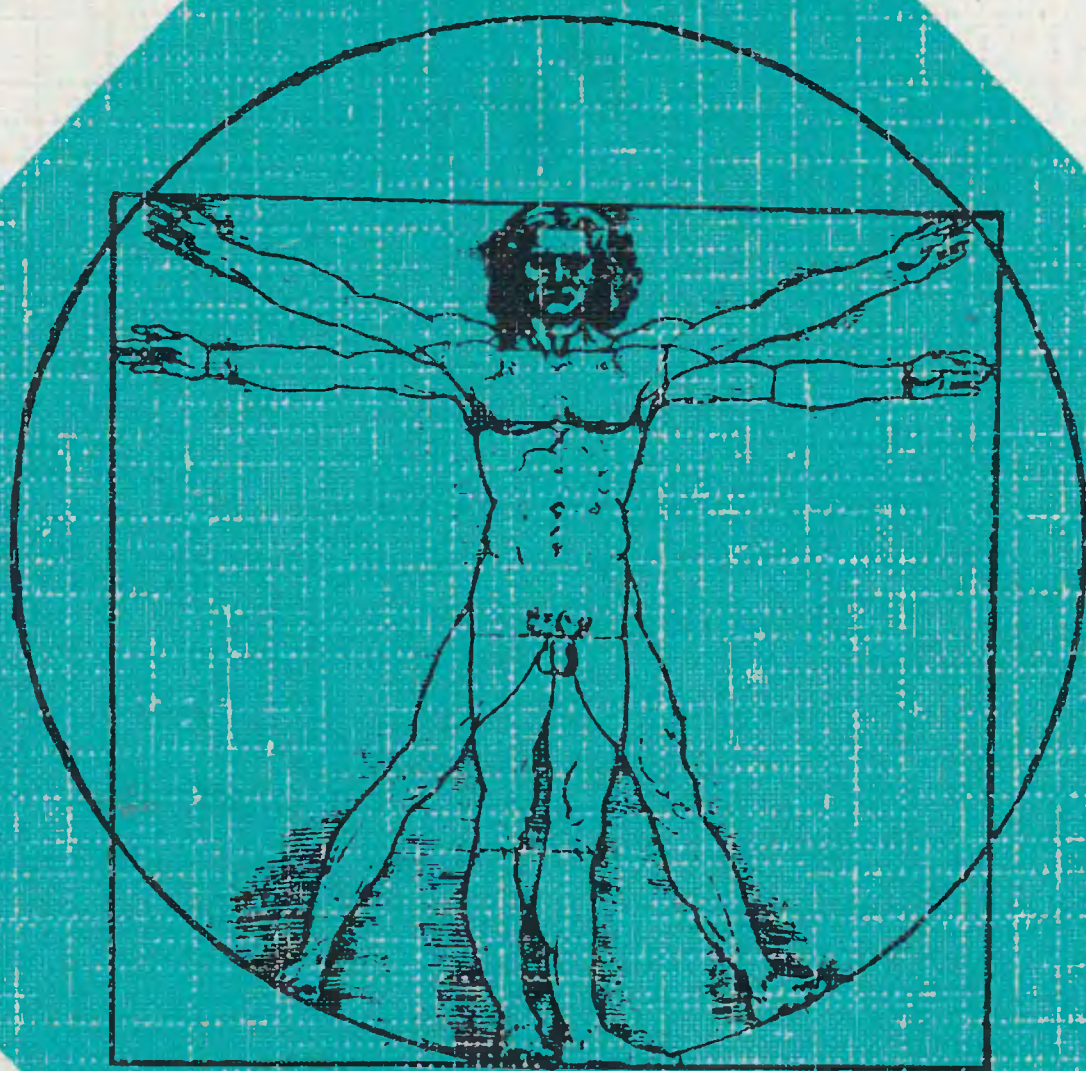


ПРОГРАММА
ОБНОВЛЕНИЕ
ГУМАНИТАРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
В РОССИИ



С. А. Чандаева

ФИЗИКА
И ЧЕЛОВЕК

ПРОГРАММА
·ОБНОВЛЕНИЕ
ГУМАНИТАРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
В РОССИИ·

С.А. Чандаева

ФИЗИКА И ЧЕЛОВЕК

*Пособие для учителей физики
общеобразовательных учреждений*



АД АСПЕКТ ПРЕСС

Москва
1994

Ч18 **Чандаева С.А.**
Физика и человек: Пособие для учителей физики общеобразоват. учреждений, гимназий и лицеев. — М.: АО «Аспект Пресс», 1994. — 336 с. — (Программа: Обновление гуманитар. образования в России). ISBN 5-86318-088-9.

В книге обобщен опыт гуманитаризации преподавания курса физики. При этом «очеловечивание» физики осуществляется путем включения в содержание курса вопросов, связанных с рассмотрением человека как объекта и субъекта физического познания, а также взаимодействия человека и окружающей его естественной и искусственной среды.

Пособие может быть использовано в качестве руководства для осуществления гуманитаризации процесса обучения физике в классах всех профилей: технических, физико-технических, биолого-химических, медицинских и гуманитарных.

Книга предназначена учителям, а также преподавателям вузов, техникумов и средних специальных учебных заведений.

Ч 4306010200—29
998(01)—94

ББК 74.265.1

В 1992 году в рамках российской образовательной реформы была развернута программа «Обновление гуманитарного образования в России». Эта программа реализуется совместными усилиями Министерства образования России, Государственного комитета РФ по высшему образованию, Международного фонда «Культурная инициатива» и Международной ассоциации развития и интеграции образовательных систем.

Основная цель программы — гуманизация образования, создание нового поколения вариативных учебников и учебных пособий, ориентированных на ценности отечественной и мировой культуры современного демократического общества.

В целях реализации программы было организовано три тура конкурса, в котором приняло участие более полутора тысяч авторских коллективов из различных регионов России. В конкурсной комиссии работали как отечественные, так и зарубежные эксперты.

Другими направлениями программы являлись: организация творческих мастерских для авторов учебников и учебных пособий, переподготовка преподавателей гуманитарных дисциплин, создание региональных экспериментальных площадок, центров гуманитарного образования, Международного центра экономического образования, Международной лаборатории гуманитарного образования и т.д.

Спонсором программы выступил известный американский предприниматель и общественный деятель Джордж Сорос.

Данное издание представляет оригинальную авторскую работу, вошедшую в число победителей на конкурсе. Издательство с благодарностью примет отзывы, а также замечания и предложения в адрес данной работы, проходящей экспериментальную проверку в учебных аудиториях.

Стратегический комитет программы:

Эдуард Днепров — сопредседатель

Теодор Шанин — сопредседатель

Виктор Болотов

Нина Брагинская

Дэн Дэвидсон

Михаил Кузьмин

Елена Ленская

Елена Соболева

Евгений Ткаченко

Предисловие

Цель предлагаемого методического пособия — оказание помощи учителям школ в осуществлении гуманитаризации курса физики. Из всех возможных путей гуманитаризации курса физики в книге рассматривается наименее разработанное в методической литературе направление, связанное с многообразными связями физики и человека, которое мы назвали "Человек — объект физического познания". Суть его состоит во включении в содержание обучения физике ряда идей, которые можно разделить на группы, озаглавленные "Место человека в окружающем мире", "Диалектика связи человека и природы", "Процесс познания человеком природы и себя как ее составной части".

Первая группа включает в себя следующие идеи:

- человек — физический объект;
- человек — физическая система;
- место человека в окружающем мире;
- физические возможности человека.

Вторая группа объединяет такие идеи, как:

- человек — часть природы;
- роль среды в возникновении жизни на Земле;
- природа — сфера бытия и объект практической деятельности человека;

- экология природы и "экология" человека;

- проблема уникальности разумной жизни.

И наконец, третью группу составляют идеи:

- человек — субъект познания;
- антропоцентрический характер процесса познания;
- антропный принцип;
- проблема контакта с другими цивилизациями.

Структура пособия совпадает со структурой курса физики средней школы, расширенного за счет включения некоторых вопросов из курса повышенного уровня и вузовского курса. Материал гуманитарной направленности разделен по пара-

графам пособия так, чтобы дополнять и иллюстрировать содержание соответствующих тем раздела. Характер включенного в пособие материала таков: а) тексты, раскрывающие те или иные гуманитарные идеи; б) задачи; в) практические задания; г) лабораторные работы; д) демонстрационные опыты.

Задачи подобраны и сформулированы таким образом, чтобы они либо освещали с гуманитарной точки зрения традиционное содержание раздела "Механика", либо иллюстрировали вновь включенный материал. Так, большинство задач пособия, объединенных идеей "очеловечивания" физики, — это задачи:

в которых человек является перемещающимся или взаимодействующим объектом;

позволяющие определить место человека в окружающем мире;

в которых рассматриваются процессы, происходящие в организме человека;

позволяющие оценить физические характеристики человека.

Поскольку при изложении ряда вопросов невозможно было обойтись без астрономической проблематики, в пособие вошли некоторые задачи астрономического содержания. Кроме обычных, расчетных задач, широко использованы оценочные задачи и задачи с неполными данными.

Все лабораторные работы, практические задания и демонстрационные опыты посвящены теме "Человек и физика"; часть их носит оригинальный характер, а часть поставлена по аналогии с хорошо известными в методике преподавания физики.

Кроме предложений по изменению содержания обучения физике с целью его гуманитаризации, в пособии имеются рекомендации, как организовать проблемные ситуации, провести эвристическую беседу, разработать уроки по систематизации знаний учащихся, реализовать элементы деятельностного подхода к процессу выработки у учащихся навыков познавательной деятельности и знаний мировоззренческого, гуманитарного характера. Кроме того, приведено несколько заданий, которые могут быть использованы для моделирования на ЭВМ некоторых связанных с изучением человека процессов.

Многообразие представленных в пособии материалов позволяет надеяться, что преподаватели и учителя смогут выбрать из них наиболее близкие своему образу мыслей и собственному видению процесса гуманитаризации обучения физике. Различный уровень сложности материала и широкий диапазон рассматриваемых идей дают возможность использо-

вать пособие для организации процесса изучения физики в классах разного профиля: технических, физико-математических, биолого-химических, медицинских, гуманитарных. Действительно, в классах первых двух специализаций будут интересны новая система примеров, иллюстрирующих физические закономерности, и задачи повышенного уровня. Идеи предлагаемых в пособии лабораторных работ могут быть использованы в этих классах в качестве тем специальных исследований. Учащиеся классов следующих двух специализаций получат много новой информации о физической основе работы живых организмов, об обусловленности их свойств физическими условиями окружающей среды, познакомятся с физическими аспектами экологических проблем. Проблематика многих лабораторных работ, вошедших в пособие, сориентирована непосредственно на таких учащихся, хотя может быть интересна и в классах другой направленности. В гуманитарных классах эти лабораторные работы могут иметь успех вследствие простоты используемых для их проведения установок, более конкретной, направленной на изучение «самого себя» тематики. Кроме того, учащимся этих классов будет небезынтересно узнать о философских аспектах связей человека и природы, познакомиться с тем, как физика пытается ответить на «вечные вопросы» человечества.

Наполнение курса физики проблематикой гуманитарного содержания, как надеется автор, обеспечит «очеловечивание» физики, позволит акцентировать внимание учащихся на гуманистическом аспекте научного мировоззрения и послужит решению общеобразовательных, общекультурных и нравственных задач. Вместе с тем это открывает новые и эффективные возможности для более убедительной мотивации изучения физики путем рассмотрения физических возможностей человека, его места в окружающем мире и роли, которая ему отведена в эволюции Вселенной, а также путем получения результатов, которые научат школьников более осознанно применять на практике физические законы, правильно (оптимально и безопасно для жизни) действовать в реальном мире.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

§ 1. Физика. Человек. Окружающий мир

Человек и физика Определяя предмет физики как науки, говорят: «Физика — наука о неживой природе» [12, 3]. Однако человека, хотя он и относится к живой, осознающей себя материи, нельзя не считать объектом изучения физики.

Действительно, человек живет в мире, устроенном и функционирующем в соответствии с законами, являющимися предметом изучения физики. Само происхождение человека, особенности, которыми он обладает, его будущее связаны не только с эволюцией окружающего мира, но и с развитием свойств человека и определяются физическими условиями во Вселенной и физическими законами, действующими в ней.

Человек — физический объект, который наравне с объектами другой природы совершает перемещения, участвует в силовых взаимодействиях, подвергается влиянию физических полей разного рода.

Человек — сложная физическая система: функционирование ее отдельных частей (физиологические системы, органы, клетки), взаимодействие с окружающей средой (метаболизм) определяются физическими процессами.

Человек — субъект познания: наблюдения, измерения, эксперимент, гипотеза, модель, теория — изобретения человека, при помощи которых он изучает и объясняет окружающий мир и себя в этом мире.

Человек — член большого сообщества себе подобных. На благо себе и человечеству он применяет достижения наук, в том числе и физики, видоизменяя и приспособлявая к своим потребностям окружающую среду, стремясь тем не менее не нарушать с ней гармоничного единства.

По сравнению с другими науками, по определению изучающими человека, — биологией, физиологией, генетикой, психологией, философией, социологией — физика позволяет

«увидеть» этот исключительно важный в современную эпоху объект исследования с новой точки зрения и дополнить психобиологическое представление о человеке физической причинностью.

Таким образом, изучая физику, можно продвинуться по пути познания человеком самого себя, лучше понять его природу и возможности, поскольку человек — часть и продукт мира, понять и объяснить который призвана физика.

**Физические
параметры,
характеризующие
окружающий мир**

Окружающий нас мир можно охарактеризовать множеством разнообразных параметров.

Известная нам часть Вселенной имеет линейные размеры порядка 10^{26} м. На шкале линейных размеров она будет располагаться на правом конце. На другом конце шкалы должен находиться размер наименьшей из известных на сегодня линейных величин — радиуса ядра водорода (протона), равный примерно 10^{-15} м. Для размещения величин с таким разбросом используется логарифмический масштаб или масштаб, степеней 10 (рис. 1.1). Единицей длины на этой шкале служит 1 м. Человек, имеющий рост порядка 2 м, располагается в центре шкалы. Договоримся отмечать все значения, относящиеся к интересующему нас объекту — человеку, с левой стороны шкалы.

Задача 1.1. Постройте свою шкалу линейных размеров окружающего мира в масштабе степеней 10, при котором два соседних деления шкалы отличаются в 10 раз. Для построения шкалы используйте данные из справочников, энциклопедий, учебников и т.д.

Задача 1.2. Найдите отношение радиуса Вселенной (10^{26} м) к радиусу протона (10^{-15} м).

Получившийся в результате расчета результат (10^{40} м) очень важное число, играющее существенную роль в законе больших чисел Дирака. По мнению П.Дирака, число 10^{40} не случайное, так как оно получается и при других расчетах, связанных с комбинациями мировых констант. Это число косвенным образом позволяет подсчитать возраст Вселенной (см. задачу 1.8).

Возраст Вселенной (время жизни Вселенной), по данным современной науки, равен 10^{18} с (10^9 лет). Это наибольший временной интервал, известный людям. От наименьшего временного промежутка (10^{-24} с) — времени, за которое свет проходит расстояние, равное размеру атомного ядра (см. за-

Линейные размеры, встречающиеся в мире

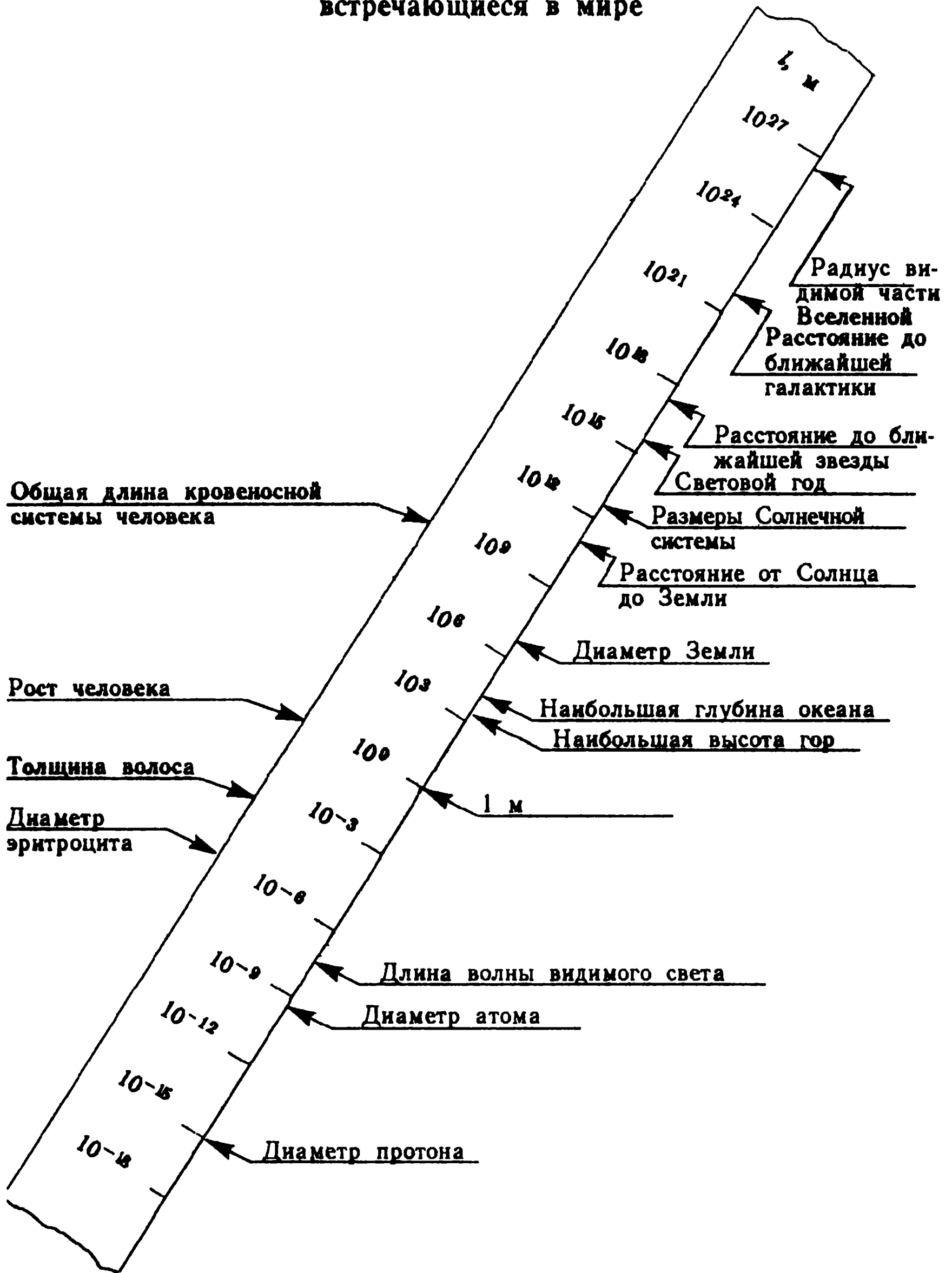


Рис. 1.1

Время в природе

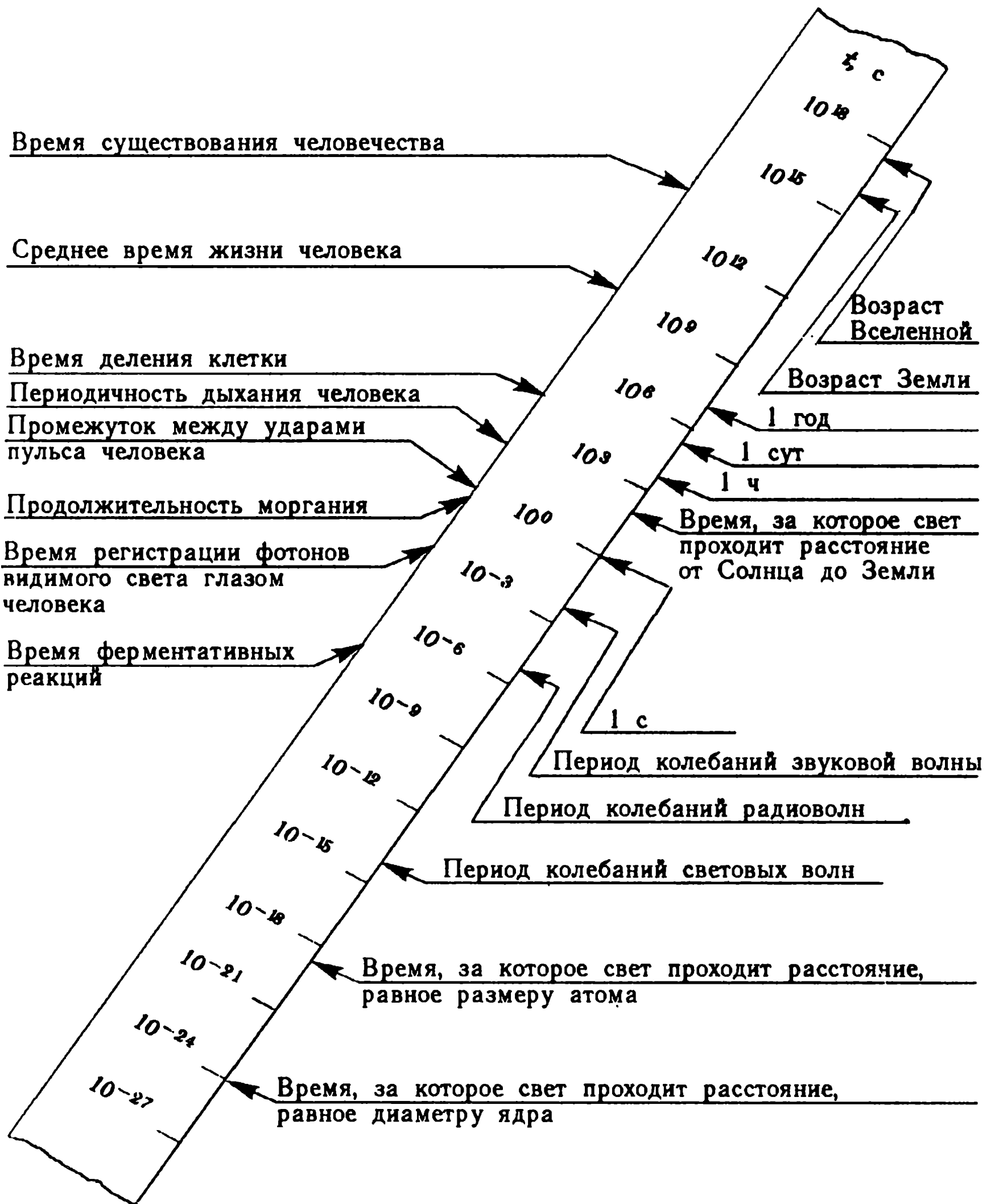


Рис. 1.2

дачу 1.7), — он отделен более чем 40 порядками. На диаграмме «Время в природе», изображенной на рисунке 1.2 в логарифмическом масштабе, эти величины занимают крайнее правое и левое положения соответственно. Единица времени 1 с совпадает с промежутком времени между двумя последовательными сокращениями сердечной мышцы человека.

Задача 1.3. Подсчитайте свой возраст в секундах с точностью не менее $3 \cdot 10^4$ с (не забудьте про високосные годы).

Задача 1.4. Постройте в логарифмическом масштабе шкалу длительности физических процессов. Отметьте на ней время жизни человека. Примите его в среднем равным 70 годам. Сравните его со временем существования Вселенной, Солнечной системы, человечества.

Задача 1.5. Человеческое сердце — великолепный двигатель. В среднем оно бьется с частотой 72 удара в минуту. Сколько ударов совершит сердце к 70 годам?

Задача 1.6. Сколько поколений людей сменилось со времени появления первобытного человека?

Всего на Земле, по подсчетам ученых, от завершения антропогенеза до наших дней жило около 100 млрд. индивидов.

Задача 1.7. В современной атомной физике за единицу времени принят временной интервал, за который свет проходит расстояние, равное диаметру атомного ядра. Вычислите это значение, если радиус ядра $r = 10^{-15}$ м, а скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Задача 1.8. Пользуясь результатом предыдущей задачи, оцените время существования Вселенной (10^{18} с) в этих единицах.

Задача 1.9. Определите радиус видимой части Вселенной, если известно, что свет от звезд идет к нам со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, а время существования Вселенной приблизительно равно 10^{18} с.

Диапазон масс, характеризующих окружающий мир, — от массы электрона ($9 \cdot 10^{-31}$ кг) до массы известной части Вселенной (10^{53} кг) — составляет приблизительно 80 порядков. Человек, чья масса находится в пределах 50—100 кг, располагается близко к центру шкалы масс, за единицу масштаба которой принят 1 кг (рис. 1.3).

Интересным параметром, описывающим распределение вещества в пространстве, является плотность (рис. 1.4). Интервал плотностей разных видов вещества во Вселенной очень велик: от плотности Вселенной через 10^{-42} с после Большого Взрыва (10^{93} кг/м³) до плотности вещества в межгалактическом пространстве (10^{-30} кг/м³).

Задача 1.10. Почему плотность тела человека и животных почти совпадает с плотностью воды?

Р е ш е н и е

Из всех возможных форм существования жизни на нашей планете развилась химическая форма жизни. Одна из особенностей химической жизни — способность образовывать большие сложные молекулы, что, в свою очередь, позволяет запасаться информацией, необходимой для функционирования живого организма. При этом земная жизнь использует в качестве среды, в которой происходят химические реакции, обеспечивающие сохранение жизни и размножение, — воду. Говоря, что человек состоит из воды, мы подчеркиваем, что вода в качестве жизненной среды «победила» в процессе эволюции газы и твердые тела, так как с энергетической точки зрения «химия» растворов оказалась более выгодной, чем «химия» других физических веществ.

На поверхности нашей планеты с большим количеством водоемов живые существа с плотностью, большей плотности воды, не могли бы плавать и погибли бы, попав в любую подходящих размеров впадину с водой. У таких существ должна быть больше доля массы костного вещества в общей массе тела. Последнее означает уменьшение удельной силы и подвижности этих существ, что, конечно, уменьшило бы их шансы на выживание в трудных природных условиях.

Действительно, удельная сила равна $\frac{F}{m}$. Сила F тем больше, чем больше (толще) мышцы. Размеры мышц пропорциональны площади их сечения. Тогда $F \sim L^2$. Масса m равна произведению плотности тела на его объем: $m = \rho V$. А объем V пропорционален L^3 . Тогда $\frac{F}{m} \sim \frac{L^2}{L^3} \sim \frac{1}{L}$. (Подробнее об удельной силе см. в § 9.)

