зам. руководителя Центра *Е. К. Липкина*
Редактор *Т. П. Каткова*
Младший редактор *Т. И. Данилова*
Художественный редактор *Т. В. Глушкова*
Технический редактор и верстальщик *Е. В. Саватеева*
Корректоры *Ф. А. Шагиданова, Л. С. Александрова*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать с оригинал-макета 15.04.10. Формат $84 \times 108\,{}^{1}/_{16}$. Бумага писчая. Гарнитура Школьная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 10,01. Тираж 1500 экз. Заказ № .

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение».
127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Открытое акционерное общество «Смоленский полиграфический комбинат».
214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.