Задача 1.11. Оцените значение средней плотности Земли. Примите массу Земли и ее радиус соответственно равными $6 \cdot 10^{24}$ кг и $6,4 \cdot 10^3$ км. Считайте Землю шаром с равномерно распределенной плотностью.

Задача 1.12. Оцените среднюю плотность вещества во Вселенной по данным, приведенным на диаграммах (см. рис. 1.1, 1.3).

Почему значение средней плотности вещества во Вселенной представляет интерес?

Из общей теории относительности А.Эйнштейна следует, что, если это значение больше некоторого, так называемого критического значения, наша Вселенная пульсирует во вре-

Массы, встречающиеся в природе

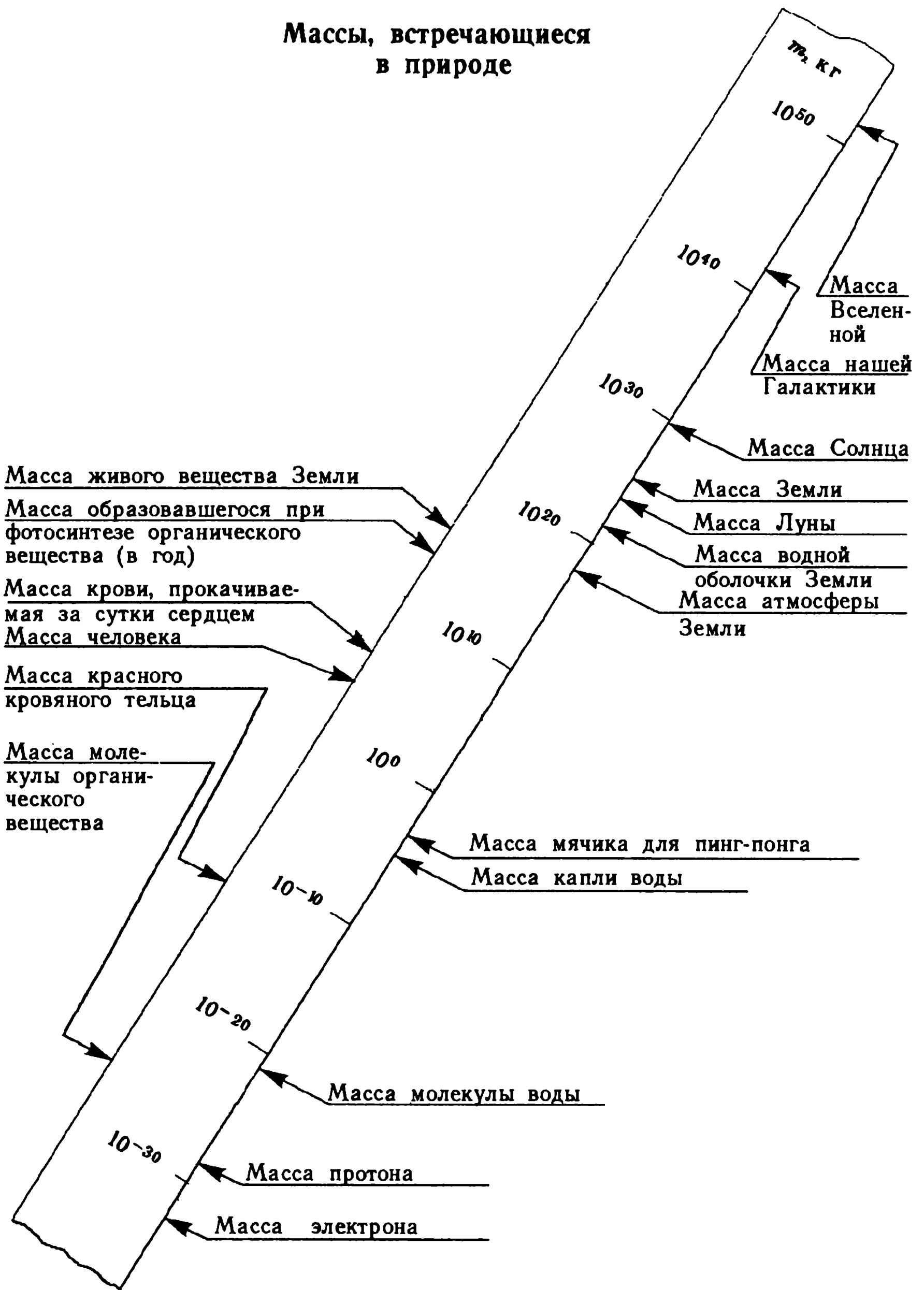


Рис. 1.3

Плотность вещества во Вселенной

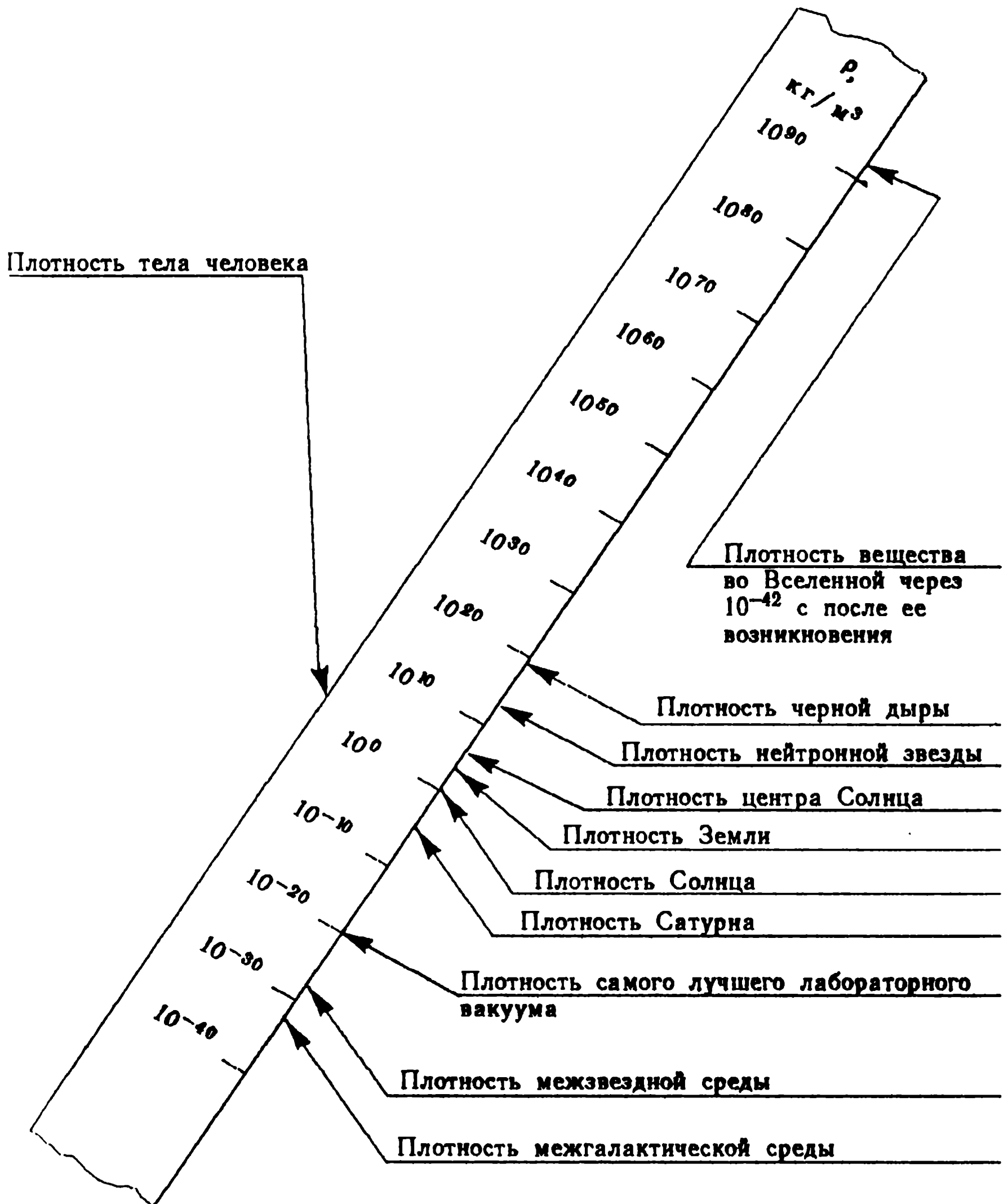


Рис. 1.4

мени, то расширяясь, то сжимаясь. Если же средняя плотность вещества меньше критического значения, то Вселенная должна расширяться бесконечно. Теоретически рассчитанная плотность составляет 10^{-26} кг/м³. Средняя плотность, определяемая экспериментально и связанная с массой видимых объектов, меньше критической. Но, если учесть вклад в значение средней плотности «невидимых» ингредиентов Вселенной — горячего межгалактического газа, черных дыр, нейтрино, гравитационных волн и т.п., может быть, и будет достигнуто значение плотности вещества во Вселенной, превосходящее критическое [20, 53].

Задача 1.13. Вычислите плотность ядерного вещества (вещества, из которого состоят ядра атомов). Чему равно отношение плотности нуклона (ядра атома водорода) к плотности Вселенной?

Задача 1.14. Оцените число нуклонов во Вселенной.

Результат этой задачи $N = 10^{80}$ был использован П. Дираком при выводе знаменитого закона больших чисел (см. § 10).

С плотностью вещества ρ связана концентрация частиц $n = \frac{N}{V}$ (число частиц в единице объема).

Задача 1.15. Какова средняя концентрация вещества во Вселенной?

Число 10^{80} — количество частиц, составляющих наш мир, — впечатляет. Сложность живых организмов также определяется многочисленностью составляющих их частиц. Скажем, человек состоит из 10^{14} живых клеток, каждая из которых, в свою очередь, состоит из 10^{12} — 10^{14} атомов.

Задача 1.16. Оцените число молекул, составляющих тело человека.

Задача 1.17. Оцените число протонов в теле человека.

Рассмотрение перечисленных выше диаграмм приводит к выводу, что значения физических величин, характеризующих человека, лежат примерно посередине между областями, относящимися к мега- (Вселенная) и микро- (ядро) мирам. Последнее обстоятельство подтверждает мысль о том, что человек сумел продвинуться в познании природы почти на одинаковое число порядков как «вглубь», так и «вширь». Особое положение параметров, характеризующих человека, укрепляет догадку о том, что в качестве количественной меры познающей природу человек выбрал себя.

Кроме того, человек в мире, характеризующемся таким разбросом параметров (до 80 порядков), играет роль объединяющего фактора. Именно человек сумел ощутить, осознать это устройство мира, построить его мысленную модель, а затем придумал способы проверить свои догадки. Может быть, это обстоятельство самое замечательное в рассматриваемом материале.

В заключение могут быть рассмотрены задачи-оценки, позволяющие получить результаты, интересные и полезные с точки зрения гуманитаризации физики.

Задача 1.18. Оцените объем тела человека.

Задача 1.19. Оцените, сколько атомов содержит Земля. Примите, что каждый атом имеет диаметр $2 \cdot 10^{-10}$ м и что при упаковке шаров теряется пренебрежимо малый объем.

Задача 1.20. Масса туманности Андромеды составляет примерно $8 \cdot 10^{41}$ кг. Оцените количество звезд в ней, используя тот факт, что Солнце представляет собой типичную звезду.

§ 2. Материальная точка. Система отсчета

Материальная точка Особое внимание на этом этапе изучения курса следует уделить процедуре введения понятия материальной точки — первого идеального объекта, что обусловлено особой ролью, которую играет идеализация в процессе познания природы человеком, становления физического знания.

Говоря об идеализации (создании идеального образа), следует отметить, что наличие такой процедуры — характерная особенность познания человеком окружающего мира. Конструирование мысленных образов непосредственно связано с отражением в сознании человека многообразия предметов и связей реального мира, обусловленного неисчерпаемостью свойств материи. Охватить все эти связи и объекты невозможно не только в практическом, но и в теоретическом, принципиальном смысле. Поэтому в науке, и в частности в физике, принимают во внимание только существенные для данного круга явлений свойства и связи (осуществляют абстрагирование).

Встречаясь в повседневной жизни и практической деятельности с различными физическими объектами, явлениями, ситуациями и связями между ними, человек в своем сознании создает мысленный образ (мысленную конструкцию или теоретическую схему), воспроизводящий исследуемый объект

в идеальной форме, учитывающей лишь существенные факторы.

Таким образом, отражение окружающей действительности в мозгу человека осуществляется путем создания некоей системы моделей. Задача физики как науки состоит в выработке наиболее адекватно отражающей окружающей мир модели — физической картины мира, являющейся частью более общей научной картины мира. Учащиеся могут получить представление о ней в процессе изучения физики, который, в свою очередь, является моделью процесса физического познания.

В механике используются следующие модельные представления: материальная точка, абсолютно твердое тело, тело сферически симметричной формы.

Поскольку физические модели приближенные, их справедливость может быть гарантирована лишь в пределах применимости употребляемых абстракций. Вне этих пределов модель может стать неприемлемой и даже бессмысленной.

Задача 2.1. В каких из перечисленных ниже случаях материальные тела можно заменить материальными точками: а) бегун на стометровой дистанции; б) бегун на дистанции с препятствиями в момент взятия барьера; в) спортсмен при прыжках с вышки в воду; г) хоккеист-защитник при выполнении силового приема; д) летчик в самолете, выполняющем «мертвую петлю»?

Задача 2.2. В каких случаях человека удобно рассматривать как материальную точку, а в каких — нет? Приведите свои примеры.

Система отсчета В качестве примеров, позволяющих показать варианты выбора систем отсчета, можно предложить следующие рисунки: пространство внутри помещения (рис. 1.5); пространство города (рис. 1.6); поверхность Земли (рис. 1.7); Солнечная система (рис. 1.8); наша Галактика (рис. 1.9., слева — фронтальный вид, справа — вид с ребра); наша Галактика и ее спутники (рис. 1.10); местная группа галактик (рис. 1.11); структура видимой части Вселенной (рис. 1.12).

Кроме упомянутой цели, показ рисунков в указанной последовательности имеет еще смысл конкретизации в сознании учащихся местоположения человека в окружающем мире. Возрастающий масштаб изображений: человек относительно окружающих его предметов; планета, на поверхности которой живет человек; звезда, около которой вращается планета; положение Солнца в Галактике, а Галактики во Вселенной — будет, по нашим предположениям, способствовать выработке у учащихся «планетарного» стиля

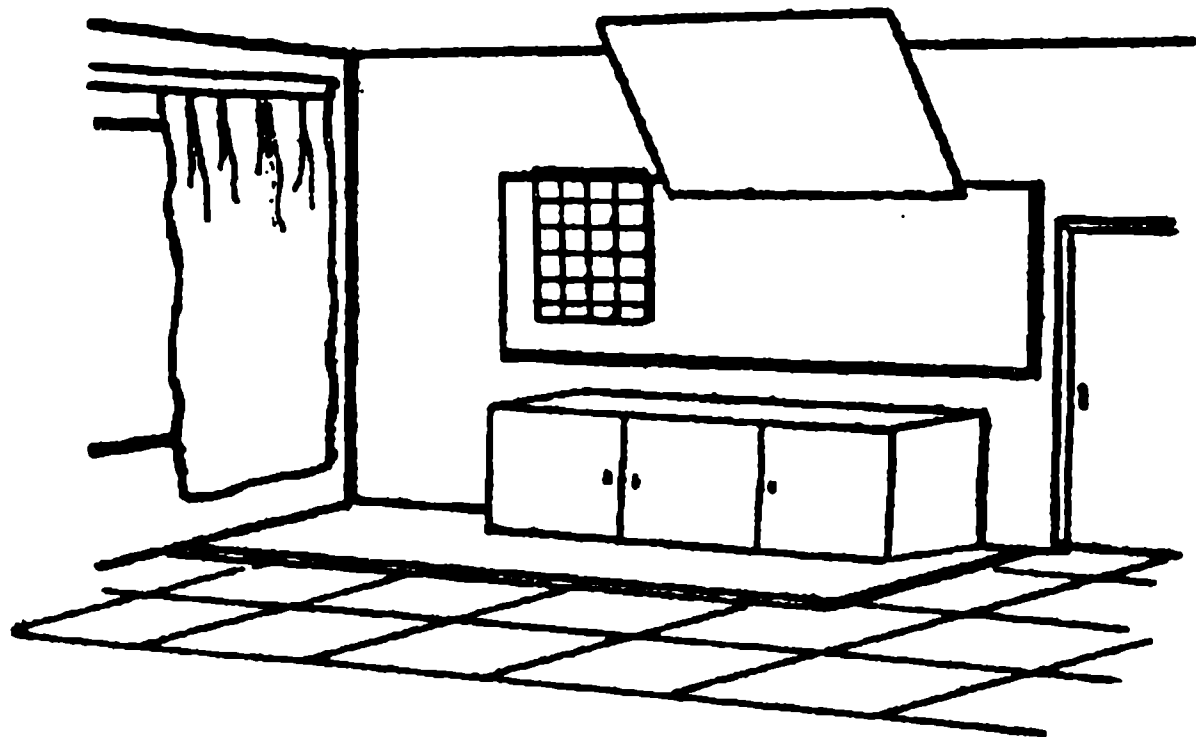


Рис. 1.5

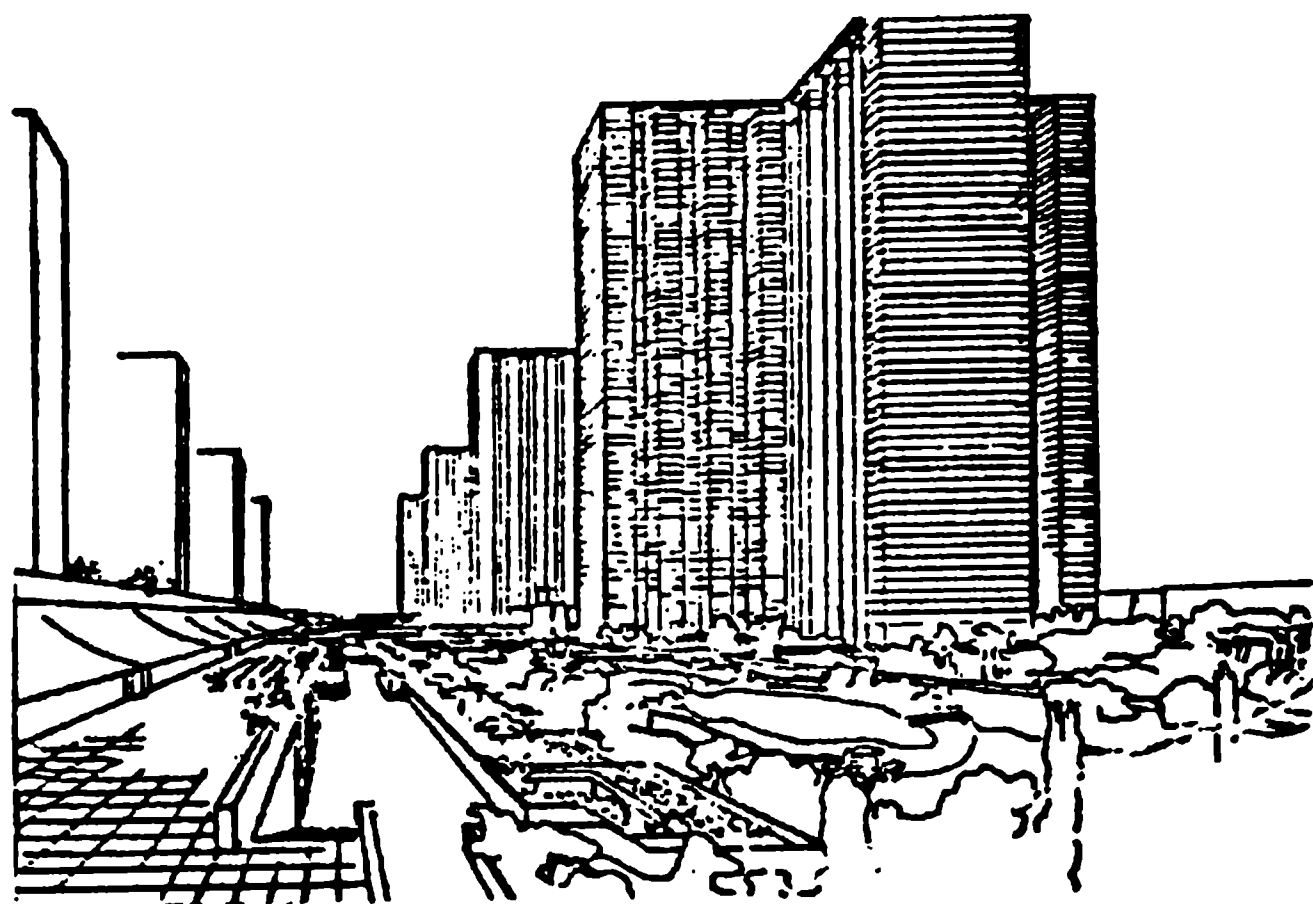


Рис. 1.6

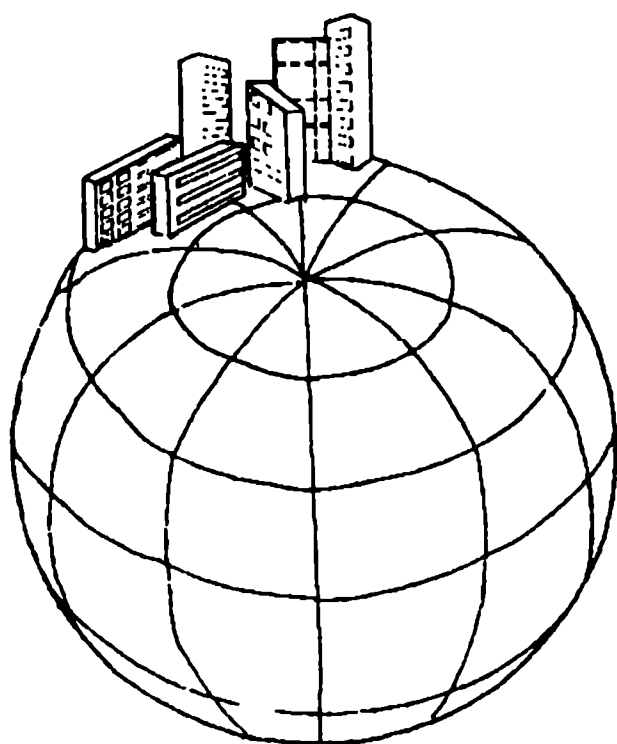


Рис. 1.7

мышления, способности ощутить себя частицей огромного целого — мира, в котором мы живем. Достижению той же цели посвящена следующая задача.

Задача 2.3. Что должны сообщить земляне о своем местоположении в пространстве, чтобы представители внеземной цивилизации, получившие посланный землянами сигнал, поняли, откуда он пришел? Предложите свой способ передачи такого сигнала.

Человечество уже делало попытки посылать сигналы, свидетельствующие о существовании разумной жизни на нашей планете, в виде радиосигналов и в записи на пластинку и фотопленку. Первый вариант сообщения был послан из обсерватории Аресибо 16 ноября 1974 года в сторону шарового скопления М13 в созвездии Геркулеса. В 1977 году Солнечную систему покинули космические корабли «Пионер-10» и «Пионер-11», на борту которых находятся пластинки с символическим посланием всем разумным существам, которых могут встретить эти аппараты на своем пути. В послании, в частности, объясняется, когда, где и кем были запущены эти космические корабли.

Покинувший в 1989 году Солнечную систему корабль «Вояджер» унес на своем борту запись (а также катушку

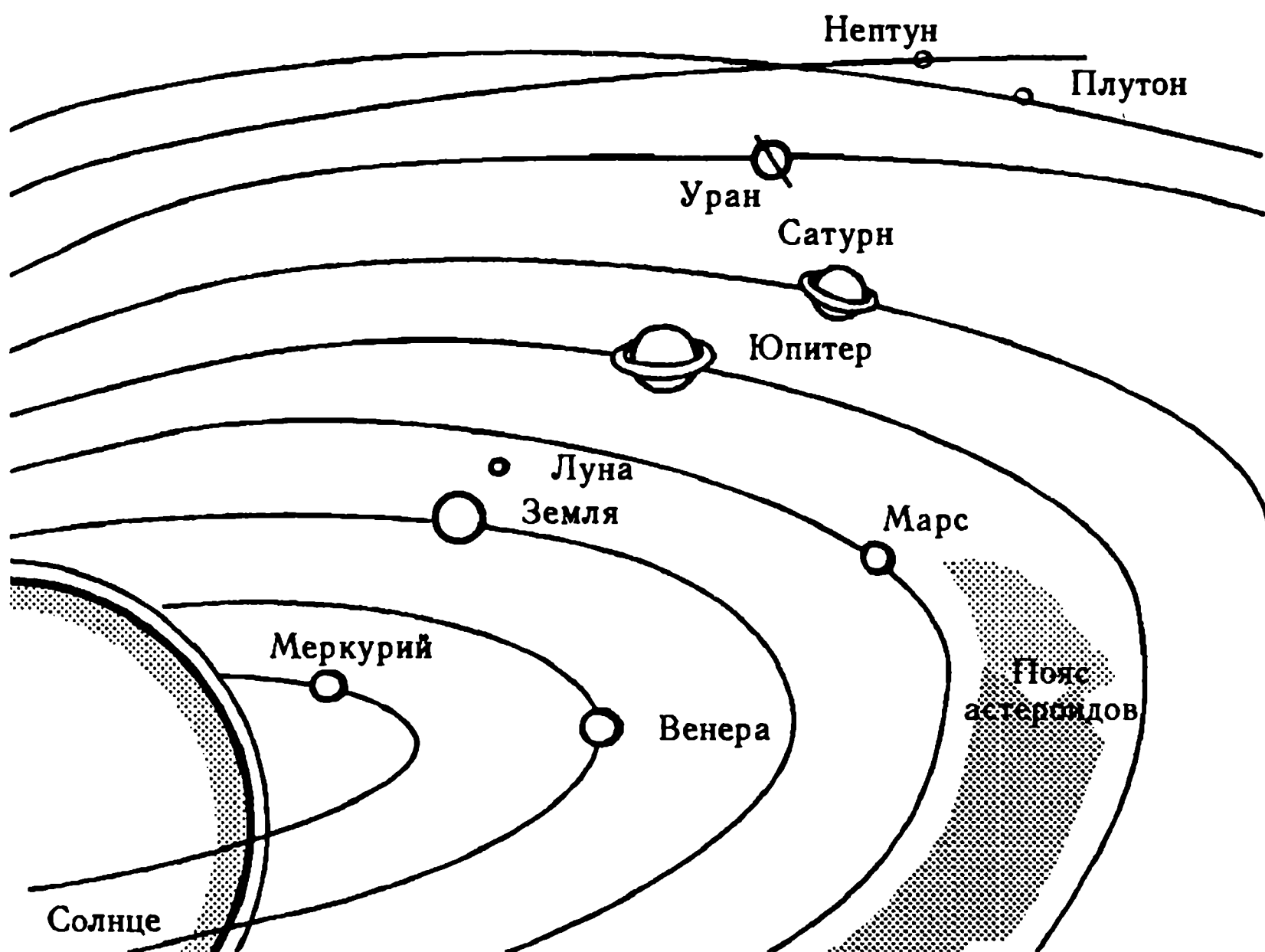


Рис. 1.8

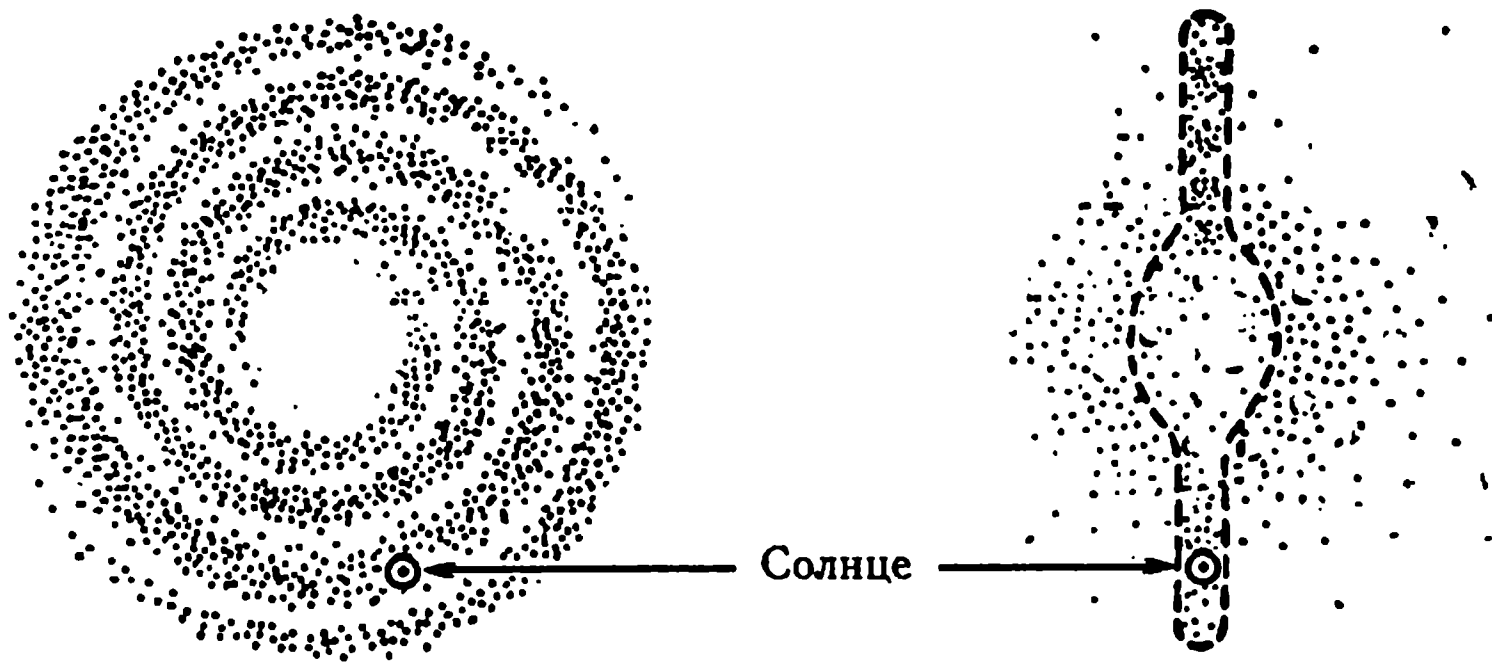


Рис. 1.9



Рис. 1.10

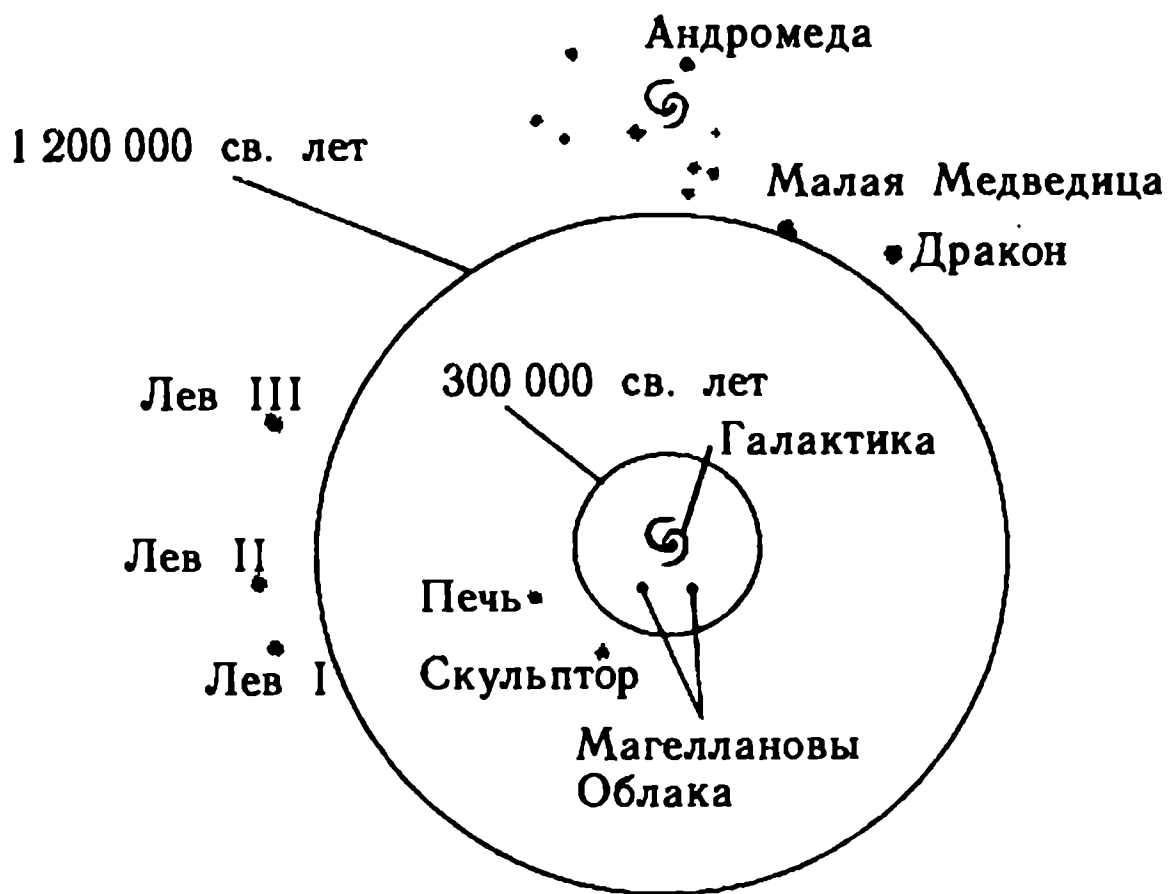


Рис. 1.11

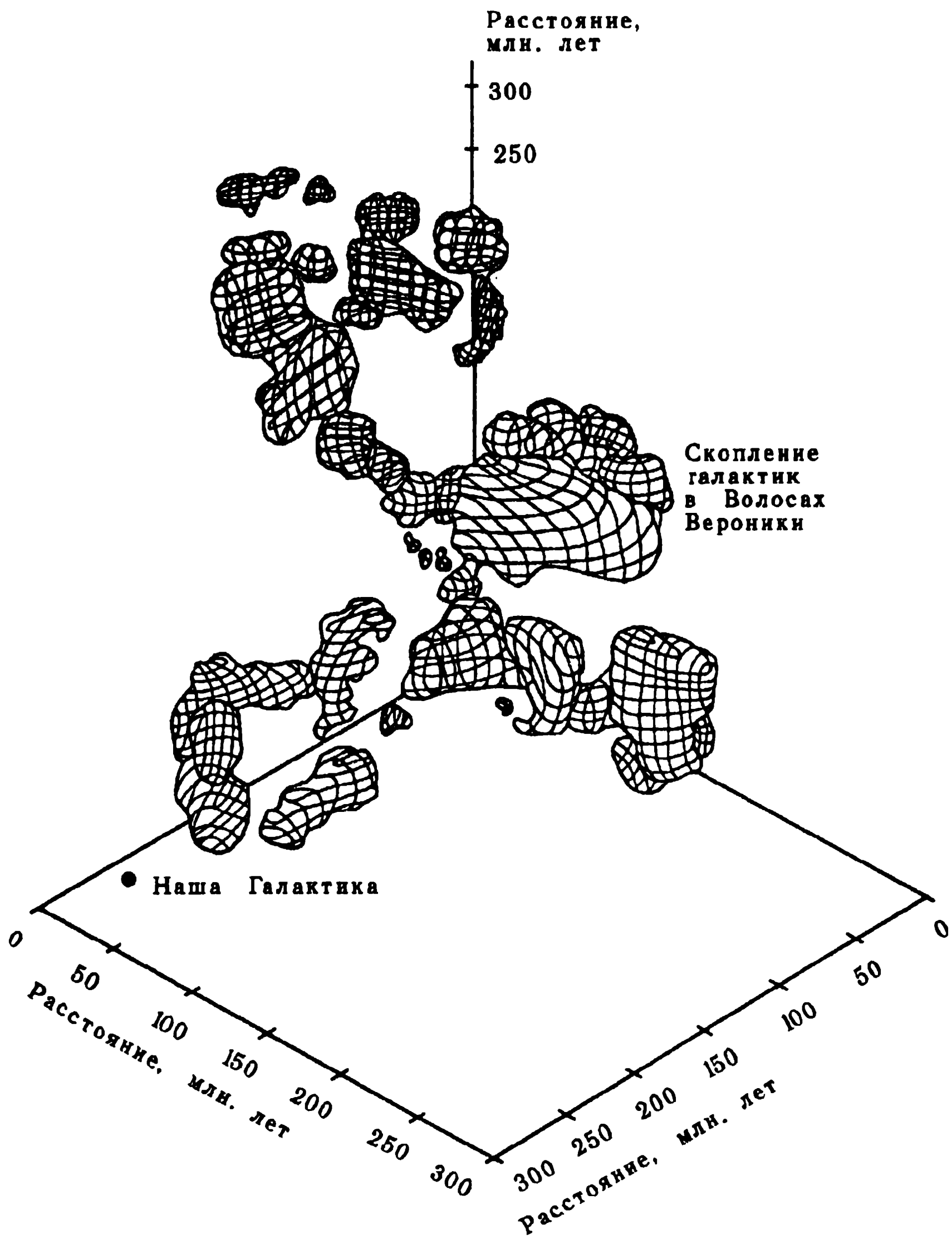


Рис. 1.12

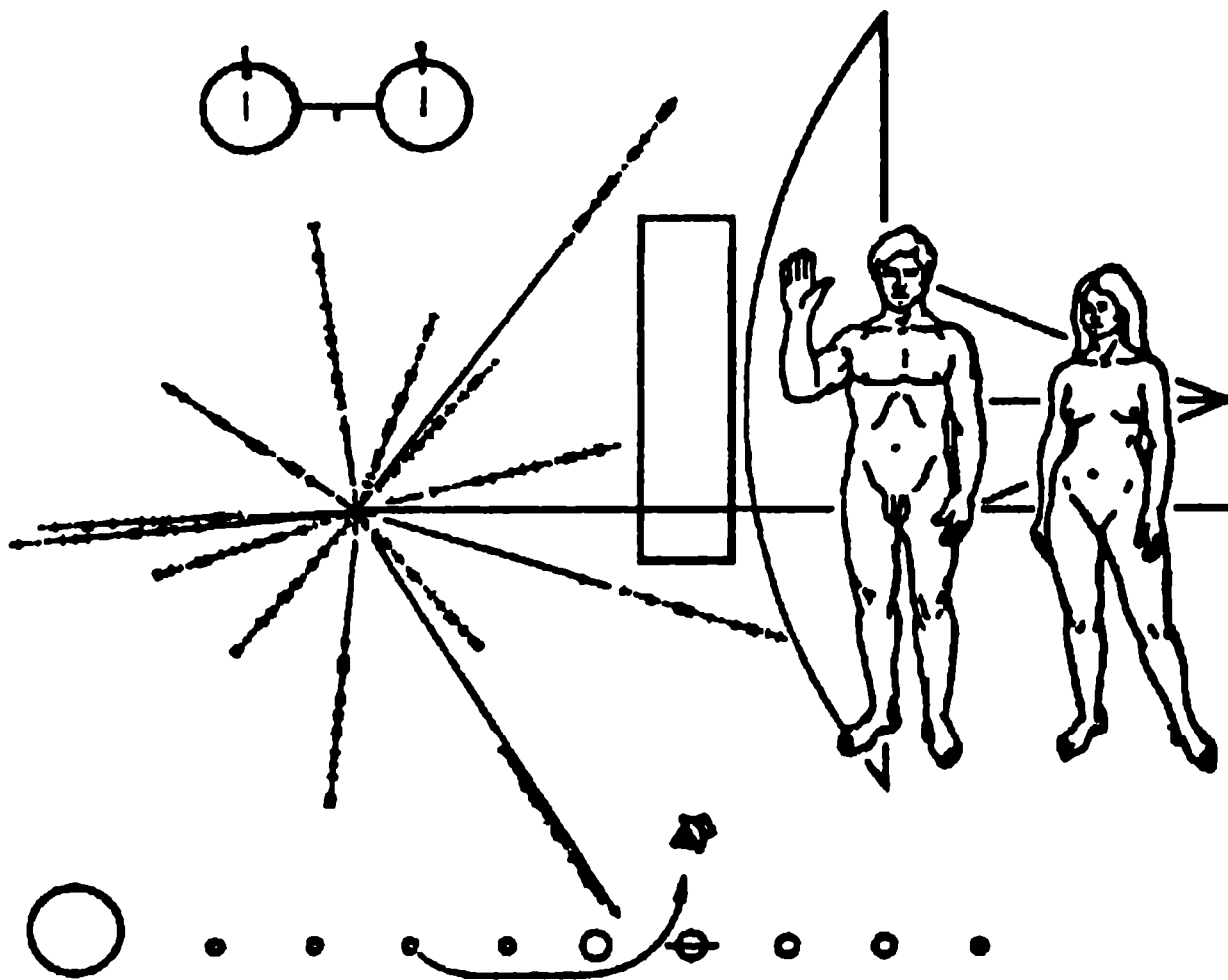


Рис. 1.13

с фотопленкой) с электронно-закодированной информацией о землянах. Гипотетические космические цивилизации смогут услышать запись пения птиц, музыку и приветствия на шестидесяти языках народов Земли [19, 233].

Задача 2.4. В какой форме и какая информация о местоположении человечества в космосе содержится на пластинках, установленных на борту космических аппаратов «Пионер-10» и «Пионер-11» (рис. 1.13)?

Желательно обратить внимание учащихся на тот факт, что в подборе и кодировке информации о местоположении человечества в пространстве отчетливо проявляется антропоцентрический характер представлений людей. Действительно, ведь посланные сигналы рассчитаны на существ с логикой, подобной человеческой, и такой же, как у людей, системой ценностей.

§ 3. Перемещение. Скорость при прямолинейном равномерном движении. Сложение скоростей

Перемещение Понятие перемещения как вектора, связывающего начальное и конечное положения движущегося тела, можно проиллюстрировать следующими задачами.

Задача 3.1. Человек пробегает по беговой дорожке стадиона восемь полных кругов, длина дорожки 400 м. Вычислите: а) длину дистанции,

которую преодолел бегун; б) перемещение бегуна при этом; в) перемещение бегуна за полкруга до конца дистанции.

Задача 3.2. Чему равно перемещение Земли за год? полгода? сутки? Принять радиус орбиты Земли равным $1,5 \cdot 10^{11}$ м.

Задача 3.3. Велосипедист от дома по прямой дороге проехал сначала 4 км на восток, а затем — 3 км на север. Изобразите на рисунке траекторию его движения и вектор перемещения. Определите путь, пройденный велосипедистом, и модуль вектора перемещения.

С интересом выполняют учащиеся практическое задание следующего содержания.

Задача 3.4. Начертите в тетради в виде схемы маршрут, которым вы добираетесь от дома до школы. Покажите на чертеже свой путь и перемещение. Определите (при помощи шагомера, секундомера, компаса и других подручных средств) длину своего пути и время, необходимое для его преодоления. Вычислите свою среднюю скорость на этом пути.

Гуманитаризации преподавания курса физики может послужить лабораторная работа «Определение скорости движения игрушечного автомобиля». Организовать эту работу следует так, чтобы в качестве измерительного прибора для определения s и t учащиеся использовали частоту ударов собственного пульса и длину своей пяди. Учащиеся IX класса обычно проделывают эту работу с большим интересом, приобретая при этом полезные в некоторых ситуациях знания.

Задача 3.5 «Похищенного ракетирями» ребенка везут в автомобиле. Ребенок сквозь щель в кузове замечает, что расстояние между двумя соседними километровыми столбиками соответствует 40 ударам его пульса. С какой скоростью едет автомобиль?

Скорость Скорость — одна из важнейших физических величин, характеризующих быстроту перемещения тела с течением времени.

Диапазон скоростей, известных человеку, очень велик. Об этом свидетельствует диаграмма, приведенная на рисунке 1.14. За единицу скорости взят 1 м/с. Наименьшая из скоростей, показанных на шкале, 10^{-11} м/с — скорость геологических изменений на поверхности Земли. Наибольшая из известных человеку скоростей $3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. Движение материальных тел и сигналов со скоростями, большими скорости света, запрещено теорией относительности Эйнштейна.

Рассмотрим более подробно интервал шкалы скоростей, характеризующих процессы, протекающие в человеческом организме. Нижний его предел 10^{-8} м/с соответствует ско-

**Средние скорости движения,
встречающиеся в природе и технике**

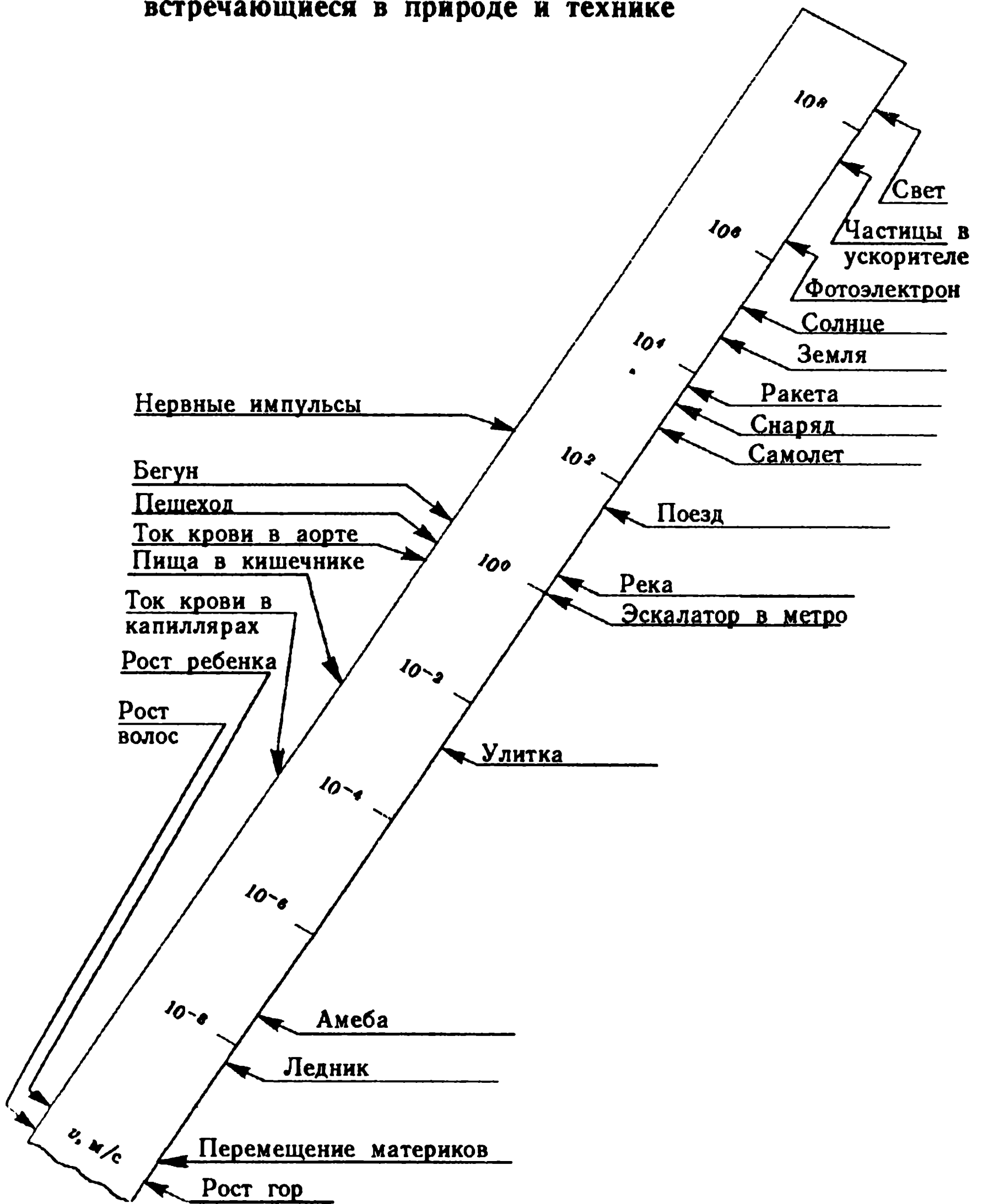


Рис. 1.14

рости роста ногтей и волос. Скорости движения крови в капилляре и пищи в кишечнике (10^{-4} м/с и 10^{-2} м/с соответственно) располагаются примерно посередине этого интервала.

Рассматриваемая тема обладает богатыми возможностями для ознакомления учащихся с антропоцентрическими идеями. Считаем полезным, в частности, на одном из занятий по теме приступить к составлению совместно с учениками таблицы «Возможности человека». В таблицу следует ввести данные о наибольших скоростях и ускорениях, развиваемых человеком при беге, ходьбе, плавании и т.д., о наибольших глубинах погружения в океан со снаряжением и без него, о высотах различных прыжков, о результатах в метании, стрельбе и т.п. Данные для составления таблицы можно взять из учебников, справочников, энциклопедий, сообщений средств массовой информации.

Целью составления таблицы является, во-первых, ознакомление учащихся с информацией гуманистического плана и, во-вторых, сбор данных для составления и решения физических задач как расчетного, так и качественного, оценочного характера. Работа по составлению такой таблицы должна, по нашему мнению, способствовать выработке в сознании учащихся идей о ценности человеческого существования, совершенстве человеческого организма, его сложности, красоте, функциональной целесообразности. Для развития навыков «безопасного» поведения учащимся полезно знать аналогичную информацию и о себе, чему должна способствовать работа над графой таблицы «Мой результат».

Рекомендуемая форма таблицы с примером, относящимся к бегу на 100 м, приведена ниже.

Таблица 1.1

Возможности человека

Вид деятельности	Наилучший количественный показатель	Мой результат
Бег, 100 м	$v = 10,16$ м/с	$v = 7,2$ м/с

Задача 3.6. Вычислите свою скорость при беге на любую известную вам дистанцию. Сравните получившееся значение с результатом на этой дистанции лучшего бегуна в классе, школе, городе, стране, мире.

К сожалению, больших скоростей человек может достигнуть только при помощи технических средств передвижения. Например, велосипедист может перемещаться со скоростью 14 м/с, мотоциклист — 140 м/с, автомобилист — 120 м/с. Еще большей скоростью, называемой первой космической и примерно равной $8 \cdot 10^3$ м/с, обладает космонавт, движущийся вместе с космическим кораблем по орбите вокруг Земли. Для полетов к другим планетам космический корабль с человеком на борту должен иметь вторую космическую скорость, равную $1,1 \cdot 10^4$ м/с.

Понятие скорости при равномерном прямолинейном движении можно проиллюстрировать следующими задачами.

Задача 3.7. Чему равно расстояние от Солнца до Земли, если известно, что свет от Солнца идет к нам 8 мин 18 с?

Задача 3.8. Сколько времени (в годах) идет к нам свет от ближайшей к Солнцу звезды α Центавра, если расстояние между этими звездами равно $3,9 \cdot 10^{16}$ м?

Задача 3.9. Какой путь проходит свет за год?

Задача 3.10. Зная скорость движения космических аппаратов ($1,1 \cdot 10^4$ м/с) и тот факт, что корабль «Вояджер» достиг орбиты Урана через 12 лет после запуска, оцените размеры Солнечной системы.

Задача 3.11. Оцените максимальную скорость ходьбы человека, имеющего рост 1,8 м, учитывая, что при ходьбе в любой момент времени хотя бы одна нога у него обязательно соприкасается с землей.

Задача 3.12. Сравните время, необходимое человеку, чтобы обойти вокруг света (земной шар по экватору); время, затраченное Магелланом на совершение первого в человеческой истории кругосветного путешествия (824 сут), и продолжительность полета первого космонавта Земли Ю.А. Гагарина, совершившего первое космическое кругосветное путешествие (1,5 ч).

Чему равна средняя скорость движения экспедиции Магеллана и во сколько раз она больше (меньше) скоростей двух других движений, обсуждаемых в задаче?

Задача 3.13. Придумайте способ экспериментального определения скорости любого равномерно движущегося объекта (течение реки, автомобиль и т.п.).

Задача 3.14. Придумайте способ, как измерить скорость движения эскалатора метрополитена. Проведите необходимые измерения и расчеты. Подготовьте сообщение о своем эксперименте. Где еще может быть использована ваша идея?

А как определить скорость равномерно движущегося объекта без применения измерительных инструментов?

Идея проведения такого эксперимента легла в основу лабораторной работы «Определение скорости равномерно

движущегося объекта без использования измерительных инструментов» (см. Приложение).

Ощущает ли человек на себе действие скорости?

Еще К.Э.Циолковский пришел к выводу что сама по себе скорость, как бы велика она ни была, при равномерном движении не должна вызывать какого-либо неблагоприятного влияния на организм, тем более, что сам человек не способен оценить скорость аппарата, который перемещает его в пространстве, если это движение равномерное прямолинейное. (И действительно, опыт показывает, что все физические процессы, протекающие внутри организма человека, точно так же, как все физические процессы, протекающие вне его, но внутри движущегося аппарата, будут протекать так, как если бы аппарат покоился.) По этому поводу К.Э.Циолковский писал: «Мы тысячи лет неслись по пространству в бесконечном экипаже со скоростью 27 верст в секунду, а может быть, и больше, без толчков и шума, но до Галилея и Коперника не замечали движения, потому что у нас не болела спина» [27, 61]. Понятно, что под движением со скоростью 27 верст в секунду К.Э.Циолковский имел в виду скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца, равную $3 \cdot 10^4$ м/с. Еще большую скорость ($2,5 \cdot 10^5$ м/с) имеет Солнце, движущееся вокруг центра нашей Галактики.

Относительность движения Пример, внимание к которому привлек К.Э.Циолковский, позволяет легко перейти к проблеме относительности в кинематике.

Для иллюстрации относительности движения и покоя, а также преобразований Галилея и закона сложения скоростей можно предложить следующие задачи.

Задача 3.15. Пилот самолета ВВС во время тренировочного полета обнаружил движущийся параллельно его курсу НЛО. По бортовым приборам самолета скорость НЛО оказалась равной 2700 км/ч. Чему равна скорость НЛО относительно неподвижного наблюдателя на Земле? Скорость самолета можно принять равной 2000 км/ч.

Задача 3.16. Путешественник, прогуливаясь со скоростью 4,6 км/ч по палубе корабля, скорость которого относительно берега равна 9,6 км/ч, пересекает палубу поперек. Чему равна скорость путешественника относительно берега?

Задача 3.17. Велосипедист движется со скоростью 20 км/ч на север. При этом дует восточный ветер со скоростью 10 м/с. Чему равна кажущаяся велосипедисту скорость ветра?

Задача 3.18. Яхтсмен направляет судно на север со скоростью 12 м/с. С юго-запада начинает дуть ветер со скоростью 9 м/с. Вычислите: а) ско-

рость (модуль и направление) яхты; б) расстояние, на которое она отклонится от курса через 15 мин.

Задача 3.19. В стоячей воде пловец может развивать скорость 1,65 м/с. Если он переплывает поперек реку шириной 180 м, скорость течения которой 0,85 м/с, то на каком расстоянии вниз по течению (от точки, противоположной точке старта) он окажется? Сколько времени у него уйдет на то, чтобы достичь противоположного берега?

Задача 3.20. В разгар погони сыщик должен пересечь реку шириной 2,0 км за минимальное время. Скорость течения реки равна 2,5 км/ч. Сыщик может грести на лодке со скоростью 4,0 км/ч, а бежать он может со скоростью 7,0 км/ч. Опишите путь, который ему лучше избрать (гребля плюс бег вдоль берега), чтобы время переправы через реку было минимальным, и вычислите это минимальное время.

Задача 3.21. Легковой автомобиль движется со скоростью 20 м/с за грузовым, скорость которого 16,5 м/с, а навстречу им движется автобус со скоростью 25 м/с. При каком наименьшем расстоянии от автобуса водитель легкового автомобиля может обогнать грузовой, если в начале обгона машина находится в 15 м от грузовой, а к концу обгона должна быть впереди нее на 20 м?

§ 4. О системах единиц

Естественная наука превращается в точное исследование природы благодаря измерению. Процесс измерения состоит в сравнении изучаемой величины с однородной ей, принятой за единицу. Системой единиц называется совокупность единиц физических величин, связанных определенными соотношениями. Известно много систем единиц, различающихся основополагающими идеями.

История создания мер, в частности меры длины, является одним из наиболее доступных учащимся примеров проявления антропоцентричности процесса познания природы человеком.

Действительно, протяженность, длина — первое, что научился измерять человек. Поскольку измерение состоит в сравнении исследуемого объекта с эталоном, легко представить, что человеку проще всего было сравнивать протяженности с тем, что всегда было «под рукой»: с размерами частей собственного тела.

Так возникли старинные меры длины — локоть пядь, фут и др. Часто в качестве эталона длины применяли размер «замечательного» человека. Например, английский ярд был определен как расстояние от конца носа английского короля до большого пальца его вытянутой руки. В других случаях, после того как было обнаружено, что размеры для разных людей различны, пытались их «усреднить» по большому

числу измерений. Так, английским футом назвали одну шестнадцатую длины цепочки, составленной из 16 случайно выбранных людей, вставших в затылок друг к другу так, чтобы пятки предыдущего касались концов пальцев ноги стоящего за ним.

С развитием международной торговли возникла потребность в объективных, независимых единицах измерений, связанных с такими объектами, которые не могли бы с течением времени изменяться или быть потерянными. В конце XVIII века во время Великой французской революции группа французских ученых предложила метрическую систему мер «на все времена и для всех народов». Она строилась на двух основных единицах: килограмме и метре с производными десятичными подразделениями. В качестве физического объекта, положенного в основу определения единицы длины, был выбран земной меридиан, а единицей длины — метром была названа одна сорокामиллионная часть меридиональной окружности. Благодаря простоте и удобству применения метрическая система мер была принята многими странами мира, в том числе и Россией.

Сейчас метр, определяемый как расстояние, проходимое в вакууме электромагнитной волной за $\frac{1}{299\,792\,458}$ долю секунды, наряду с другими шестью единицами (секундой, ампером, канделой, килограммом, кельвином и молем) является основной единицей Международной системы единиц (СИ).

В результате многолетнего обсуждения научная и техническая общественность всех стран мира пришла к заключению, что СИ — наиболее практически целесообразная система единиц.

Следует отметить, что, создавая метрическую систему мер, ставшую прообразом СИ, человек не смог преодолеть антропоцентрических воззрений, в результате чего метр оказался сопоставим с размером тела человека, а единица времени — секунда — с интервалом времени между двумя последовательными ударами пульса человека.

Для решения по данной теме можно предложить следующие задачи.

Задача 4.1. Какую часть современной единицы длины 1 м составляют такие старинные меры длины, как: а) пядь (мера длины, равная расстоянию между концами пальцев одной руки — большого и указательного, среднее значение которой составляет 20,5 см); б) локоть (мера длины, равная длине локтевой кости, среднее значение которой составляет 42 см); в) сажень

(мера длины, равная размаху рук от концов пальцев одной руки до концов пальцев другой; считалась равной примерно 176 см)?

Задача 4.2. Как соотносятся между собой единица длины 1 м и старинная английская мера длины 1 фут, равная в среднем 30,48 см?

Проделайте в классе опыт по определению старинной английской меры длины — фута. Чему равен ваш рост в футах?

Задача 4.3. Перечислите все известные вам старинные единицы длины.

Какими соображениями руководствуются люди, вводя новые единицы физических величин?

Задача 4.4. Какова, на ваш взгляд, вероятность того, что гуманоиды — жители вновь открытой планеты будут пользоваться теми же единицами физических величин, что и люди?

§ 5. Средняя и мгновенная скорости. Ускорение

Средняя и
мгновенная
скорости

Для закрепления понятий средней путевой, средней по перемещению и мгновенной скорости, для лучшего уяснения разницы между ними, а также с целью иллюстрации того факта, что человек может быть объектом изучения кинематики, рекомендуем рассмотреть с учащимися следующие задачи.

Задача 5.1. Мировой рекордсмен в беге на 10 000 м преодолел свою дистанцию за 27,23 с. Мировой рекордсмен в беге на 100 м преодолел свою дистанцию за 9,8 с. Каковы средние скорости этих бегунов?

Задача 5.2. Какие скорости, мгновенные или средние, имеют в виду, когда говорят: а) о скорости бегуна (см. задачу 5.1); б) о скорости спринтера в момент пересечения им финишной ленточки; в) о скоростях, приведенных в таблице рекордов; г) о скорости, указанной на знаке, ограничивающем движение автотранспорта?

Задача 5.3. Человек две трети пути прошел со скоростью 5 км/ч, а оставшуюся часть пути — со скоростью 4 км/ч. Определите среднюю скорость пешехода на всем пути.

Задача 5.4. Про движение рекордсмена-марафонца на дистанции известно следующее. Путь 42 км 195 м он преодолел за время 2 ч 21 мин 5 с. При этом расстояние 2813 м он пробежал со скоростью 4 м/с, на следующей трети пути его скорость была 4,5 м/с. Какой была его скорость на оставшейся части дистанции?

Задача 5.5. Рекордсмен мира по конькам преодолел дистанцию 10 000 м за 13 мин 48,2 с. Чему равна: а) средняя путевая скорость конькобежца

($v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}$; l — длина дистанции); б) средняя скорость конькобежца ($\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{t}$; \vec{s} — перемещение), если для преодоления дистанции ему пришлось пробежать 25 полных кругов по стадиону?

Задача 5.6. Половину времени пловец двигался по дистанции с постоянной скоростью 2,01 м/с. С какой постоянной скоростью должен он плыть оставшееся время, чтобы повторить рекорд, составляющий для данной дистанции скорость 2,05 м/с?

Интересно обсудить с учащимися вопрос о том, насколько быстро может бежать человек.

Задача 5.7. Познакомьтесь с таблицей 30 «Мировые спортивные рекорды» в книге А.С.Еноховича «Справочник по физике и технике» [16, 41]. Рассчитайте среднюю скорость спортсменов на приведенных дистанциях. Проследите, как она меняется при увеличении длины дистанции. Постройте график зависимости средней скорости бега от длины дистанции.

Примерный ход графика показан на рисунке 1.15. Из него видно, что скорость бега при установлении мировых рекордов равномерно уменьшается с увеличением дистанции, увеличиваясь, правда, на дистанциях до 200 м.

Разобраться в ходе этой кривой можно, исследовав мгновенную скорость бегуна в процессе забега. Типичное ее поведение показано на рисунке 1.16. Бегун начинает движение из состояния покоя и разгоняется, пока не достигнет максимальной скорости. Для бегуна-мужчины время ускорения составляет приблизительно 2 с или меньше, а его максимальная скорость достигает значения около 10,5 м/с. Средняя скорость на дистанции, однако, оказывается меньше 10,5 м/с, так как средняя скорость за период ускорения составляет половину максимальной. Поэтому средняя ско-

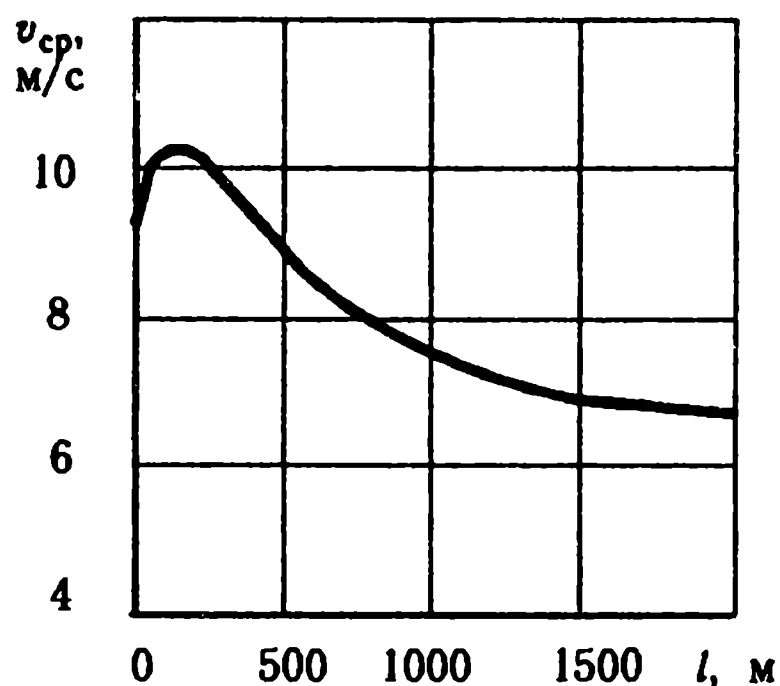


Рис. 1.15

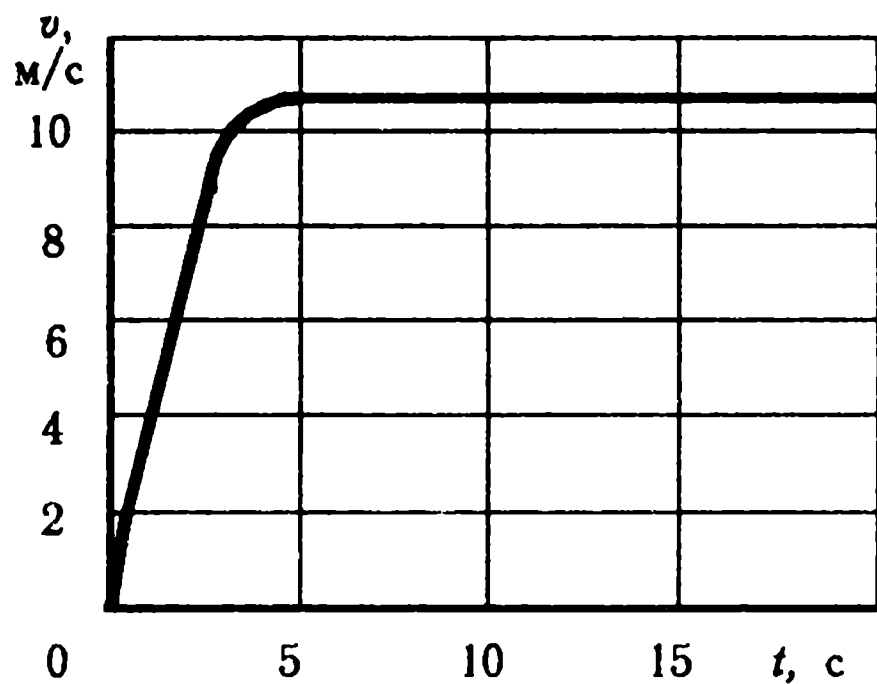


Рис. 1.16

рость. при забеге на 200 м больше, чем при забеге на 100 м, так как бегун на большую дистанцию большую часть общего времени забега пробегает на максимальной скорости. Если бы бегун мог поддерживать свою максимальную скорость бесконечно, то средняя скорость продолжала бы расти с увеличением дистанции. Однако известно, что бегуну это не под силу и средняя скорость начинает падать при забегах на дистанции большие чем 200 м. Точную длину дистанции, на которой скорость начинает падать, определить невозможно, поскольку на дистанции между 200 м и 400 м официальный рекорд не регистрируется. По-видимому, она равна примерно 300 м. Причины, по которым человеку не удастся долго поддерживать неизменной максимальной скорость движения при беге, будут рассмотрены в § 20.

Можно предположить, что одна из причин состоит в том, что бегун начинает испытывать недостаток кислорода. 300 м — это, очевидно, та дистанция, преодолевая которую человек успевает израсходовать весь свой запас кислорода. Следовательно, для преодоления больших дистанций бегун должен ограничить себя меньшей скоростью, чтобы кислорода хватило на весь забег. Только спринтеры (бегуны на короткие дистанции) все время бегут на максимальной скорости.

На соревнованиях бегун стремится победить соперника, что диктует ему стратегию забега. Она отличается от той, что дает наилучшее время. Если же бегун старается побить рекорд, то он должен выбрать ту скорость, которая соответствует полному истощению его запаса кислорода к моменту пересечения финишной черты.

Ускорение

Расчетные задачи на ускорение могут быть следующими.

Задача 5.8. Какое ускорение развивает бегун на дистанции 100 м для достижения максимальной скорости 11,2 м/с? Время разбега равно 2 с.

Задача 5.9. Предположим, что спринтер за 1,8 с может разогнаться из состояния покоя до максимальной скорости 10,8 м/с. Каково будет время на финише, если ему удастся сохранить эту скорость?

Задача 5.10. Предположим, что другой спринтер, разгоняясь равноускоренно, может достичь максимальной скорости за 1,7 с. Какую максимальную скорость должен он поддерживать, чтобы не уступить мировому рекорду (19,5 с) на дистанции 200 м?

Задача 5.11. При беге на длинную дистанцию (например, на 1500 м) большинство бегунов избирают сравнительно невысокий темп на среднем участке забега, но потом они делают рывок к финишу. Правильна ли эта стратегия для установления рекорда? Может ли эта стратегия быть верной для повышения вероятности победы в забеге?

Задача 5.12. Известен способ определения ускорения по углу, на который отклоняется при движении подвешенный на нити грузик (см. § 9). Изготовьте такой прибор и с его помощью измерьте ускорения, которые вы развиваете при езде на велосипеде, при катании на роликовой доске и т.п. Какое ускорение измеряет данный прибор?

Задача 5.13. Парашют раскрывается примерно за 2 с. Пусть за это время скорость парашютиста равномерно уменьшается от скорости свободного падения 250 км/ч до нуля. Какое ускорение испытывает при этом парашютист? Выразите это ускорение через g . Опасны ли прыжки с парашютом для лиц, теряющих сознание при $5g$?

Перегрузки

В отличие от скорости, значение которой не ощущается человеком, ускорение — изменение скорости — может влиять на человека. Возрастание ускорения по сравнению с ускорением свободного падения g , которое человек испытывает, находясь на поверхности Земли, называется перегрузкой. Перегрузки, возникающие при движении с большими ускорениями, опасны для человека (см. § 14).

При перегрузках происходит замедление кровообращения. Действительно, в норме давление крови у человека на уровне сердца составляет 0,12 атм. Но так как голова человека находится на 30 см выше сердца, то при ускорении $4g$ этого давления достаточно лишь для того, чтобы кровь могла дойти до головного мозга. Чтобы обеспечить кровообращение мозга при $8g$, сердце должно увеличить напор крови более чем вдвое. При ускорении $5g$, направленном вдоль тела в направлении ноги—голова, кровь утяжеляется настолько, что сердце вообще не может гнать ее к голове. Человек испы-

тывает ощущение «черной пелены» перед глазами и теряет сознание. Если ускорение направлено в противоположную сторону (голова—ноги), перед глазами встает «красная пелена» и наступает потеря сознания в результате прилива крови к голове. Уже при ускорении, несколько большем g , у человека нарушается зрение и появляются галлюцинации. Определенный вклад в ощущение человеком перегрузки дает увеличение давления одних внутренних органов тела на другие.

Известные из опыта безопасные для человека перегрузки и время их действия приведены на рисунке 1.17. Из рисунка видно, что ускорения, превышающие $10g$, человек может переносить в течение 1 с.

Возникновение перегрузок обычно связывают со стартами космических кораблей, когда космонавт во время работы двигателей (порядка 5 с) испытывает перегрузки, равные 7–9.

Большие перегрузки (до 10) возникают при раскрытии парашюта, управляемом спуске космического аппарата, резком маневрировании на скоростном самолете, автомобильной аварии.

Методы борьбы с опасными перегрузками предложил К.Э.Циолковский. Один из них — помещение космонавта при старте и финише ракеты в жидкость с плотностью, равной плотности тела человека. Второй способ, подтвержденный многочисленными опытами и применяемый в современной космонавтике, заключается в расположении тел космонавтов так, чтобы ускорение было направлено перпендикулярно длинной оси человеческого тела. Последнее делается для того, чтобы, уменьшая размеры подвергнутых деформации кровеносных сосудов, свести к минимуму нарушение условий кровообращения.

В связи с обсуждением с учащимися последнего обстоятельства можно предложить их вниманию следующую задачу.

Задача 5.14. Оцените размеры тела человека, исходя из предположения, что независимо от позы и перегрузки, испытываемой человеком, давление в кровеносных сосудах должно оставаться неизменным, чтобы человек чувствовал себя комфортно.

Р е ш е н и е

Из равенства $\Delta p = \Delta p'$, где $\Delta p = \rho gh$ — разность давлений, обусловленная перепадом высот между ступнями ног человека и его головой; $\Delta p' = \rho' g' \Delta h$ — разность давлений, обус-

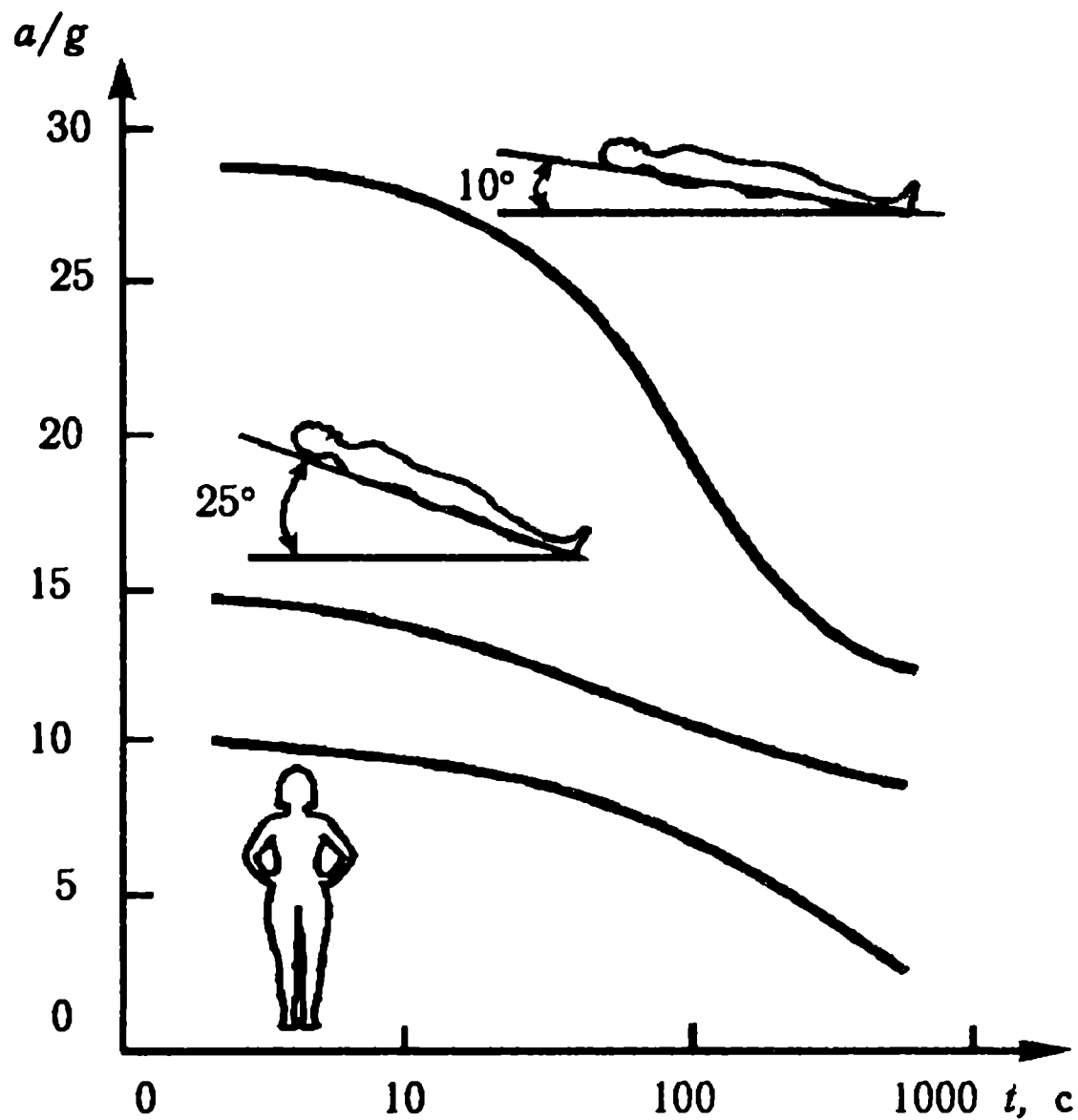


Рис. 1.17

ловленная перепадом высот кровеносных сосудов лежащего человека, следует

$$\rho gh = \rho' g' \Delta h,$$

откуда

$$h = g' \frac{\Delta h}{g},$$

Но $g' = 10g$, а $\Delta h = 0,2$ м.

Тогда

$$h = \frac{10g \cdot 0,2 \text{ м}}{g} = 2 \text{ м.}$$

Получили характерный размер человека — его рост.

Оказывается, к идее о горизонтальном расположении тела человека при старте ракеты К.Э.Циолковский пришел из наблюдений такого рода. Известно, что человек в случае ухудшения состояния здоровья или при сильном утомлении стремится лечь, так как в этом положении ему легче переносить даже обычную перегрузку — земное тяготение. В горизонтальном положении, как видно из рисунка 1.17, тре-

нированные люди способны переносить без последствий для здоровья перегрузки до 30.

Изучение темы целесообразно закончить обсуждением очень важного вопроса «экологии» человека — безопасность при авариях. При авариях, как уже упоминалось, человек испытывает большие перегрузки. Интересно рассмотреть их значения и роль средств безопасности для выживания потерпевших.

В результате многочисленных экспериментов на манекенах и изучения статистики несчастных случаев на дорогах удалось выяснить, что реальные шансы выжить имеют те автомобилисты, чье ускорение при аварии не превышает 30g.

Усвоению этого вывода поможет решение таких задач.

Задача 5.15. Автомобиль, движущийся со скоростью 50 км/ч, врезается в дерево. Передняя часть автомобиля деформируется, а тело водителя, не пристегнутого ремнями безопасности, перемещается на 0,7 м и останавливается. Определите среднее ускорение водителя во время этого столкновения. Ответ выразите в долях g . Какое ускорение испытает водитель при скорости движения 100 км/ч?

Задача 5.16. Человек, плотно пристегнутый ремнями безопасности, имеет все шансы уцелеть в автокатастрофе, если тормозящее ускорение по модулю не превышает 30g. Предполагая, что автомобиль тормозится с постоянным ускорением 30g, определите, на какую деформацию (в целях обеспечения безопасности) должна быть рассчитана передняя часть автомобиля, если авария происходит при скорости 100 км/ч.

Задача 5.17. Рассчитайте ускорение ступни и головы человека при торможении о пол, если известно, что скорость падения 3 м/с, а прогиб пола равен 1 мм. (Можно считать, что голова от начала удара до опускания или полусогнутые ноги пройдет путь 0,6 м.)

Задача 5.18. Предположим, что для комфортабельных условий полета модуль горизонтальной составляющей ускорения не должен превышать 10 м/с^2 . Каким при этом может быть наименьшее время полета между двумя городами, находящимися на расстоянии 400 км друг от друга?

§ 6. Свободное падение тел

Свободное падение тел (движение тел вблизи поверхности Земли с ускорением $g = 9,8 \text{ м/с}^2$) представляет особый интерес с антропоцентрической точки зрения, так как позволяет привлечь внимание учащихся к одной из основных характеристик окружающего человека мира — ускорению свободного падения.

Значением ускорения свободного падения определяются высота гор и деревьев, размеры и форма тел животных и человека и т.д. и т.п.

Живой интерес у учащихся вызывает рассказ преподавателя о внешнем виде и физиологических особенностях гуманоидов—жителей планеты с другими по сравнению с Землей характеристиками, например с бóльшим значением ускорения свободного падения. Действительно, в соответствии с выражением $p = \rho gh$ при неизменных характеристиках состава вещества и структуры тела животные и человек на такой планете должны обладать меньшим ростом, но более развитой мускулатурой.

В подтверждение этого можно привести следующие расчеты. Удельная сила, определяемая отношением $\frac{F}{m}$, пропорциональна отношению $\frac{L^2}{L^3} \sim \frac{1}{L}$ (см. § 1).

Получается, что, чем меньше рост человека, тем большую силу он может развить [6, 15].

Последнее обстоятельство потребовало бы для наших гипотетических существ более крепкого телосложения, более коротких конечностей, более тяжелых костей при той же прочности материала, что и у жителей Земли. В мире больших ускорений свободного падения малый ребенок был бы предпочтительнее при беременности, что привело бы к уменьшению среднего веса взрослых людей. Большое ускорение свободного падения, означающее, что тела на этой планете должны падать быстрее, потребовало бы от жителей этой планеты более быстрой и точной мускульной реакции. Случайные падения для них стали бы более опасными, вероятнее стали бы смертельные исходы и ушибы. Однако по скорости бега и дальности бросания жители этой планеты уступили бы землянам.

Для иллюстрации того факта, что свободное падение — равноускоренное движение, можно предложить следующие задачи.

Задача 6.1. Определите время реакции человека.

Можно использовать эту задачу для проведения лабораторной работы (см. Приложение).

Задание вызывает большой интерес у учащихся, служит выяснению еще одной важной характеристики человеческого организма и пополнению таблицы «Возможности человека».

Задача 6.2. Какова предельно допустимая скорость приземления парашютиста, если человек может безопасно прыгать с высоты 2 м?

Задача 6.3. Ускорение свободного падения на Земле примерно в 6 раз больше, чем на Луне. На какую высоту взлетит тело на Луне, если на Земле его удалось подкинуть вверх на 23 м?

Задача 6.4. В романе известного американского фантаста А.Кларка «2061: Одиссея три» рассказывается об экспедиции на комету Галлея. Чему равно ускорение свободного падения на поверхности кометы, если, по словам Кларка, наблюдателю потребуется 15 с, чтобы опуститься на 1 м?

Задача 6.5. Супермен стоит у окна на высоте 30 м над уровнем земли. Мимо пролетает ребенок, выпавший из окна, находящегося на высоте 45 м над уровнем земли. С каким ускорением (из состояния покоя) должен супермен спускаться по лестнице, чтобы успеть поймать падающего ребенка?

Задача 6.6. С каким ускорением должен спускаться по лестнице супермен, находящийся на смотровой площадке Эйфелевой башни, чтобы перехватить парашютиста, прыгнувшего с той же площадки на 2 с раньше? Высоту площадки принять равной 150 м. Парашютиста считать свободно падающим.

§ 7. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Известно, что одной из традиционных военных проблем является задача о наведении пушки или пращи на цель, если известны расстояние до цели и начальная скорость снаряда [4, 42].

Однако мы, наверное, мало погрешим против истины, если выскажем предположение, что проблема поражения цели, удаленной на некоторое расстояние, была одной из первых технических задач, вставших перед древним человеком. Бросок камня или другого метательного снаряда, «удлиняя» руку человека, расширял доступное ему пространство, вел к увеличению его возможностей — повышал в конечном счете «уровень жизни» древнего человека.

Оценить возможности человека в достижении цели, удаленной на расстояние, при броске камня можно на следующем примере.

Задача 7.1. Человек бросил камень под углом 45° к горизонту с начальной скоростью 20 м/с. На какое расстояние улетит камень?

Понятна дальнейшая логика развития метательной техники. Желая улучшить летные качества снаряда, ему придавали все более обтекаемую форму, снабжали острием для увеличения его поражающей способности, оперением для

обеспечения устойчивости при полете. Так появились дротик, копье, стрела, ядро. Гениальным достижением древних людей, приведшим к существенному прогрессу цивилизации, было изобретение приспособлений, способных накапливать, «аккумулировать» мускульную силу человека в виде потенциальной энергии упругой деформации. Накопленная в этих устройствах энергия, мгновенно высвобождаясь, превращалась в кинетическую энергию движущихся частей устройства, еще больше расширяя границы человеческих возможностей. Здесь имеются в виду такие устройства, как праща, лук, арбалет, катапульта и т.д. (см. § 19).

Спортивные соревнования по метанию различных снарядов: копья, молота, ядра, а также стрельба из лука — отзвук и память об одном из древнейших видов деятельности человека.

Интересно и поучительно, на наш взгляд, проследить, как влиял процесс совершенствования метательных снарядов на характеристики их полета, в связи с чем считаем целесообразным предложить учащимся следующую задачу.

Задача 7.2. Рассмотрите таблицу 1.2 и пополните ее недостающими данными.

Таблица 1.2

Характеристики полета спортивных снарядов

Снаряд	Угол вылета, °	Скорость вылета, м/с	Дальность полета, м
Ядро	40	14	?
Диск	?	25	60
Молот	45	?	70
Копье	38	35	?

Задача 7.3. Прыгун в воду, разбегающийся со скоростью 3,2 м/с, прыгает с вершины утеса и достигает поверхности воды через 1,5 с. Какова высота утеса и на каком расстоянии от его подножия прыгун погружается в воду?

Задача 7.4. Теннисист при подаче запускает мяч с высоты 2 м над землей. На каком расстоянии от места подачи мяч ударится о землю, если начальная скорость направлена под углом 30° к горизонту и равна 20 м/с?

Задача 7.5. Мальчик ростом 1,5 м, стоя на расстоянии 15 м от забора высотой 5 м, бросает камень под углом 45° к горизонту. С какой минимальной скоростью надо бросить камень, чтобы он перелетел через забор?

Задача 7.6. Во время спортивных соревнований диск был брошен на расстояние 53,1 м. С какой минимальной скоростью надо бросить диск, чтобы он пролетел это расстояние, если $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ (тело брошено на полюсе)? Как далеко улетел бы диск при такой же скорости и угле бросания на экваторе, где $g = 9,78 \text{ м/с}^2$? Какие данные следовало бы добавить к числам, характеризующим рекорды метания, чтобы можно было определить начальные скорости диска, которые, собственно, и характеризуют спортсменов?

Задача 7.7. Известно, что значения ускорения свободного падения на уровне моря изменяются на 0,5% (см. § 11). К какой разнице в дальности метания копья легкоатлетом могут привести эти изменения? Зависят ли легкоатлетические рекорды от того, в каком месте Земли они установлены?

Задача 7.8. Оцените, на сколько дальше спортсмен бросит гранату, если будет бросать ее с разбега.

Задача 7.9. Чтобы перепрыгнуть через ров, человек совершает разбег. Какой скорости он должен достичь к моменту прыжка, если прыжок совершается в горизонтальном направлении? Какой будет при этом конечная скорость прыжка? Ров имеет ширину 4 м, а одна сторона выше другой на 1 м.

Задача 7.10. Спортсмен, совершающий прыжок в длину, отрывается от земли под углом 30° и пролетает 8,9 м. Оцените скорость спортсмена в момент толчка по этим данным.

Задача 7.11. Прыгун в длину мирового класса способен прыгнуть на 9 м. Предположим, что модуль его горизонтальной составляющей скорости при отрыве от земли равен 9 м/с. Сколько времени прыгун будет находиться в воздухе и на какую высоту он поднимется? Считайте, что он приземляется стоя вертикально, т.е. так же, как он отрывается от земли.

Задача 7.12. Во сколько раз длиннее может быть прыжок человека на Луне по сравнению с прыжком на Земле, если скорость и угол отрыва одинаковы? Ускорение свободного падения на Луне составляет $1/6$ земного.

Задача 7.13. Прыгун в длину может с помощью тренировок увеличить либо вертикальную, либо горизонтальную составляющую начальной скорости. Что следует предпочесть? Вычислите увеличение длины прыжка при 10%-ном увеличении модуля v_{0x} и при 10%-ном увеличении модуля v_{0y} .

Задача 7.14. Оцените, как далеко может прыгнуть в длину с места человек.

Р е ш е н и е

Учитывая, что при прыжке с места вверх человек может подняться на 0,6 м за счет перемещения его центра масс и еще на 0,6 м за счет приседания перед прыжком, получаем

$$v = \sqrt{2gh}; \quad v = 4,85 \text{ м/с.}$$

Пусть теперь скорость направлена не вверх, а под углом 25° к горизонту. Тогда

$$L = v^2 \frac{\sin 2\alpha}{g},$$

$$L = 4,85 \frac{\sin 50^\circ}{9,8} \text{ м} = 1,8 \text{ м}.$$

Задача 7.15. Как далеко может прыгнуть человек в длину, используя разбег?

Р е ш е н и е

Проекции v_{0x} и v_{0y} скорости \vec{v}_0 (рис. 1.18) определяются следующим образом. Для модуля v_{0x} можно взять значение $10,5 \text{ м/с}$ — скорость спринтера, для модуля v_{0y} — результат предыдущей задачи — $4,85 \text{ м/с}$. Тогда

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2};$$

$$v_0 = 11,04 \text{ м/с};$$

$$\alpha = \text{arctg} \frac{v_{0x}}{v_{0y}}; \quad \alpha = 25^\circ.$$

Полученное значение угла согласуется со значениями углов, наблюдаемыми у спортсменов на фотографиях, сделанных во время соревнований по прыжкам в длину.

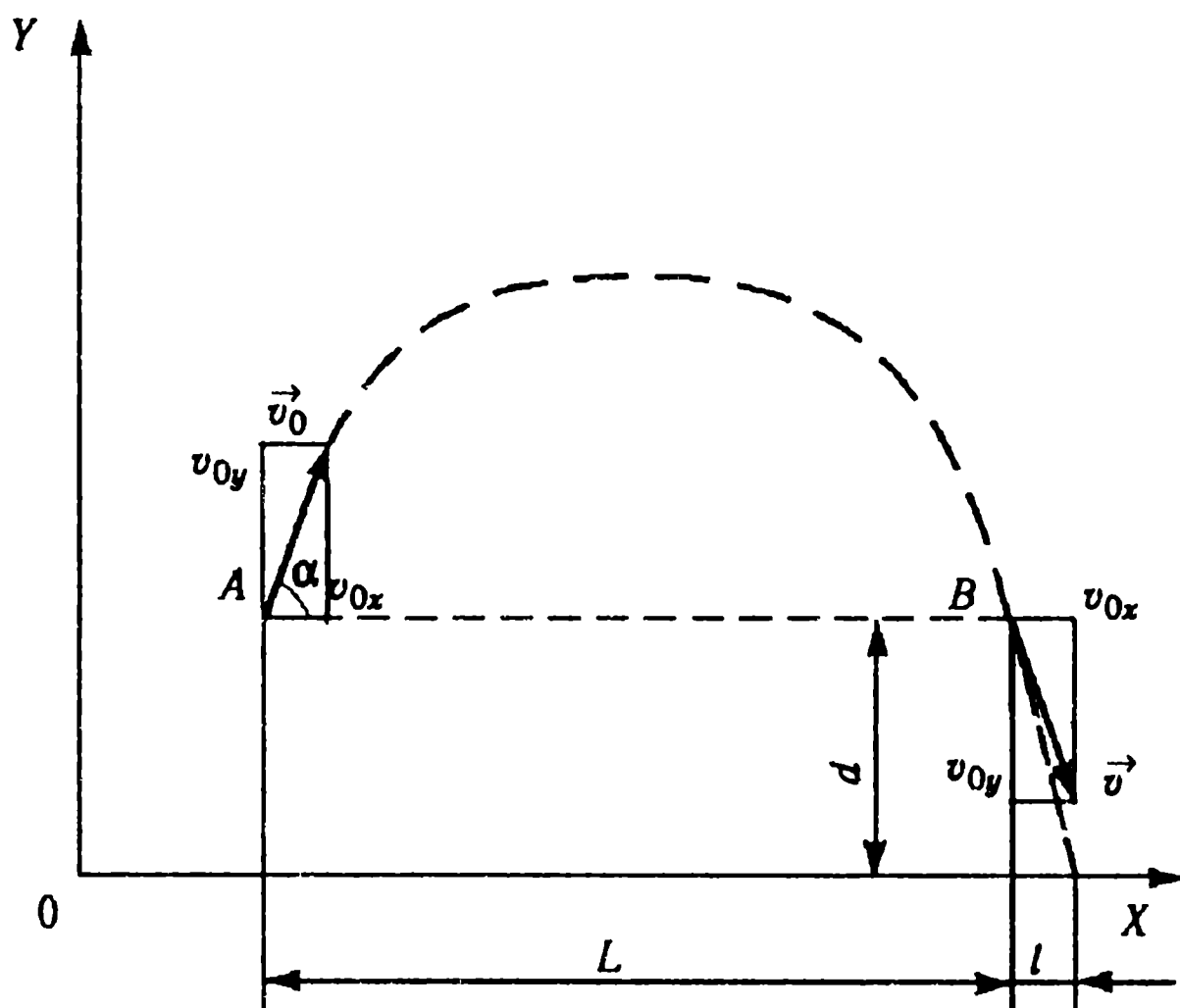


Рис. 1.18

Длину прыжка находим по формуле

$$L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}; L = 10,5 \text{ м.}$$

Здесь мы не учли, что прыгун может увеличить это расстояние за счет того, что его центр масс в момент приземления опускается ниже, чем был на старте, приблизительно на 0,6 м. При начальной скорости, равной по модулю 4,85 м/с (она в точке А такая же, как в точке В), высота

$$d = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Тогда

$$t = \frac{v_{0y}}{g} \pm \frac{1}{g} \sqrt{v_{0y}^2 + 2gd}; t = (-0,5 \pm 0,61) \text{ с,}$$

или

$$t = 0,11 \text{ с.}$$

Горизонтальное расстояние, пройденное при этом, равно

$$l = v_{0x}t; l = 10,5 \cdot 0,11 \text{ м} = 1,2 \text{ м.}$$

Тогда полная длина прыжка окажется равной

$$10,5 \text{ м} + 1,2 \text{ м} = 11,7 \text{ м.}$$

Заметим, что приземлением в сидячем положении спортсмен увеличивает длину прыжка более чем на 10%. Кроме того, прыгун может добавить к этой длине еще немного за счет движения рук и ног, которые изменяют положение центра масс тела. Однако этот элемент прыжка мы опустим.

Мировой рекорд для прыжков в длину с разбега равен 9 м. Таким образом, достигнутая длина прыжка составляет 77% теоретической [6, 47].

§ 8. Равномерное движение по окружности

В качестве объектов, совершающих равномерное движение по окружности, чаще всего рассматривают космические тела: планеты, их спутники, звезды и т.д. и т.п. Строго говоря, вращение Земли вокруг собственной оси должно быть охарактеризовано как вращательное движение твердого тела. Однако движение отдельных точек поверхности планеты можно рассматривать с достаточной степенью точности как равномерное движение по окружности.

Для иллюстрации этого вида движения, в частности для вычисления периода T и частоты f , можно предложить следующие задачи.

Задача 8.1. Чему равен: а) период вращения Земли вокруг своей оси; б) период обращения Земли вокруг Солнца; в) период обращения Луны вокруг Земли?

Задача 8.2. Чему равны частоты обращения тел (см. предыдущую задачу)?

Задача 8.3. Вычислите угловую скорость Земли: а) при ее движении по орбите вокруг Солнца; б) относительно ее собственной оси вращения.

Задача 8.4. Чему равна линейная скорость точки на поверхности Земли, если она находится: а) на земном экваторе; б) на полюсе; в) на широте 45° ?

Считаем целесообразным для подтверждения факта вращения Земли вокруг собственной оси показать учащимся демонстрационный опыт «Маятник Фуко». Демонстрация имеет, на наш взгляд, большое мировоззренческое значение и относится к числу немногочисленных опытов, позволяющих в условиях учебной аудитории или класса пронаблюдать явление планетарного масштаба.

Предварить демонстрацию советуем обсуждением следующего вопроса.

Задача 8.5. Какие вам известны факты и явления, свидетельствующие о вращении Земли вокруг собственной оси? об обращении Земли вокруг Солнца?

Ниже приведены задачи на применение формулы центростремительного ускорения.

Задача 8.6. Оцените центростремительное ускорение молота во время его раскручивания спортсменом, если ось вращения находится на расстоянии 2 м от молота и он совершает один оборот за $2/3$ с.

Задача 8.7. Определите центростремительное ускорение Земли при ее движении вокруг Солнца и Луны при движении вокруг Земли.

Задача 8.8. Ускорение свободного падения на поверхности Луны равно $0,14g$, а радиус Луны равен $1,74 \cdot 10^3$ м. Сколько времени потребуется лунному модулю, чтобы облететь Луну по орбите вблизи ее поверхности?

Задача 8.9. Вычислите центростремительное ускорение тела, находящегося: а) на полюсе; б) на экваторе; в) на широте Москвы.

Задача 8.10. Оцените, какую долю от ускорения свободного падения составляет центростремительное ускорение точки, расположенной на экваторе Земли.

Задача 8.11. Два одинаковых тела брошены с одинаковой высоты одно на экваторе, а другое — на полюсе. Какое из тел быстрее достигнет поверхности Земли?

Вращение планетного тела вокруг собственной оси — важный фактор, регулирующий возможность возникновения на нем жизни. Медленное собственное вращение планеты означает существование резкого перепада температур между дневной и ночной поверхностями планеты. Слишком низкие температуры на ночной стороне и слишком высокие на дневной означают невозможность выживания на этой планете растений, для которых необходимый температурный интервал обычно имеет ограниченное значение.

В частном случае равенства сидерического периода году, означающего, что планета всегда повернута к светилу одной и той же стороной, условия пригодности для жизни могут выполняться вблизи терминатора (линии, отделяющей день от ночи). Однако трудно сказать, как эти условия повлияют на сохранение планетой атмосферы [34, 88].

Большие скорости вращения влияют на формирование внешнего облика планеты: способствуют увеличению ее сплюснутости и перепаду ускорения свободного падения. Если в силу каких-то причин скорость вращения увеличится, то может произойти нарушение устойчивости формы планеты, приводящее к ее разрушению при $a_{ц} = g$ на экваторе.

Ученые оценивают предельные значения периода вращения планеты, пригодной для жизни, от 2—3 до 96 ч.

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

§ 9. Законы Ньютона

Гуманитарную направленность при изучении темы «Законы Ньютона» можно реализовать, на наш взгляд, по двум направлениям.

Первое направление состоит в применении для обоснования законов механики «очеловеченных» задач и опытов, связанных с участием самих учащихся. Это делает более наглядным и занимательным процесс обучения, поможет учащимся лучше понять изучаемый материал.

Второе направление мы связываем с формированием гносеологического аспекта мировоззрения учащихся.

Первый закон Ньютона Реализация первого из этих двух подходов при изучении темы «Первый закон Ньютона» затруднена в условиях класса или учебной лаборатории. Здесь целесообразно обратиться к мысленному эксперименту и жизненному опыту учащихся. Ниже приводятся тексты задач и вопросов, иллюстрирующих содержание первого закона Ньютона.

Задача 9.1. Укажите среди названных движений те, которые происходят по инерции: а) полет летающего лыжника после отделения от трамплина; б) движение водителя автомобиля, движущегося равномерно прямолинейно; в) движение космического аппарата по орбите вокруг планеты; г) движение парашютиста во время затяжного прыжка; д) движение пассажира автобуса после резкой остановки последнего.

Задача 9.2. Почему опасно выходить из машины на ходу? В каком направлении вы можете упасть? Почему опасно вести машину по обледеневшему шоссе?

Задача 9.3. Почему ребенок в коляске откидывается назад, когда вы резко толкаете ее?

Задача 9.4. При автомобильных авариях иногда у водителей бывает сотрясение мозга. Это случается, когда автомобиль испытывает сильный толчок сзади. Объясните, почему кажется, что при этом голова потерпевшего откидывается назад.

Задача 9.5. Бывают скоростные виражи автомобиля, при которых пассажирам приходится изменять положение своего тела в кресле. В чем причина ускорения в каждом случае?

Задача 9.6. Перечислите операции управления автомобилем (их минимум 4), которые при их осуществлении могут заставить пассажира изменить положение тела относительно сиденья. Какова природа ускорений, вызываемых каждой из операций?

Типичным случаем использования инерции в живом мире являются прыжки: тело животного находится под действием силы, развиваемой мышцами соответствующих конечностей, лишь в начале прыжка, пока ноги не отделились от земли. В дальнейшем никакого двигательного усилия уже не нужно: тело движется вперед, преодолевая сопротивление воздуха и частично силу тяжести, исключительно вследствие инерции.

Сила. Второй закон Ньютона При введении понятия силы хорошим подспорьем может послужить диаграмма, изображенная на рисунке 2.1.

На шкале, построенной в логарифмическом масштабе с единицей 1 Н, отложены значения сил, встречающихся в природе, от наибольшей — силы тяготения между Землей и Солнцем до наименьшей — силы тяготения между двумя электронами.

Силы, развиваемые человеком, показаны с левой стороны шкалы. Это силы ударов различных спортсменов, сила руки, сжимающей динамометр, и т.д. и т.п. Значения других сил, характеризующих организм человека, получим, решая задачи, подобные приведенным ниже. Некоторые из них можно будет включить в таблицу-справочник «Возможности человека».

Задача 9.7. Какую наибольшую силу человек может создать своим телом?

Ответ на этот вопрос может звучать так: человек может приложить силу, по меньшей мере равную своему весу, навалившись, например, на один конец рычага и т.п. Приложенная в этом случае сила будет равна mg , что составляет при средней массе 70 кг примерно 700 Н.

Растягивая динамометр двумя руками, человек может развить силу, равную по меньшей мере 100 Н. Упираясь ногами в петлю, он сможет тянуть веревку вверх с силой около 1000 Н. Развиваемая при этом сила называется становой.

Силы в природе

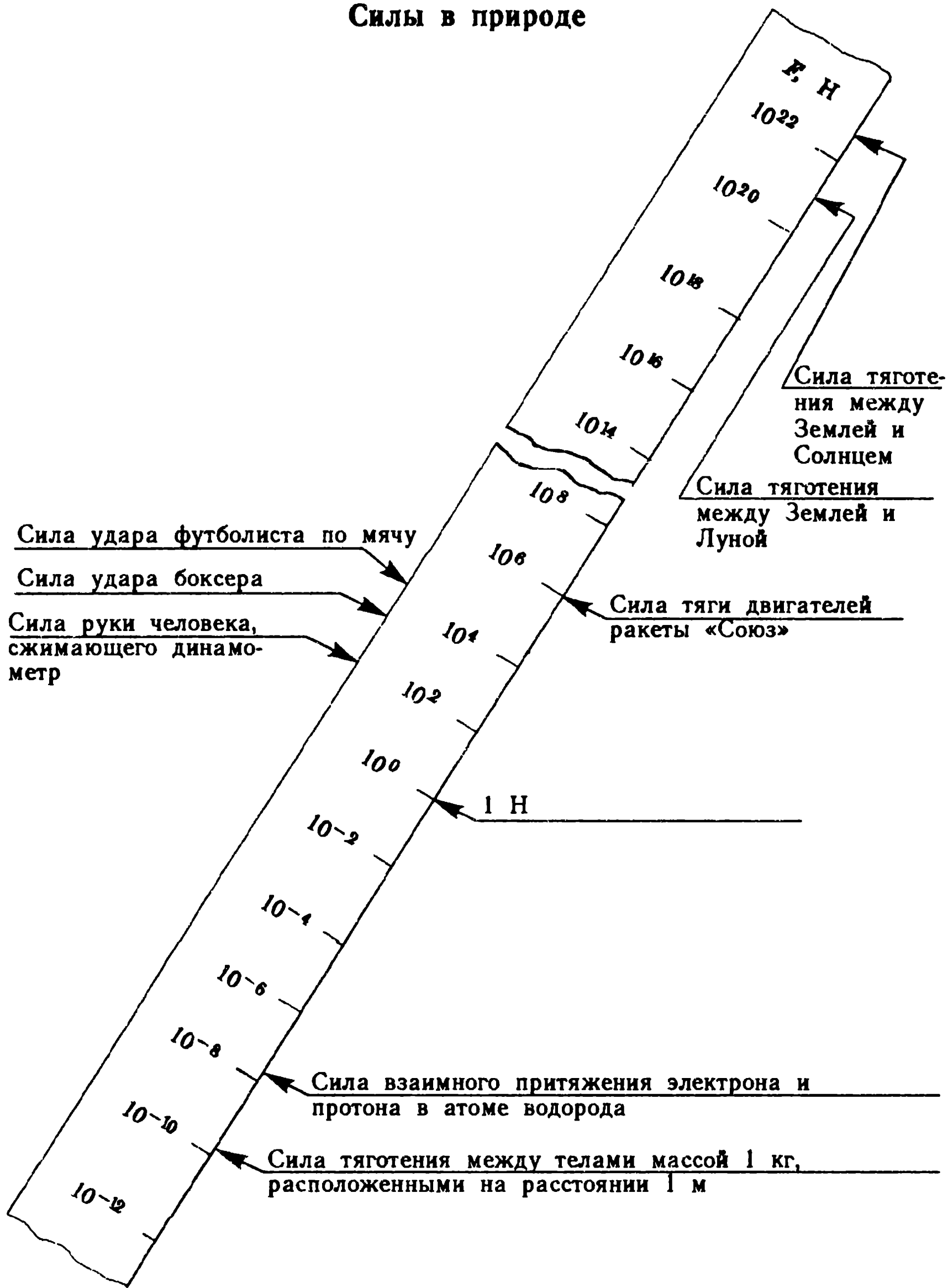


Рис. 2.1

Задача 9.8. Придумайте способ определения ручной и становой силы человека. Придумайте и изготовьте соответствующее устройство. Сделайте необходимые замеры.

Одним из вариантов устройства для измерения сил, развиваемых человеком, может быть динамометр, изготовленный из дверной пружины, а лучше двух, соединенных параллельно, укрепленных на двух дюралюминиевых трубках (обрезках лыжных палок), и четырех ручек.

Встав ногами на нижнюю трубку, можно растягивать пружину за верхнюю трубку с ручками. Перед измерениями устройство необходимо проградуировать.

Предложенная последовательность действий может послужить содержанием лабораторной работы «Градуировка динамометра и определение становой силы человека» (см. Приложение).

Описанный эксперимент можно дополнить измерениями с помощью ручного динамометра сил, развиваемых руками учащихся. В качестве вывода по данной лабораторной работе учащиеся могут написать: «Я узнал, что могу развивать такую-то становую силу, такие-то силы левой и правой рукой». Задача с отвлеченным содержанием станет при этом прикладной, наполненной гуманитарным, антропометрическим содержанием.

Задача 9.9. Придумайте способы увеличения значений сил, развиваемых человеком.

Одним из возможных ответов на этот вопрос может быть следующий. Человек разовьет большую, чем собственный вес, силу, если будет двигаться с ускорением. Из материалов, рассмотренных в данном пособии, видно, что человек развивает силы, превышающие его вес в несколько раз, находясь в ускоренно движущемся вверх лифте, при толчках, ударах, приземлениях после прыжков.

Задача 9.10. При исключительно высоком прыжке с места человек может взлететь на высоту 0,8 м над землей. С какой силой человек массой 70 кг должен действовать на землю, чтобы осуществить такой прыжок? Считайте, что перед прыжком человек присел на 0,2 м.

Задача 9.11. Определите среднюю силу, с которой спортсмен действует на ядро массой 7 кг, если ядро ускоряется на пути длиной 2,7 м, а сообщаемая ему начальная скорость равна 13 м/с.

Задача 9.12. Лучшие спринтеры могут пробежать стометровку за 10 с. Какова горизонтальная составляющая силы, с которой спринтер массой 70 кг действует в процессе ускорения (мы предполагаем, что спортсмен ускоряется равномерно на первых 10 м дистанции)? Какова средняя скорость спринтера на остальных 90 м дистанции?

Задача 9.13. При автомобильной катастрофе человек имеет все шансы выжить, если тормозящее ускорение не превышает $30g$. Вычислите силу, которая действует на человека массой 70 кг и создает такое ускорение. Какое расстояние при этом проходит автомобиль до полной остановки, если его скорость была 72 км/ч?

Задача 9.14. Согласно упрощенной модели сердца млекопитающего при каждом сокращении около 20 г крови ускоряется от $0,25$ до $0,35$ м/с за $0,1$ с. Какая при этом сила развивается сердечной мышцей?

Задача 9.15. Мужчина массой 70 кг прыгнул в плавательный бассейн с высоты 5 м. Требуется $0,4$ с, чтобы вода уменьшила его скорость до нуля. С какой средней силой действует вода на человека?

«Источником» силы в теле человека и животных являются мышцы. В теле человека их, например, насчитывается около 600 ; вместе они составляют до 40% массы человеческого тела. Мышечная ткань обладает свойством сокращаться и растягиваться, ей присущи эластичность и упругость, т.е. способность восстанавливать свою форму после прекращения действия деформирующего усилия. При этом упругие характеристики мышечной ткани выше, чем соответствующие показатели многих искусственных материалов (см. § 18). Интересно, что мышцы устроены одинаково у всех животных (в том числе и человека).

Развитые мышцы рельефно выделяются на теле человека. Размеры их можно увеличить тренировками и специальным питанием. Меняются размеры мышц и в течение жизни человека. В старости толщина мышечных пучков уменьшается, они становятся менее упругими. Активный образ жизни может замедлить процесс атрофии мышц.

Хотя мышцы обладают высокими упругими свойствами, но эти свойства по-разному проявляются в активном состоянии и покое. Поэтому, чтобы мышцы работали продолжительно и эффективно, к ним следует относиться бережно. Прежде чем заставлять их работать, например выполнять физические упражнения, необходимо сделать разминку. В противном случае возможны серьезные травмы мышц, вплоть до их разрыва.

Мышцы обеспечивают высокую подвижность человека и животных. Подвижностью называется свойство организма быстро переходить от покоя к движению и обратно.

Задача 9.16. Как зависит подвижность животного от его размеров?

Р е ш е н и е

Подвижность, или способность развивать большие ускорения, определяется соотношением $a = \frac{F}{m}$.

Сила создается мышцами и пропорциональна числу пучков мышечных волокон (филаментов), из которых состоит мышца, т.е. $F \sim S \sim L^2$.

В массу тела, кроме мышц, вносят вклад внутренности, кости, жировые, соединительные и покровные ткани. Масса $m \sim V \sim L^3$.

$$\text{Тогда } a \sim \frac{L^2}{L^3} \sim \frac{1}{L}.$$

Получается, что животное тем подвижнее, чем оно меньше.

Задача 9.17. Предложите способ измерения ускорения.

Р е ш е н и е

Одним из возможных ответов на этот вопрос может быть такой. Простейший акселерометр — прибор для измерения ускорения — может представлять собой тело малой массы. При движении с ускорением груз будет отклоняться от вертикали на тем больший угол, чем большее ускорение он будет испытывать (см. задачу 9.18.). Для регистрации отклонения нити служит специальная шкала, проградуированная так, чтобы сразу показывать значение ускорения.

Задача 9.18. При изготовлении простейшего акселерометра необходимо проградуировать шкалу прибора в единицах g . Найдите выражение, связывающее угол отклонения нити с грузом от вертикали с ускорением.

Задача 9.19. На какой угол от вертикали отклонится человек, стоящий на полу трамвая, при торможении последнего? При торможении скорость трамвая за 0,3 с уменьшается от 24 до 6 км/ч.

Для выработки умения рассчитывать равнодействующие сил, действующих на тела, можно предложить следующие задачи.

Задача 9.20. Сто человек делятся на две команды по перетягиванию каната. Какой будет сила натяжения каната, если каждый человек в среднем может приложить силу 200 Н?

Задача 9.21. В соревнованиях по перетягиванию каната участвуют четыре человека. Два из них тянут канат в одну сторону с силой 330 Н и 380 Н, два — в противоположную сторону с силой 300 Н и 400 Н. Чему равна сумма этих сил и куда она направлена?

Задача 9.22. Стрелу, упирающуюся в тетиву лука, оттягивают с силой 200 Н. Чему равна сила натяжения тетивы, если угол между ее верхней и нижней частями равен 150° ?

Задача 9.23. Луки, которые используются для стрельбы или охоты, классифицируются по силе, необходимой для их натяжения. При характеристике луков обычно используется британская система единиц, и лук может быть 30-, 40- и 50-фунтовым (фактические силы натяжения луков

равны 648, 864 и 1079 Н). Какова сила натяжения тетивы во всех трех типах луков, если угол между ее верхней и нижней частями равен 130° ?

Задача 9.24. Два человека хотят повалить дерево при помощи каната, привязанного вблизи вершины. Если они будут пользоваться одним канатом, то дерево упадет на них своей вершиной. Чтобы предотвратить это, они привязали два каната длиной по 10 м к той же самой точке и отошли от дерева на расстояние 10 м друг от друга. Если каждый будет тянуть с силой 300 Н, то с какой силой канаты будут действовать на дерево?

Задача 9.25. Два студента хотят натянуть проволоку между двумя столбами. Какой из следующих способов лучше: каждый студент держит конец проволоки и тянет его по направлению к столбу; студенты прикрепили один конец проволоки к одному столбу, а затем вдвоем тянут другой конец проволоки к другому?

Задача 9.26. Каким должно быть натяжение проволоки в корригирующем зубном протезе, чтобы на выделенный зуб действовала в указанном направлении результирующая сила 0,6 Н (рис. 2.2)?

Далее приводятся задачи на применение второго закона Ньютона.

Задача 9.27. С каким ускорением падал бы парашютист массой 60 кг в затыжном прыжке при силе сопротивления воздуха 25 Н?

Задача 9.28. Два конькобежца одинаковой массы проходят круги по круговым дорожкам стадиона одновременно. Расстояние одного конькобежца от центра площадки в два раза больше, чем другого. Сравните: а) скорости конькобежцев; б) силы, создающие центростремительные ускорения конькобежцев.

Задача 9.29. Гимнаст делает на перекладине оборот «солнце». С какой силой действует он на перекладину в момент, когда проходит нижнее положение?

Задача 9.30. Метатель молота за четыре оборота сообщает первоначально покоящемуся молоту массой 7,3 кг скорость 27,2 м/с, после чего бросает

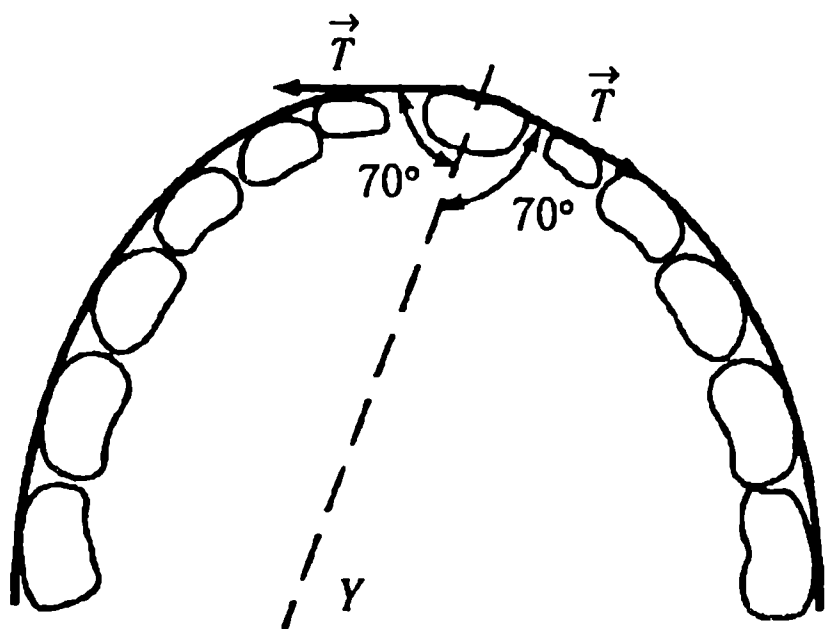


Рис. 2.2

его. Предположив, что угловая скорость молота увеличивается равномерно и радиус окружности, описываемой молотом, равен 2 м, вычислите: а) угловое ускорение; б) тангенциальное ускорение; в) центростремительное ускорение молота непосредственно перед броском; г) результирующую силу, действующую на молот со стороны атлета в момент броска; д) угол, который эта сила составляет с радиусом окружности, проведенной через точку, в которой молот был брошен.

Задача 9.31. Найдите максимальное расстояние, которое может пролететь молот, если удерживающее усилие спортсмена перед моментом броска в n раз превышает силу тяжести, действующую на молот. Расстояние вдоль троса от оси вращения до ядра равно l . Сопротивлением воздуха и начальной траекторией ядра пренебречь.

Задача 9.32. Спортсмен посылает молот на расстояние 70 м по траектории, обеспечивающей максимальную дальность броска. Какая сила действует на руки спортсмена в момент броска? Масса молота 5 кг. Спортсмен разгоняет молот, вращая его по окружности радиусом 1,5 м.

Задача 9.33. Велосипедист, чья масса вместе с велосипедом составляет 100 кг, движется по треку с радиусом закругления 70 м с постоянной скоростью. Чему равна сила, действующая на велосипедиста? Как она направлена?

Задача 9.34. Дорога имеет вираж с углом наклона к горизонту α и радиусом закругления r . Какую скорость должен иметь на вираже велосипедист, чтобы не упасть? Трением колес о вираж пренебречь.

Задача 9.35. Один из цирковых аттракционов состоит в езде мотоциклистов по вертикальной стене цилиндрического строения. Определите наименьшую скорость, с которой должен ехать по вертикальной стене мотоциклист, если диаметр строения 16 м, центр тяжести мотоцикла и человека отстоит на 1 м от места соприкосновения колес со стеной, коэффициент трения шин о стену равен 0,4. Под каким углом к горизонту наклонен мотоциклист, если его скорость равна 20 м/с?

Задача 9.36. В момент начала забега спринтер массой 60 кг толкает стартовую колодку с силой 950 Н, направленной под углом 20° к горизонту. Определите: а) горизонтальную составляющую ускорения спринтера; б) скорость, с которой спринтер оторвется от колодки, если сила действовала в течение 0,32 с.

Задача 9.37. Велосипедист взбирается по крутому склону холма со скоростью 5 км/ч и достигает вершины. Затем он спускается по склону холма с углом наклона 45° и длиной 50 м. Чему равна скорость велосипедиста у подножия холма? Трением пренебречь.

Задача 9.38. Лыжник спускается с холма, составляющего с горизонтом угол α . Чему равен коэффициент трения лыж о снег, если лыжник спускается с постоянной скоростью?

Задача 9.39. Лыжник начал спуск по склону (угол наклона $\alpha = 30^\circ$). Считая, что коэффициент трения скольжения равен 0,1, вычислите: а) ускорение лыжника; б) скорость, которую он приобретет через 6 с.

Задача 9.40. Велосипедист массой 70 кг (вместе с велосипедом) может катиться с холма, угол наклона которого к горизонту равен $6,2^\circ$, со скоростью

7 км/ч. Какую силу (в среднем) должен развить велосипедист, чтобы подниматься на холм с той же скоростью?

Задача 9.41. Через неподвижный блок перекинут канат, к одному концу которого прикреплен груз, а другой натягивает спортсмен своим весом. Массы груза и спортсмена одинаковы. Что произойдет, если спортсмен начнет подниматься вверх по канату?

Третий Закон Ньютона Справедливость третьего закона Ньютона можно показать с помощью многочисленных демонстрационных опытов. Рассмотрим некоторые из них.

Два человека, стоящие на легкоподвижных тележках на расстоянии друг от друга, одновременно начинают «выбирать» веревку, которую они держат за концы в натянутом состоянии. Измеряя перемещения (точнее, их модули), которые совершат тележки с людьми до встречи, можно убедиться, что они обратно пропорциональны массам стоящих на тележках людей. Иначе говоря,

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Но так как $s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}$, $s_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2}$, а $t_1 = t_2$, то $\frac{s_1}{s_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$, или

$a_1 m_1 = a_2 m_2$. Окончательно имеем $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ (здесь мы учли, что силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 направлены в противоположные стороны).

Тема «Третий закон Ньютона» богата ситуациями, которые можно использовать как проблемные.

Задача 9.42. Человек тянет санки с некоторой силой. Согласно третьему закону Ньютона санки действуют на человека с равной по модулю и противоположно направленной силой. Почему санки движутся: ведь сумма этих сил равна нулю?

Задача 9.43. Проводятся соревнования по перетягиванию каната. Силы, приложенные со стороны обеих команд к канату, равны по модулю и противоположно направлены. Почему же тогда бывают победители в этом виде соревнований?

Задача 9.44. При падении тело ускоряется по направлению к Земле. Это ускорение вызывается гравитационной силой, действующей на тело со стороны Земли. Согласно третьему закону Ньютона с равной по модулю и противоположно направленной силой и тело действует на Землю. Следовательно, Земля также должна двигаться к телу. Так ли это?

Задача 9.45. Ракета движется с постоянной скоростью. Когда включается двигатель, ракета начинает двигаться с ускорением. Объясните, почему это возможно: ведь вокруг ракеты нет предметов, которые могли бы действовать на нее с какими-либо силами.

Реализовать второе направление гуманитаризации содержания темы «Законы Ньютона», связанное с формированием гносеологического аспекта мировоззрения учащихся, можно, на наш взгляд, следующим образом.

В методической литературе глубоко и всесторонне рассмотрен вопрос об условиях и путях формирования у учащихся представлений о процессе научного познания (см., например, [1, 19]). На наш взгляд, с целью гуманитаризации процесса изучения физики целесообразнее при рассмотрении этого материала обратить особое внимание учащихся на антропоцентрический характер процесса познания.

Человеческое познание антропоцентрично по целям, субъекту и методам.

Действительно, человек изучает окружающий мир для того, чтобы приспособить его к себе, сделать существование в нем безопасным для себя.

Процесс человеческого познания имеет особенности и специфику (к ним относятся, в частности, субъективный характер чувственного познания, модельный характер представлений и т.д. и т.п.). Очевидно, процесс познания других разумных существ, эволюционирующих в других условиях, будет отличаться от человеческого. Правда, мы можем пока только догадываться об этом, поскольку нам до сих пор не с кем было себя сравнить.

Структура и особенности человеческого сознания определили то, как осуществляется процесс познания, какие методы и приемы использует человек для изучения окружающего мира.

Как реально осуществляется процесс человеческого познания, можно проследить на примере создания физической теории.

Человек изучает какое-то явление природы. Выделяя из всего многообразия связей и сторон этого явления то, что его больше всего интересует, он создает в сознании идеальный объект. Идеальный объект можно считать некоей моделью, наблюдая за которой изучают качественные и количественные закономерности ее поведения. Количественный анализ требует особого способа описания процесса, вследствие чего человек вынужден вводить физические величины. Эксперименты с идеальным объектом, осуществляемые с целью получения количественных данных, позволяют обнаружить количественные взаимосвязи — физические законы. Физическая теория — совокупность законов. Совокупность физических теорий — физическая картина мира (ФКМ) [1, 48].

Все вышеизложенное можно изобразить в виде схемы: опытный факт → модельная гипотеза → физические величины, описывающие модель → основной закон, характеризующий поведение модели → следствия → опыты, подтверждающие следствия [1, 41].

§ 10. Закон всемирного тяготения

Гравитационное взаимодействие

Тяготение — самая великая сила природы. Тысячелетиями сетовал человек на эту силу. Она не позволяла строить башни многокилометровой высоты: тяжесть верхних этажей стремилась раздавить нижние. Чуть просчитывались инженеры — и с грохотом обрушивались мосты через широкие реки. Человек завидовал птицам, но лишь в мечтах взмывали в небо дедалы, икары и русские умельцы, мастерившие себе крылья из лебединых перьев и воска.

Между тем человек и не подозревал, скольким он этой силе обязан.

Не будь ее, человек лишился бы дома. Именно она соединяет воедино горные породы, собирает, образуя моря и океаны, воды планеты, удерживает у Земли ее атмосферу. Но и этого мало. Не будь этой силы, Земля и другие тела нашей планетной системы — от мельчайшего астероида до гигантского Юпитера — изменили бы свое движение по орбитам и понеслись в разные стороны в черное пространство Вселенной. А сама Вселенная? И она не устояла бы без силы всемирного тяготения: распались бы галактики, разрушилась бы ее структура...

На языке современной науки закон всемирного тяготения постулирует введение одного из четырех взаимодействий — гравитационного.

Задача 10.1. Оцените силу гравитационного взаимодействия двух людей, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга.

Задача 10.2. Чему равна сила гравитационного взаимодействия Земли и Луны, Земли и Солнца, нашей Галактики и ее спутника — Большого Магелланова Облака? Примите, что массы двух последних объектов относятся как 250:14.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что сила тяготения очень слабо проявляет себя для объектов микро- и макромира. Но она достигает огромных значений

для тел больших масс, значительно удаленных друг от друга, т.е. для космических объектов.

Задача 10.3. Какой толщины стальной трос могла бы разорвать сила, с которой взаимодействуют Земля и Солнце?

Задача 10.4. Определите силу, действующую на Луну вследствие гравитационного притяжения как Земли, так и Солнца, считая, что каждое из тел действует на Луну с силой, направленной перпендикулярно друг другу.

Задача 10.5. На каком расстоянии от Земли результирующая гравитационная сила, действующая на космический корабль, летящий от Земли к Луне, равна нулю? (В этой точке силы притяжения Земли и Луны равны по модулю и противоположно направлены.)

Задача 10.6. Рассчитайте центростремительное ускорение Земли, движущейся по орбите вокруг Солнца, и суммарную силу, действующую на Землю. Какие небесные тела создают эти силы? Считайте, что орбита Земли представляет собой окружность радиусом $1,49 \cdot 10^{11}$ м.

Задача 10.7. Во сколько раз сила гравитационного тяготения, действующая на космический корабль, движущийся по круговой орбите, удаленной от центра Земли на расстояние, равное двум радиусам Земли, меньше, чем сила тяготения, действующая на корабль на поверхности Земли?

Задача 10.8. Две планеты обращаются вокруг Солнца по орбитам, принимаемым за круговые радиусами $1,50 \cdot 10^8$ км (Земля) и $1,08 \cdot 10^8$ км (Венера) соответственно. Найдите отношение их линейных скоростей.

Задача 10.9. Как изменилась бы орбита Луны, если бы масса Земли удвоилась?

Задача 10.10. Как изменился бы период обращения Луны вокруг Земли, если бы масса Луны удвоилась?

Задача 10.11. Предположим, что наша Галактика состоит из 10^{11} звезд со средней массой 10^{30} кг каждая. На краю Галактики звезда движется по круговой орбите радиусом 50 тыс. св. лет. Каковы ее скорость и период обращения? Считайте, что звезда ведет себя так, как если бы вся масса Галактики была сосредоточена в ее центре.

Задача 10.12. Докажите, что период обращения «нулевого» спутника (т.е. движущегося по круговой орбите около самой поверхности планеты, имеющей форму шара с плотностью ρ) зависит только от плотности этой планеты.

Задача 10.13. Пусть космический корабль «Викинг» движется по круговой орбите вокруг Марса на высоте 100 км. Чему равен период его обращения вокруг планеты? Радиус Марса $3,43 \cdot 10^6$ км, а его средняя плотность составляет примерно $4 \cdot 10^3$ кг/м³

Определение масс космических объектов Важным применением закона всемирного тяготения является определение с его помощью масс космических объектов.

Задача 10.14. Предложите способ определения массы Солнца.

Р е ш е н и е

Поскольку $\frac{4\pi^2 mR}{T^2} = \frac{GmM}{R^2}$, имеем

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{T^2 G}.$$

Подставив числовые данные, получим:

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

Задача 10.15. Предложите способ, как «взвесить» Землю.

Р е ш е н и е

Поскольку $mg = \frac{GmM}{R^2}$, то

$$M = \frac{9,8 \cdot (6,38 \cdot 10^6)^2 \text{кг}}{6,67 \cdot 10^{-11}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

Задача 10.16. Оцените массу нашей Галактики.

Р е ш е н и е

Про нашу Галактику известно, что ее диаметр равен $3 \cdot 10^4$ пк, или 10^{21} м. Толщина Галактики в центральной части около 4 пк. Приняв скорость Солнца относительно центра Галактики равной $3 \cdot 10^5$ м/с, а кратчайшее расстояние от центра Галактики до Солнца — $3 \cdot 10^{20}$ м, получим

$$M = \frac{v^2 r}{G}; \quad M = \frac{(3 \cdot 10^5)^2 \cdot 3 \cdot 10^{20} \text{кг}}{6,67 \cdot 10^{-11}} = 4 \cdot 10^{41} \text{ кг.}$$

Задача 10.17. Один из спутников Юпитера, открытый Галилеем, имеет период обращения $1,44 \cdot 10^6$ с и отстоит от Юпитера в среднем на расстоянии $1,9 \cdot 10^9$ м. Используя эти данные, вычислите массу Юпитера.

Масса космического объекта очень важный его параметр, во многом определяющий пути эволюции космических тел.

Что образуется из протооблака: звезда или планета, — зависит от его первоначальной массы. Массы звезд заключены в пределах от 0,1 до 50 масс Солнца. Теоретический предел, вытекающий из современных представлений о химическом составе и внутреннем строении звезд, равен 60 массам Солнца [33, 351]. От массы звезды зависит температура ее внутренних слоев, а значит, и механизм ядерных реакций в ее недрах, время жизни, будущее звезды.

Планеты, пригодные для жизни, характеризуются массами от 0,4 до 2,35 массы Земли. Массой планеты определяются

значение ускорения свободного падения g на ее поверхности, состав и давление атмосферы и т.д.

Нестационарная Вселенная Тема «Закон всемирного тяготения» имеет очень интересные гуманитарные приложения. К ним, в частности, относятся вопросы о нестационарности нашей Вселенной и вопрос о гравитационной постоянной.

Закон всемирного тяготения позволяет не только рассчитать силу взаимодействия двух тел, но из него, как оказалось, следует основополагающий принцип современной космологии — нестационарность нашего мира.

Действительно, два объекта, взаимодействуя, испытывают ускорение, в соответствии с законом всемирного тяготения равное $a = \frac{GM}{R}$.

Факт, что любые две галактики, находящиеся в однородной Вселенной на расстоянии R друг от друга, испытывают относительное ускорение \vec{a} , определяемое вышеприведенной формулой, и означает, что Вселенная должна быть нестационарной (изменяться во времени). Действительно, если мы представим, что в некоторый момент времени галактики покоятся и плотность вещества во Вселенной не меняется, то в следующий момент галактики получат скорость под действием взаимного тяготения всего вещества, сообщившего им ускорение \vec{a} . Из этого следует необходимость ускоренного движения галактик — сближение или удаление, изменение радиуса взаимодействия R со временем, изменение плотности вещества со временем.

Вселенная должна быть нестационарной, ибо в ней действует тяготение,— таков основной вывод из всего рассмотренного выше [20, 17].

Конечно, Ньютон не предполагал такого вывода из своей теории. К нему ученые пришли гораздо позже, уже в нашем веке. Разбегание галактик — экспериментальный факт. Известны многочисленные его подтверждения методами астрофизики. Все существующие сейчас теории эволюции Вселенной постулируют ее нестационарность как данность. В них утверждается, что очень давно, в момент времени $t = 0$, все вещество нашей Вселенной было сжато в точку и обладало колоссальной плотностью. После Большого Взрыва оно начало расширяться с огромными скоростями во всех направлениях, и это расширение длится по сегодняшний день.

Гравитационная постоянная Гравитационная постоянная G — коэффициент пропорциональности, входящий в закон всемирного тяготения. Вопрос об определении ее значения и о ее постоянстве во времени, т.е. вопрос об ее универсальности, предоставляет большие возможности для формирования у учащихся правильного взгляда на мир.

Экспериментально G можно определить из закона всемирного тяготения, если удастся каким-либо способом определить другие входящие в формулу величины.

Для определения массы можно было бы использовать второй закон Ньютона, если бы удалось доказать, что гравитационная масса, выступающая в качестве источника гравитационного взаимодействия в законе тяготения, эквивалентна массе тела (инертной массе), сущность которой проявляется во втором законе механики Ньютона.

Важность последнего утверждения, известного как принцип эквивалентности, осознавали и Ньютон, и Эйнштейн. Многочисленные опыты по проверке принципа эквивалентности, проводимые учеными разных стран, подтвердили его справедливость.

Однако существуют теории гравитации, в которых предполагается, что G меняется с течением времени. Посмотрим, к каким последствиям это могло бы привести.

Не вдаваясь в сложные подробности, можно утверждать, по крайней мере, следующее. Если бы в результате каких-либо процессов G уменьшилась, вместе с ней уменьшилась бы и сила гравитационного взаимодействия, отвечающая за гравитационное сжатие масс (см. § 19). Последнее означало бы, что звезды не могли бы настолько нагреться, чтобы в них начались ядерные реакции.

Наоборот, в случае увеличения G по сравнению с известным сейчас значением ядерные реакции протекали бы так быстро, а время жизни звезд было бы так мало, что не успела бы составиться комбинация молекул, положившая начало жизни [17, 32].

Задача 10.18. К каким последствиям, на ваш взгляд, для жизни человека привело бы изменение величины G ?

Обсуждение вопроса о гравитационной постоянной можно использовать для ознакомления учащихся с антропным принципом. Логика изложения вопроса может быть следующей.

Гравитационная постоянная, а также некоторые другие мировые константы, такие, как постоянная Планка h , ско-

рость света c , заряд e и масса электрона m , обладают числовыми значениями, представляющими интерес только в той системе единиц, в которой они рассматриваются. Из них можно, пользуясь теорией размерностей, составить новые безразмерные величины, которые будут одинаковыми уже для всех систем.

Задача 10.19. Вычислите безразмерную постоянную гравитационного взаимодействия

$$\alpha_g = \frac{2\pi G m_p^2}{hc}, \text{ где } m_p \text{ — масса протона.}$$

Р е ш е н и е

$$\alpha_g = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} (1,67 \cdot 10^{-27})^2 \cdot 2\pi}{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 5 \cdot 10^{-39}.$$

§ 11. Сила тяжести. Вес. Невесомость

Сила тяжести Силой тяжести называется сила, с которой любое тело притягивается Землей. Если в законе всемирного тяготения комбинацию констант обозначить $g = \frac{GM}{R^2}$ и назвать ускорением свободного падения, то сила тяжести $F = mg$.

Ускорение свободного падения для всех точек на поверхности Земли постоянно и равно $9,82 \text{ м/с}^2$.

Задача 11.1. Во сколько раз ускорение свободного падения на самой высокой вершине мира — Эвересте (8848 м) меньше, чем на уровне моря?

Задача 11.2. Рассчитайте силу тяжести, действующую на космический корабль массой 850 кг, находящийся на высоте 12 800 м над поверхностью Земли.

Задача 11.3. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте над поверхностью Земли, равной двум радиусам Земли.

Задача 11.4. На какой высоте над поверхностью Земли сила тяжести, действующая на ракету, вдвое меньше, чем на поверхности Земли?

Ускорение свободного падения — важная характеристика космического объекта (см. § 6), во многом определяющая условия для возникновения жизни на планете.

Задача 11.5. Как зависит ускорение свободного падения на поверхности небесного тела от плотности и радиуса планеты? Примите, что тело имеет форму шара с равномерно распределенной плотностью.

Задача 11.6. Радиус небесного тела больше радиуса Земли в m раз, а плотность — в n раз. Найдите ускорение свободного падения на поверхности этого тела.

Задача 11.7. Как изменилась бы сила тяжести, действующая на тела на Земле, если бы диаметр Земли уменьшился вдвое, а средняя плотность осталась такой же?

Задача 11.8. Предположим, что масса Земли удвоилась, а плотность и сферическая форма сохранились. Как изменится сила тяжести, действующая на тела, расположенные на ее поверхности?

Задача 11.9. Пользуясь данными, приведенными в таблице 2.1, вычислите ускорение свободного падения на поверхностях тел Солнечной системы.

Таблица 2.1

Физические характеристики тел Солнечной системы

Тело	Средняя плотность $10^3, \text{ кг/м}^3$	Радиус, км	$g, \text{ м/с}^2$
Солнце	1,41	696 000	
Юпитер	1,34	70 850	
Сатурн	0,71	60 100	
Уран	1,47	24 600	
Нептун	2,27	23 500	
Марс	4,0	3395	
Земля	5,52	6378	
Венера	5,22	6052	
Меркурий	5,59	2430	
Луна	3,34	1700	

Задача 11.10. Пользуясь данными таблицы 2.2, вычислите ускорение свободного падения на поверхностях некоторых космических объектов.

Задача 11.11. Выведите формулу для массы планеты в зависимости от ее радиуса, ускорения свободного падения на ее поверхности и гравитационной постоянной G .

Задача 11.12. Вычислите значение g на планете с такой же массой, как у Земли, но с периодом обращения, равным 3 ч.

Задача 11.13. Подлетев к неизвестной планете, космонавты придали своему кораблю горизонтальную скорость 11 км/с. Эта скорость обеспечила полет корабля по круговой орбите радиусом 9100 км. Каково ускорение свободного падения на поверхности планеты, если ее радиус 8900 км?

**Физические характеристики некоторых
космических объектов**

Объект	Масса, в массах Солнца	Радиус, в радиусах Солнца	$g, \text{ м/с}^2$
Красный сверхгигант	15	400	
Белый карлик	0,8	0,01	
Нейтронная звезда	2	20 км	
Черная дыра	5	15 км	
Галактика	$2 \cdot 10^{11}$	10 кпк	

Задача 11.14. Какая сила тяжести действует на космонавта массой 75 кг: а) на Луне; б) на Земле; в) на Марсе; г) при его движении с постоянной скоростью в космическом пространстве?

Вес тела Весом называется сила, с которой тело, находящееся в поле силы тяжести, действует на подставку (или подвес), относительно которой тело покоится. Хотя вес возникает в результате притяжения тела Землей, он не всегда равен силе тяжести (по численному значению).

Физиологическое ощущение веса связано с тем, насколько трудно поднять руку или голову: давление внутренних органов человека на скелет пропорционально весу человека. В физиологии вес определяют как величину, пропорциональную силе, действующей со стороны жидкости в полукружных каналах внутреннего уха человека на нервные окончания [4, 76].

Задача 11.15. Придумайте способы измерения массы и веса тела человека, а также силы тяжести, действующей на него. Что мы измеряем при помощи рычажных весов?

Задача 11.16. Каковы ваша масса (в килограммах), вес (в ньютонах)?

Задача 11.17. В каком месте Земли тело обладает наибольшим весом? наименьшим весом? Изменяется ли масса тела от места к месту?

Задача 11.18. Сколько весит человек массой 70 кг на Земле? Сколько он будет весить на Луне? Какова масса этого человека на Луне?

Задача 11.19. Вес тела на Марсе в 2,7 раза меньше, чем на Земле. Какими весами космонавт может обнаружить уменьшение веса тела на Марсе?

Задача 11.20. Во сколько раз уменьшится вес космонавта на Луне по сравнению с его весом на Земле? Используйте соотношения $\frac{M_{\text{Л}}}{M_{\text{З}}} = 0,0123$; $\frac{R_{\text{Л}}}{R_{\text{З}}} = 0,273$.

Силу тяжести, действующую на тело, и его вес можно считать равными в отсутствие ускорений, с которыми движутся тело и связанный с ним подвес. Если такое ускорение не равно нулю, вес тела может быть как меньше, так и больше силы тяжести.

Рассмотрим несколько задач на вычисление веса.

Задача 11.21. Лифт начинает двигаться из состояния покоя с ускорением 5 м/с^2 . Увеличится, уменьшится или останется неизменным вес пассажира? Поднимаясь ускоренно, лифт достигает скорости $9,8 \text{ м/с}$, а затем продолжает двигаться вверх с постоянной скоростью. Увеличится, уменьшится или не изменится по сравнению с весом в состоянии покоя вес пассажира?

Задача 11.22. Человек массой 60 кг находится в лифте, движущемся вверх с ускорением $a = 9,8 \text{ м/с}^2$. Чему равна сила, действующая на человека? Чему будет равна эта сила, если лифт будет двигаться вниз с тем же ускорением?

Задача 11.23. Пружинные весы при взвешивании женщины массой 55 кг , находящейся в лифте, показали в четырех случаях разный вес: а) 540 Н ; б) 720 Н ; в) 360 Н ; г) 0 Н . В каком направлении и с каким ускорением двигался лифт в каждом из этих случаев?

Задача 11.24. Человек массой m стоит в неподвижном лифте массой M , уравновешенном противовесом массой $m + M$. Человек подпрыгивает в лифте с таким же усилием, при котором в условиях прыжка на поверхности Земли его центр масс переместился бы вверх на высоту h . На сколько переместится его центр масс относительно пола лифта? Массами тросов и блоков в механизме лифта и трением пренебречь.

Задача 11.25. На 50-м этаже 100-этажного здания в лифт входит человек весом 600 Н и становится на весы. Когда лифт начинает двигаться, человек замечает, что в течение 5 с весы показывают 720 Н , а затем в течение 20 с — 600 Н , следующие 5 с — 480 Н , после чего лифт останавливается на одном из концов шахты. Где находится лифт: вверху или внизу? Какова высота здания?

Чтобы учащимся было интересно решать приведенные выше задачи «с лифтом», можно предложить им задание практического характера.

Задача 11.26. Определите с помощью бытовых весов, изменится ли ваш вес при движении лифта. С каким ускорением опускаются и поднимаются лифты в обычных многоэтажных зданиях?

Невесомость Состояние, при котором вес тела равен нулю, но сила тяжести продолжает на тело действовать, называется невесомостью.

Необходимо отметить, что потеря веса не потеря массы. Инертность тел при невесомости сохраняется, и последствия столкновений при невесомости могут быть такими же серьезными, как и в условиях на поверхности Земли.

Человек в своей повседневной жизни часто встречается с состоянием невесомости: при прыжках и беге, при движении по криволинейным траекториям, плоскости которых перпендикулярны поверхности Земли.

На практике в земных условиях состояние невесомости наблюдают: а) в башнях невесомости (высоких сооружениях, внутри которых свободно падают контейнеры с исследовательской аппаратурой); б) в самолетах, движущихся по особым траекториям («горкам Кеплера»); в) с помощью ракет-зондов, которые поднимаются в разреженные слои атмосферы, после чего их двигатели отключаются, и они переходят в режим свободного падения.

Задача 11.27. Сколько времени находится в состоянии невесомости прыгун в воду? Принять высоту вышки равной 5 м.

Задача 11.28. Сколько времени находится в состоянии невесомости прыгун в длину (см. задачу 7.10)?

Задача 11.29. С какой высоты должен «свободно падать» самолет, чтобы его пассажиры ощущали состояние невесомости в течение 10 мин?

Задача 11.30. Самолет движется вверх по дуге радиусом R с постоянной скоростью 300 км/ч. При каком радиусе пассажиры испытают состояние невесомости?

Задача 11.31. Какую минимальную скорость должен иметь поезд на роликах в аттракционе «Американские горки», чтобы пассажиры из него не выпали, когда поезд находится в верхней части колес, имеющей вид вертикальной окружности?

Еще один способ получения «невесомости» в земных условиях — иммерсия, т.е. погружение тела в жидкость с плотностью, равной плотности тела. В этом случае вес тела уравновешивается архимедовой силой, тело становится «невесомым», приобретая способность свободно перемещаться в любом направлении. Именно таким образом тренируются космонавты в Центре подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина для работы на космических станциях. Необходимо, однако, помнить, что «гидроневесомость» отличается от подлинной невесомости прежде всего наличием сопротивления, которое оказывает телу человека водная среда.

Своеобразной моделью состояния невесомости может служить определенное положение тела человека в постели, при котором верхняя часть тела располагается ниже горизонтальной линии,— так называемое антиортостатическое положение. В специально проводимых опытах угол наклона тела в положении «вниз головой» менялся от -4 до -30° . При этом оказалось, что, чем больше наклон, тем сильнее проявляется действие «земной невесомости». Исследователи пришли к выводу, что 15-минутное пребывание человека под углом -30° можно использовать как тест на выносливость к невесомости.

Состояние невесомости, моделируемое на Земле, обычно длится недолго: несколько секунд в башнях невесомости, около 2 мин при полете на самолете, несколько десятков минут в высотных ракетах. Сколько угодно может длиться состояние невесомости в космическом корабле, поскольку его движение по орбите представляет собой непрерывное свободное падение.

Воздействие невесомости начинает проявляться у организмов, имеющих массу, начиная с нескольких граммов. Особенно заметно невесомость влияет на человека.

Чем же отвечает организм человека на состояние невесомости? В области сознания — более или менее выраженной дезориентацией в пространстве. У человека возникают иллюзии положения и перемещения, связанные с нарушением сложной деятельности вестибулярного аппарата, зрения, кожной и мышечной чувствительности. Человек начинает испытывать такое ощущение, как будто он падает или совершает полет вниз головой.

Другая группа реакций человеческого организма связана с тем, что в невесомости кровь также делается невесомой. В результате происходит перераспределение массы циркулирующей крови: из нижней части тела она устремляется в верхнюю. Возрастающий поток крови к сердцу воспринимается нервными окончаниями, которые контролируют объем и давление циркулирующей крови, как аварийная ситуация. Запускаются механизмы циркуляции, они приводят к уменьшению объема циркулирующей крови; почки выделяют повышенное количество воды. Одновременно уменьшается чувство жажды, устанавливается отрицательный водный баланс. Через несколько недель полета могут возникнуть явления, которые медики называют детренированностью сердечно-сосудистой системы.

Еще одно действие невесомости проявляется в том, что кости и мышцы лишаются весовой нагрузки. Весь характер двигательной активности приобретает новые черты: человек не ходит, а плавает в космическом корабле. Для перемещения как внутри корабля, так и вне его большие преимущества приобретают руки, а не ноги. Мышцы начинают частично атрофироваться, меняется координация движений. Для того чтобы не допустить детренированности, космонавты должны проводить специальные комплексы тренировок.

Искусственная гравитация Хотя в целом человек может удовлетворительно адаптироваться к длительному воздействию невесомости, трудности, связанные с перемещением, работой, действиями с инструментами, делают желательным наличие в жилых отсеках космических станций хотя бы небольшого поля тяготения. В связи с этим при разработках проектов «космических городов» считают необходимым создавать в них искусственное гравитационное поле.

Задача 11.32. Предложите способ создания искусственной гравитации.

Самый простой способ создания искусственного поля тяготения — сообщить космической станции вращательное движение. При этом обитателями, живущими на внешней стороне оболочки станции, сила $\frac{mv^2}{R}$ будет восприниматься как нормальное земное тяготение. При выборе формы и размеров космической станции следует учитывать направление искусственной силы тяжести, факт ее обратно пропорциональной зависимости от расстояния до оси вращения и прямую зависимость от квадрата угловой скорости вращения. Рациональное сочетание этих параметров позволяет рассчитывать компактные сооружения, характеризующиеся достаточно большим значением центростремительного ускорения. Следует, однако, заметить, что существуют некоторые ограничения на скорость вращения станций. Согласно оценкам медиков при значениях частоты вращения, больших 5 мин^{-1} , у человека при поворотах головы начинаются неприятные ощущения в связи с расстройством вестибулярного аппарата.

Задача 11.33. С какой частотой (в оборотах в сутки) должна вращаться космическая станция в форме тора диаметром 1,6 км, чтобы на ней создавалась искусственная сила тяжести, равная силе тяжести на Земле?

Задача 11.34. Какого размера должна быть космическая станция, делающая 3 оборота в минуту, чтобы искусственная сила тяжести составила 0,5 земной?

Хотя размеры реально существующих станций невелики по сравнению с рассчитанными, разработаны проекты космических станций для поселения больших количеств людей. Например, известен проект «стенфордского тора» — возможного поселения для 10 тыс. человек, движущегося по орбите между Землей и Луной. Проект представляет собой вращающийся тор диаметром 1,5 км. Над тором должно располагаться гигантское зеркало для отражения солнечного света в жилые помещения [3, 347].

Существует идея, высказанная американским физиком Д.Криссуэллом, о проведении Олимпийских игр 2008 года на орбитальной станции. На станции должны разместиться 10 тыс. человек. Предполагается, что вынесение спортивных соревнований на орбиту привнесет некоторое разнообразие и увеличит интерес к соревнованиям и что появятся новые виды спорта. И, хотя стоимость создания такого «космического стадиона» оценивается в 1,5 триллиона долларов, что в три раза больше суммы, затраченной человечеством на космические исследования, многие поддерживают эту идею, считая, что лучше так тратить деньги, чем «развешивать» на околоземных орбитах боевые станции СОИ.

Можно существенно удешевить станцию, соединив две вращающиеся части станции тросом достаточной длины.

Задача 11.35. Космическая станция состоит из двух отсеков, соединенных тросом длиной 100 м. Сколько оборотов в секунду должна совершать станция для поддержания у обитателей нормального веса?

С помощью вращающейся с большой скоростью кабины (центрифуги) можно создавать значительные перегрузки. С центрифугами связаны тренировки летчиков и космонавтов на выносливость к перегрузкам.

Задача 11.36. С какой частотой должна вращаться центрифуга, чтобы находящийся в ней на расстоянии 2,3 м от оси вращения человек испытал ускорение $10g$?

Задача 11.37. Какие перегрузки возникают в центрифуге, вращающейся вокруг вертикальной оси, при $R = 2$ м, $n = 0,34$ с⁻¹?

Задача 11.38. Центрифуга, используемая для тренировки космонавтов, совершает $n = 0,5$ об/с при $R = 4$ м. Найдите угол α между вертикалью и направлением отвеса в месте расположения космонавта. Какие перегрузки при этом возникают?

Задача 11.39. В нижней точке «мертвой петли» реактивный самолет движется со скоростью 1200 км/ч. Какую перегрузку испытает летчик, если диаметр петли 1 км?

Задача 11.40. Известный аттракцион «Ракета» представляет собой огромный маятник, который качается со все возрастающей амплитудой до тех пор, пока не достигнет перевернутого положения. С какой силой пассажир действует на маятник в нижней точке?

Задача 11.41. В аттракционе «Ракета» две кабины, разделенные штангой длиной 20 м, равномерно вращаются со скоростью v в вертикальной плоскости. Какой должна быть эта скорость, чтобы пассажиры оказались в состоянии невесомости в верхней точке траектории? С какой силой пассажир действует на дно кабины в нижней точке траектории? Чему равна эта сила, если ракета начала движение, когда штанга находилась в горизонтальном положении?

Вращение Земли и вес тела Изменение веса происходит не только при ускоренном движении тела и опоры. Можно утверждать, что вообще вес на поверхности Земли — понятие относительное. Изменение веса при перемещении вдоль поверхности Земли происходит в результате действия многих причин, среди которых вращение Земли вокруг оси, изменение формы Земли от шара к геоиду и др.

Задача 11.42. Принимая, что Земля имеет сферическую форму, определите влияние вращения Земли на силу веса тела, находящегося: а) на полюсе; б) на экваторе; в) на широте 45° .

Задача 11.43. Ньютон сумел рассчитать форму Земли, которую она должна принять за счет перетекания вещества от полюса к экватору. Насколько отличаются расстояния от уровня Мирового океана до центра Земли на полюсе и экваторе?

Р е ш е н и е

Если вслед за Ньютоном использовать гидростатическую модель распределения давлений внутри поверхности Земли, то можно получить, что давления в центре Земли, создаваемые «столбами вещества» от полюса до центра планеты, имеющими высоту $R_3 - x$, и от экватора до центра, имеющими высоту r , должны быть равны по закону Паскаля. Учитывая, что ускорение свободного падения на полюсе равно g , а на экваторе $g - \omega^2 R_3$, получим

$$\rho g_1 h_1 = \rho g_2 h_2;$$

$$\rho g(R_3 - x) \approx \rho(g - \omega^2 R_3)R_3,$$

$$\text{откуда } x \approx \frac{R_3^2 \omega^2}{g} = \frac{R_3^2 \cdot 4\pi^2}{g T^2}; x \approx 22 \text{ км.}$$

Задача 11.44. На сколько меньше ускорение свободного падения на экваторе по сравнению с ускорением свободного падения на полюсе, если радиус Земли в этих точках отличается на 21 км?

Задача 11.45. На какую часть уменьшается значение ускорения свободного падения на экваторе по сравнению с его значением на полюсе вследствие разницы в значениях полярного и экваториального радиусов?

Анализ рассмотренных выше задач показывает, что вклад в уменьшение ускорения свободного падения на экваторе за счет собственного вращения Земли составляет 0,34%, а вклад в его уменьшение за счет отличия формы планеты от сферической — 0,18%. Суммарное изменение составляет 0,52%, или $\Delta g = 0,052 \text{ м/с}^2$. Диаграмма, показывающая ход этого изменения в зависимости от широты места наблюдения, приведена на рисунке 2.3.

Анализ решения задачи 11.42 может привести на мысль, что при большой скорости вращения Земли величина $\frac{v^2}{R}$ может оказаться равной g . Это будет означать, что тела на экваторе оказались в состоянии невесомости.

Задача 11.46. Какой продолжительности были бы сутки на Земле, если бы тела на экваторе не имели веса?

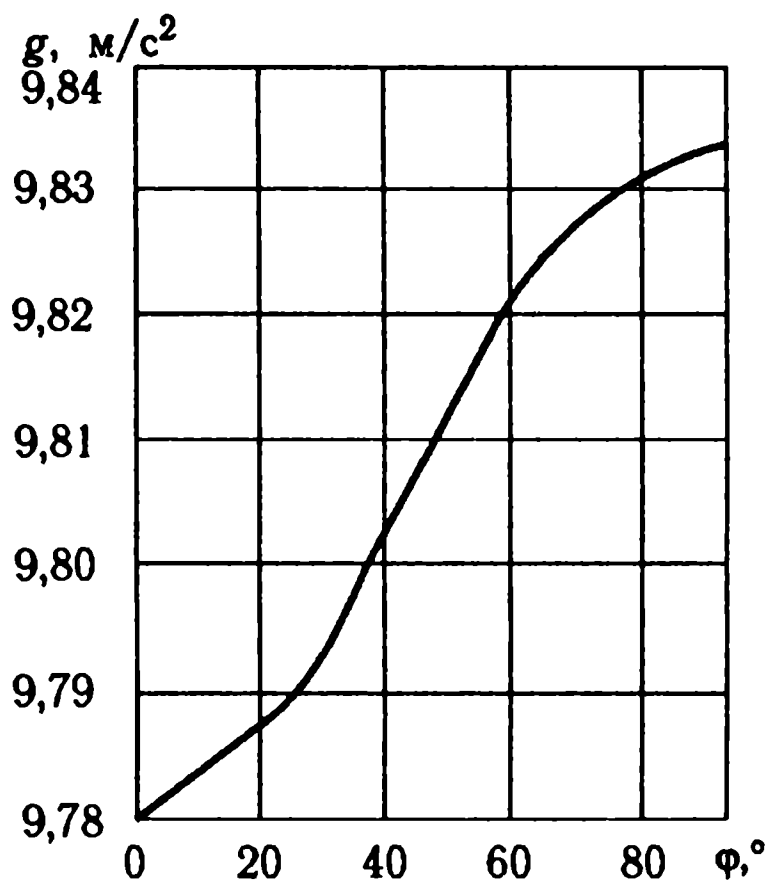


Рис. 2.3

Задача 11.47. Во сколько раз должна возрасти скорость вращения Земли, чтобы свободные предметы на экваторе могли покинуть ее поверхность и обращаться вокруг нее по круговой орбите?

При обсуждении последней задачи полезно обратить внимание учащихся на то, что Земля (или любая другая планета) сохраняет свою форму, а не разлетается в космическую пыль и обломки потому, что часть силы гравитационного притяжения идет на создание центростремительного ускорения.

Задача 11.48. Какова продолжительность суток на планете, средняя плотность которой $5 \cdot 10^3$ кг/м³, если на экваторе планеты тела невесомы?

В связи с обсуждением последних задач можно рассмотреть еще один интересный аспект данной темы.

Сила тяготения не только определяет условия жизни живых существ на поверхности планеты, но и формирует ее облик. Сила тяжести — центральная сила, поэтому образующиеся под ее действием звезды и планеты имеют форму, близкую к сфере — телу с наименьшей площадью поверхности при заданном объеме.

Сила тяжести играет также важную роль в формировании рельефа небесного тела. Планеты с маленьким значением g должны иметь более резкие очертания рельефа, чем планеты с большим значением g , так как, чем больше сила тяжести, тем чаще должны происходить обвалы горных пород, оползневые явления на склонах каньонов.

Поверхности многих планет и спутников, как теперь хорошо известно, покрыты многочисленными кратерами ударного происхождения. При прочих равных условиях (размер падающих метеоритов, характер грунта) диаметры кратеров должны быть больше на планете с большим значением g . Например, средние диаметры кратеров на Меркурии больше средних диаметров лунных кратеров, поскольку на нем ускорение свободного падения в два раза больше, чем на Луне.

Существует и косвенное влияние силы тяготения на формирование внешнего облика планеты. На планете с большой разреженностью атмосферы в меньшей степени происходят эрозивные процессы, лучше сохраняются различные образования на поверхности. Отсутствие атмосферы позволяет метеоритам проникать до самой поверхности планеты, что формирует весьма специфический ее рельеф.

§ 12. Сила упругости.

Историю жизни на нашей планете, по мнению некоторых ученых, можно трактовать как историю активного преодоления силы тяжести — постоянно действующего физического фактора. На первом этапе возникновения жизни эта задача решалась довольно просто: жизнь зародилась в воде, где действие силы тяжести компенсируется действием архимедовой силы. Впервые отчетливо проблема борьбы с гравитацией встала перед живыми организмами при выходе их из моря на сушу. И второй раз — при переходе предка человека к прямохождению.

Прямохождение и опорно-двигательная система человека

С точки зрения историко-эволюционного процесса прямохождение, безусловно, было перспективным видом передвижения. Оно способствовало увеличению обзора местности, создавало потенциальную возможность взять что-либо в руки: пищу или орудие.

Однако человеку пришлось дорого заплатить за освобождение своих передних конечностей, за возможность трудиться в большей степени, чем любые живые существа до него. Ходьба в вертикальном положении обусловила ряд серьезных механических недостатков организма человека.

Это, прежде всего, возрастание нагрузок на позвоночник. При ходьбе на четвереньках позвоночник функционирует как свод моста или поперечная балка. При переходе к прямохождению он приобретает сходство с эластичной колонной, которая, многократно изгибаясь, амортизирует толчки при ходьбе и переносит вес туловища на поверхность стоп.

Для удержания мышц и обеспечения подвижности позвоночник человека приобрел сложную S-образную форму, для поддержания которой, в свою очередь, требуются большие дополнительные нагрузки на мышцы и связки тела.

Второе отрицательное следствие прямохождения касается дефектов соединительных тканей позвоночника. Позвоночник человека имеет сложное строение. Костная ткань собрана в нем в валики, по форме напоминающие маленькие барабаны, — позвонки. Между ними имеются межпозвонковые диски, состоящие из сравнительно мягкой соединительной ткани и позволяющие позвонкам совершать ограниченные взаимные смещения. Как правило, позвоночный столб подвергается общему сжатию как под действием веса тела, которое на нем держится, так и под действием натяжения различных мышц и сухожилий. У молодых людей материал

межпозвоночных дисков вязок и гибок и позволяет в случае необходимости выдерживать значительные растягивающие напряжения. Однако с годами материал дисков теряет эти качества и позвоночник становится все более похожим на колонну. Этим обстоятельством объясняются многочисленные заболевания позвоночника типа люмбаго или радикулита, возникающие у людей с потерявшими эластичность дисками при неправильном поднятии тяжестей. Чтобы уберечься от неприятностей, поднимая тяжести, необходимо стараться удерживать линию давлений возможно ближе к позвоночнику. Ну и, конечно, непрерывными тренировками стараться поддерживать организм в «спортивной форме».

Вообще говоря, описанные выше дегенеративные изменения позвоночного столба начинаются у человека уже с 18-летнего возраста, в связи с чем говорят, что позвоночник — наиболее рано стареющий орган тела человека.

Третьим следствием прямохождения является перемещение внутренних органов, приводящее к грыжевым выпячиваниям и выпадению внутренних органов. Сужение просвета между обеими половинками окостеневшего таза, с одной стороны, препятствует этой тенденции, но, с другой — приводит к затруднению родового акта у женщин. При наклонах или внезапном подъеме тяжелого предмета давление на дно таза возрастает в 5—10 раз [39, 31].

Более детально силы и рычаги, действующие в теле человека, мы рассмотрим в § 24, а сейчас продолжим знакомство с конструктивными особенностями человеческого организма.

Прямохождение резко повысило требования к механической прочности опорно-двигательной системы человека, которую составляют скелет и мышцы. Кроме обеспечения механической прочности, эта система создает основу для поддержания тела человека в пространстве, для перемещения его по поверхности планеты, для организации сложных движений.

Опорно-двигательная система человека должна противостоять достаточно большим нагрузкам, обусловленным, во-первых, действием собственного веса и, во-вторых, ускорениями и торможениями, которые всегда сопровождают любое движение. Особенно сильные, хотя и кратковременные, нагрузки наш скелет испытывает во время ударов, падений, прыжков, в аварийных ситуациях. Действующие при этом на скелет силы могут в 15—30 раз превосходить собственный вес человеческого тела.

Как все упругие материалы, вещество кости, мышц, сухожилий под действием нагрузки деформируется. Интересно, что на примере тела человека можно проследить все виды деформаций: сжатие, растяжение, изгиб и кручение. Так, кости позвоночного столба, таза и нижних конечностей в основном подвергаются сжатию и изгибу. Кости верхних конечностей, связки, мышцы, сухожилия — растяжению. Деформации кручения подвержены шея, туловище в пояснице, кисти рук.

Прочность биологических материалов Свойство материала сопротивляться разрушению и необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок называется прочностью. Количественной характеристикой этого свойства служит предел прочности. Значения пределов прочности некоторых природных и искусственных материалов приведены в таблице 2.3.

Из таблицы видно, что по прочности кость занимает достойное место среди характеристик других материалов. Предел прочности кости, например, на растяжение больше, чем у древесины (вдоль волокон), в 9 раз превосходит предел прочности свинца и почти равен пределу прочности алюминия и чугуна.

В чем причина высокой прочности биологических материалов тканей человеческого организма?

Высокая механическая прочность материала кости обусловлена ее особым строением. Кость состоит из органических волокон (коллагена), неорганических кристаллов гидроапатита $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$, связующих веществ и воды [6, 240]. Минеральные компоненты составляют примерно 70% массы кости, а белковые — примерно 20%. Реакция каждого из этих материалов на механическое напряжение различна и сравнительно невелика. И только в сочетании эти компоненты дают прочность, сравнимую с прочностью металлов.

Особого восхищения заслуживают прочностные характеристики зубов: зубы могут (при соответствующем уходе) разгрызть орехи в продолжение примерно 40 лет. Даже архисовременные зубные цементы несравненно слабее и более хрупки, чем материал зубов.

Упругие характеристики материалов

Материал	Модуль Юнга, 10^6 Па	Предел прочности на растяжение, 10^6 Па	Предел прочности на сжатие, 10^6 Па
Кость	15 000—23 000	110—130	120—170
Сухожилие	600	50—70	—
Хрящ	24	3	—
Ткань нервных стволов	80—120	12—15	—
Мышечная ткань	8—10	0,1—10	—
Стенка мочевого пузыря	—	0,2	—
Стенка желудка	—	0,4	—
Стенка кишечника	—	0,5	—
Стенка артерии	—	1,7	—
Волос	—	192	—
Зубы { эмаль	20 000	220	700
	дентин	—	200
Сталь	200 000	380—470	500
Бетон	30 000	48	20
Алюминий	70 000	100—200	—
Свинец	—	16	—
Чугун	115 000—150 000	170	220—250
Дерево (вдоль волокон)	10 000—12 000	40	35
Дерево (поперек волокон)	500—1000	—	10
Каучук	12	50	—

Конструктивной особенностью строения зубов является их многослойность. Верхний твердый и вязкий слой, называемый эмалью, и сердцевина зуба — дентин — содержат кристаллы гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, но в разном процентном отношении. В эмали они составляют 99% объема материала, очень плотно упакованы и разделяются тонкими слоями другого органического материала — протеина. В дентине эти кристаллы составляют 70% его объема. Средой, в которой оказываются заделанными эти кристаллы, является коллаген. Конечно, наличие слабой органической прослойки в материале зубов приводит к тому, что они с легкостью гниют,

особенно если очаг разложения, пройдя слой эмали, доходит до дентина. Но, вероятно, это разумный компромисс: без органического слоя зубы бы не гнили, но были бы очень хрупкими и ломались бы еще в молодом возрасте [46, 123].

Упругие свойства мягких биологических материалов, таких, как ткани и мышцы, сильно отличаются от упругих свойств костей и зубов. Эти материалы ведут себя подобно резине. Свойства этих материалов определяются их составом из длинных переплетенных молекул, которые можно растягивать до тех пор, пока они не станут параллельными.

Кроме особых свойств материала, большое значение для прочности костей животных и человека имеют их конструктивные особенности. Трубчатые и тавровые сечения костей обеспечивают единство двух взаимоисключающих качеств: прочности и легкости. Действительно, рассмотрим деталь, работающую на изгиб. Нейтральный слой детали не испытывает никаких деформаций, так как не подвергается никаким перегрузкам. Исечение его не влияет на прочность детали, но значительно уменьшает вес конструкции, способствует экономии материалов.

Интересными особенностями отличается также внутреннее строение пустотелых костей. Примером может служить показанное на рисунке 2.4 внутреннее строение человеческой тазобедренной кости. Пересекающиеся линии на рисунке — это система тонких внутренних перемычек. Они ориентированы вдоль направлений возможных механических напряжений, возникающих при тех или иных деформациях

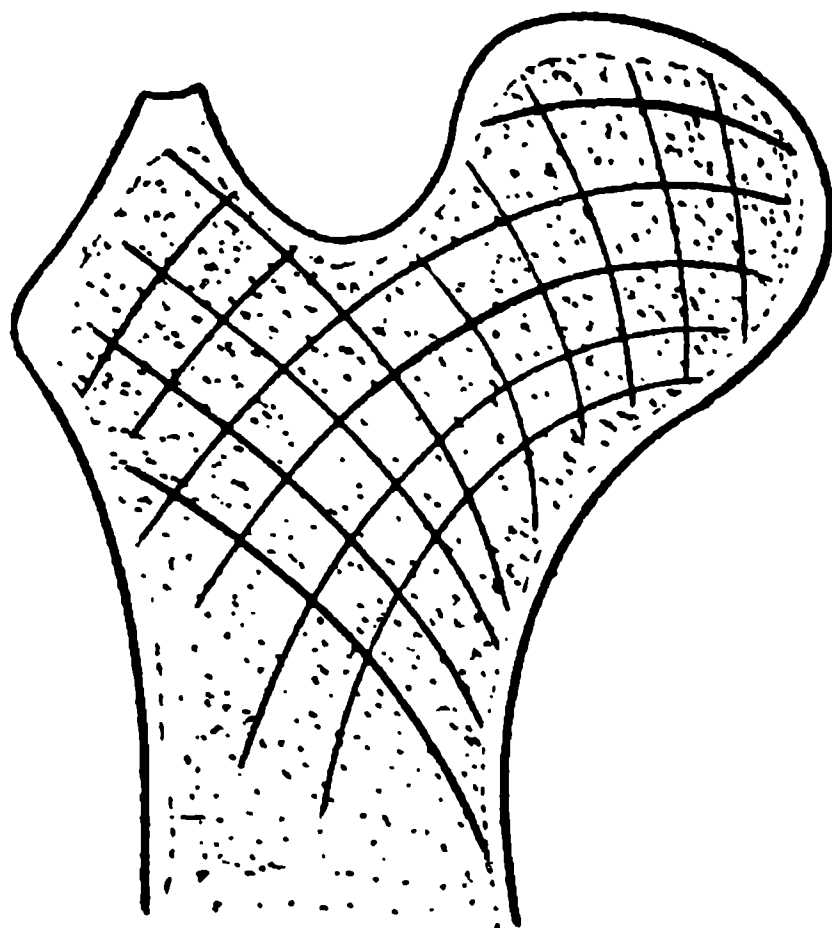


Рис. 2.4

нагружаемой кости. Образуются эти перемычки в процессе роста костей под действием внешних нагрузок как реакция костной системы на разрушающие деформации, заключающаяся в пассивной ориентировке волокон в направлении тяги [39, 83]. Последнее можно понимать таким образом, что, чем большие нагрузки испытывает растущий организм, и в частности его кости, тем прочнее они становятся.

Рассмотренные конструктивные особенности строения кости делают ее способной выдерживать огромные нагрузки. Например, тазобедренная кость человека, поставленная вертикально, выдерживает груз весом 50 кН (вес автомобиля «Волга») [38, 323]. Бедренная кость в том же опыте выдерживала нагрузку 15 кН, что в 25—30 раз превышает вес самого тела!

Задача 12.1. Рассчитайте удлинение сухожилия человека под действием силы 10 Н. Считайте, что сухожилие имеет форму сильно вытянутого цилиндра длиной 16 см, диаметром 8,6 мм.

Задача 12.2. Средняя площадь сечения бедренной кости человека равна 3 см². Какую силу сжатия может выдержать кость, не разрушаясь?

Задача 12.3. Почему планеты всегда имеют форму шара, а астероиды — нет?

Р е ш е н и е

Небольшие куски горных пород могут существовать почти в любой мыслимой форме. Но большие скопления вещества всегда стремятся принять сферическую форму, так как под действием силы тяготения отдельные, ничем не удерживаемые частицы как бы «скатываются с горы» вниз и даже самые жесткие материалы вынуждены «течь», как жидкости, до тех пор, пока не установится равновесие. Наибольшая масса тела, еще способного иметь форму, сильно отличающуюся от сферической, составляет примерно 10^{-5} массы Земли [34, 54]. Докажем это.

Давление равно $p = \frac{F}{S}$.

Подсчитаем давление внутри шара с равномерно распределенной плотностью. Сила гравитационного взаимодействия F в некоторой точке внутри сферы пропорциональна

$$\frac{GM^2}{R^2}.$$

Учитывая, что $S \sim R^2$, получаем $\rho \sim \frac{GM^2}{R^4}$. С учетом того, что $M = \frac{4\pi\rho R^3}{3}$ или $R \sim \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}}$, получаем $\rho \sim GM^2 \left(\frac{4\pi\rho}{3M}\right)^{\frac{4}{3}}$. Или окончательно $\rho \sim GM^{\frac{2}{3}}(\rho)^{\frac{4}{3}}$.

Предел прочности для гранита $\sigma_{пч} = 1,7 \cdot 10^8$ Па. Поэтому $M = 1,3 \cdot 10^{20}$ кг.

Получили, что наибольшая масса небесного тела, еще способного сохранять неправильную форму, действительно составляет $2 \cdot 10^{-5}$ массы Земли.

Задача 12.4. Оцените наибольшую высоту гор на Земле.

Р е ш е н и е

Будем считать ускорение свободного падения маломеняющимся с высотой. Возьмем в качестве предела прочности для материала горы предел прочности гранита на сжатие $1,7 \cdot 10^8$ Па. С учетом плотности гранита 2700 кг/м³ расчет

по формуле $h = \frac{\sigma_{пч}}{\rho g}$ позволяет получить $h = \frac{1,7 \cdot 10^8 \text{ м}}{10 \cdot 2700} = 6300 \text{ м}$.

По порядку величины полученный результат совпадает с реальным: наибольшая высота гор на Земле равна примерно 8000 м (Джомолунгма).

Задача 12.5. Оцените наибольшую высоту ледяных гор на Земле.

Р е ш е н и е

Приняв для льда предел прочности на сжатие $\sigma_{пч} = 3,7 \cdot 10^7$ Па, плотность $\rho = 900$ кг/м³ получаем $h = 4100$ м, что находится в хорошем соответствии с реальным значением высоты ледяных гор в Гренландии, равным примерно 5 км.

Приведенные в таблице 2.3 значения пределов прочности материалов соответствуют максимальному напряжению, которое образец способен выдерживать, не разрушаясь. Для использования их в расчетах необходимо закладывать 3—10-кратный запас прочности, т.е. реальные напряжения должны быть в 3—10 раз меньше указанных в таблице в зависимости от вида действующей на образец нагрузки.

Запас прочности костей скелета человека можно положить равным 20 [40, 71]. Из них фактор «4» следует отнести на счет учета перегрузок, возникающих при прыжках, беге и других движениях. А фактор «5» — на счет рычажного

механизма передачи внешних усилий на кости, мышцы и связки, поскольку на всех этих элементах могут развиваться усилия, в несколько раз превышающие внешние.

Задача 12.6. Вычислите механическое напряжение в берцовой кости человека (площадь поперечного сечения $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) и определите, сломается кость или нет в предположении, что: а) человек приземляется после прыжка с высоты 5 м, не сгибая ног (длина перемещения тела при столкновении с землей равна 1 см); б) человек приземляется, сгибая ноги в коленях ($l = 50 \text{ см}$).

Р е ш е н и е

Для кости предел прочности составляет $1,7 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Площадь поперечного сечения кости ноги человека в самом тонком, а значит, и в самом уязвимом при прыжке месте — голени — составляет $3,5 \text{ см}^2$. Легко подсчитать, что голень ломается, если сила давления на нее, возникающая при приземлении, превышает $50\,000 \text{ Н}$. Действительно,

$$F = \sigma_{\text{пч}} S, \text{ или } F = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 1,7 \cdot 10^8 \text{ Н} = 5 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

а) При приземлении после прыжка с высоты 5 м на длине 1 см сила давления на голень

$$F = \frac{mgH}{h}; F_1 = \frac{70 \cdot 10 \cdot 5 \text{ Н}}{10^{-2}} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Н}; \sigma_1 = 1,16 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

б) При приземлении во втором случае

$$F_2 = 7 \cdot 10^3 \text{ Н}; \sigma_2 = 2,3 \cdot 10^7 \text{ Па}.$$

Сравнение полученных результатов со значением предела прочности показывает, что во втором случае прыжок человека скорее всего закончится благополучно, а в первом — нет.

Задача 12.7. Почему самые крупные на Земле животные морские?

Р е ш е н и е

Предел прочности для кости $1,7 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Масса самого крупного на Земле животного — кита — составляет 150 т. Запас прочности возьмем равным 5. Тогда, для того чтобы выдерживать собственный вес, животное должно иметь позвоночник площадью сечения

$$S = \frac{mg}{\sigma_{\text{пч}}}; S = \frac{150 \cdot 10^4 \cdot 5}{1,7 \cdot 10^8} \text{ м}^2 = 0,044 \text{ м}^2 = 440 \text{ см}^2.$$

Поскольку реальные размеры позвоночника гораздо меньше, ясно, что на суше это животное было бы раздавлено собственным весом.

Задача 12.8. Оцените наибольший вес груза, который может поднять человек.

Р е ш е н и е

Предел прочности на сжатие кости человека равен $1,7 \cdot 10^8$ Па. С учетом запаса прочности, равного 20, и площади поперечного сечения позвоночника 3 см^2 , получаем:

$$F = \frac{\sigma_{\text{пч}}}{20} S; F \approx 2500 \text{ Н.}$$

Полученный результат находится в хорошем соответствии с данными о мировых рекордах тяжелоатлетов.

§ 13. Сила трения

Тема «Сила трения» предоставляет богатые возможности для иллюстрации гуманитарных идей, обобщенно названных «Человек и физика». Трение — неизбежный спутник множества окружающих человека явлений, и в первую очередь такого важного, как перемещение тел. Поскольку существование людей связано с движением по земле, воздуху и воде, наличие трения откладывает отпечаток на все виды человеческой деятельности, играя иногда полезную, а иногда вредную роль. В частности, трение паразитическим образом помогает человеку перемещаться в пространстве. Но все нарастающие скорости передвижений заставляют его расплачиваться за них все более чудовищными расходами энергии и топлива. Кроме того, трение всегда сопровождается выделением теплоты, что на заре цивилизации позволило людям сделать одно из важнейших изобретений: научиться добывать огонь. И наконец, изнашивание машин и оборудования, безусловно, самое разорительное и неизбежное порождение трения, наносящее большой ущерб человеческому хозяйству.

Трение и перемещение Начнем рассмотрение интересующих нас идей с обсуждения физической сущности процесса человеческой ходьбы. При ходьбе человек ставит ноги на землю таким образом, что они должны были бы скользить назад, если бы трения не существовало. И в самом деле, при попытке идти по гладкому льду, когда трение мало, ноги человека проскальзывают, движение его становится небезопасным и может окончиться падением. Так как сила трения покоя действует в направлении, противоположном тому, в котором должно было бы возникнуть скольжение, она сообщает телу человека ускорение, направленное вперед. Человек идет вперед потому,

что последовательно отталкивается от дороги то одной, то другой ногой. По асфальту идти легче, чем по мокрой глине или льду, потому что коэффициент трения покоя материала подошв об асфальт в первом случае намного больше. Ступая по мокрой глине или льду, человек уже не может отталкиваться от дорожки с прежней силой, так как сила толчка прямо пропорционально зависит от коэффициента трения: $F = kN$.

Для иллюстрации вышесказанного рассмотрим задачу.

Задача 13.1. С какой шириной шага может идти по скользкому льду человек, не боясь упасть, если длина его ног 1 м, а коэффициент трения подошв обуви о дорогу 0,1?

Р е ш е н и е

На рисунке 2.5 изображены силы, действующие на ноги человека. По второму закону Ньютона

$$m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{тр}1} + \vec{F}_{\text{тр}2} = 0,$$

что соответствует двум скалярным уравнениям

$$F_{\text{тр}1} = F_{\text{тр}2};$$

$$mg = N_1 + N_2.$$

Так как $N_1 = N_2 = N$, имеем $F_{\text{тр}1} = F_{\text{тр}2} = kN$; $N = \frac{mg}{2}$. С другой стороны, $\frac{F_{\text{тр}}}{N} = \text{tg}\alpha$. Тогда $k = \text{tg}\alpha$.

Поскольку $F_{\text{тр}0}$ — это максимальная сила трения покоя, а при ходьбе используется лишь часть ее, не допускающая проскальзывания, можно утверждать, что $k \geq \text{tg}\alpha$, и после

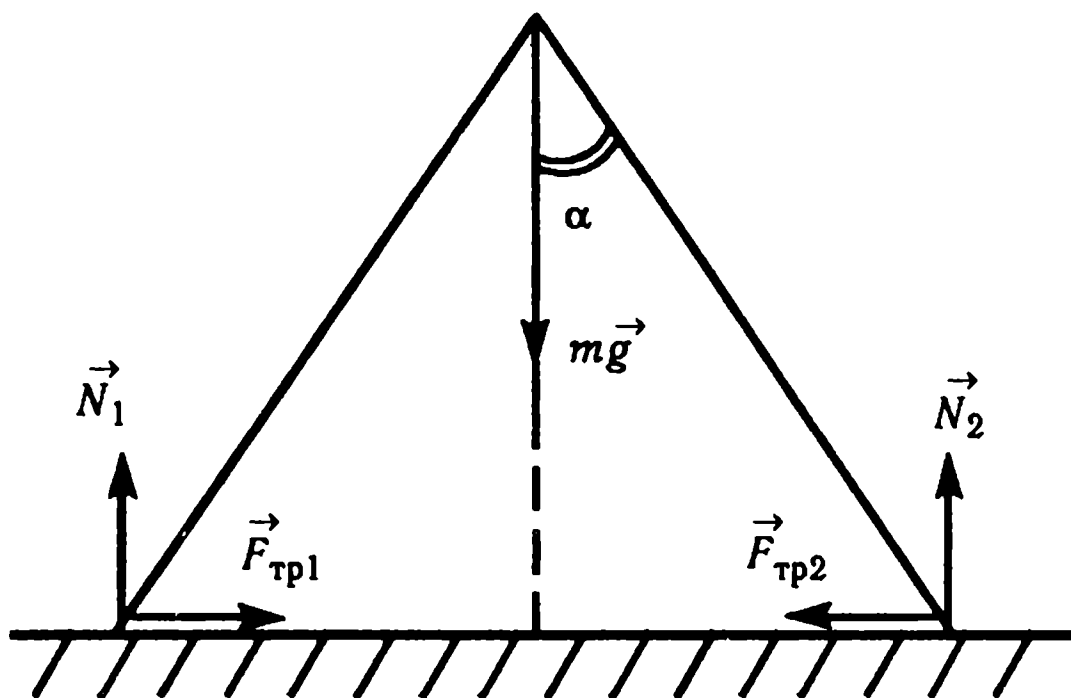


Рис. 2.5

подстановки данных задачи в формулу $l \leq 2Lk$ получить $l \leq 0,2$ м.

Важный результат $k \geq \operatorname{tg} \alpha$ позволяет понять, почему человек при ходьбе по скользкой поверхности «семенит» ногами и его походка становится похожей на походку Чарли Чаплина.

Спортсмены-фигуристы также используют это обстоятельство. Стоит спортсмену, до того вполне надежно державшемуся на льду, сильно раздвинуть ноги (увеличить угол, а следовательно, $\operatorname{tg} \alpha$), как условие нарушается и он легко переходит в положение шпагат [11, 34].

Задача 13.2. Оцените максимальное ускорение, которое может развить бегущий человек. Почему «шиповки» считаются наилучшей обувью для бега?

Р е ш е н и е

Максимальное ускорение определяется выражением $a = kg$, и тем больше, чем больше k .

При $k = 0,25$ $a = 0,25g$; $a = 2,45$ м/с².

Той же цели — улучшению «сцепления» поверхности обуви с поверхностью льда — служат специальные приспособления на ботинках альпинистов для ходьбы по ледникам.

Для иллюстрации разных случаев использования трения покоя и трения скольжения предлагаем следующие задачи.

Задача 13.3. Предположим, вы стоите в салоне автобуса, движущегося с ускорением, равным $0,4g$. Каким должен быть минимальный коэффициент трения между вашими подошвами и полом, чтобы вы не скользили?

Задача 13.4. Известен ряд аттракционов, где используется «эффект трения». Какова должна быть скорость вращения диска диаметром 2 м, чтобы человек, стоящий на его краю, мог удержаться на ногах при коэффициенте трения подошв о поверхность диска 0,8? Что произойдет даже при незначительном увеличении скорости вращения? Что произойдет с человеком, стоящим ближе к оси вращения?

Задача 13.5. В парках аттракционов можно увидеть карусель, на которой люди прижимаются к внутренней стене вертикального цилиндра радиусом 2,9 м, вращающегося с частотой $0,92$ с⁻¹. (При этом у цилиндра убирается дно.) Каким должен быть коэффициент трения, чтобы человек, катающийся на такой карусели, не выпал из нее? Безопасна ли она?

Задача 13.6. Мотоциклист, движущийся с постоянной скоростью 12 м/с, въезжает на участок дороги, покрытый песком, где коэффициент трения равен 0,8. Проскочит ли он песчаный участок без переключения скоростей, если протяженность участка 15 м? Если да, то какой будет его скорость в конце участка?

Задача 13.7. Придумайте способ экспериментального определения коэффициента трения подошв обуви человека о некоторую поверхность.

Одним из возможных ответов к этой задаче может быть такой. Поставить человека на доску и, медленно поднимая доску за один край, заметить положение, при котором человек еще сможет удерживаться на доске. Нетрудно получить, что тангенс угла наклона плоскости доски к горизонту определит значение коэффициента трения. Можно порекомендовать это задание для проведения лабораторной работы (см. Приложение).

Трение качения После рассмотрения вопросов, связанных с ролью трения покоя и трения скольжения в жизни человека, перейдем к ознакомлению с трением качения. Всем известно, что катить легче, чем тянуть. Но почему, несмотря на явные преимущества, качение не используется живой природой при «конструировании» живых существ? При этом обычно ссылаются на отсутствие у животных и насекомых каких-либо двигательных органов, хотя бы отдаленно напоминающих колесо. Иными словами, предполагается, что качение можно реализовать только круглыми телами. Так ли это? Возьмем колесо со множеством спиц и отбросим обод. Легко убедиться, что получившееся звездообразное тело катится не хуже обычного колеса. Тут же всплывает в памяти известное выражение «ходить колесом». И действительно, аналогия с «катящейся» звездой полная. Вся разница в том, что у кувыркающегося «колесом» акробата всего четыре «спицы»: две руки и две ноги. Но чем отличается «хождение колесом» от обычной ходьбы? В принципе ничем. Правда, при ходьбе человек и животные немного сгибают ноги, вызывая этим потери энергии на вертикальные перемещения своего центра масс, чего при обычном качении нет. Но в наиболее быстром, спортивном стиле ходьбы ноги спортсмена почти не сгибаются. Таким образом, мы пришли к выводу, что качение можно осуществить не только круглыми телами, но и с помощью специальных устройств произвольной формы, содержащих опоры («ноги»), которые могут переступать в определенной последовательности. Остается только удивляться природе, создавшей такие надежные и экономичные системы для перемещения живых существ по суше. Добавим к этому, что перемещение с помощью ног имеет и гигантское преимущество перед качением: оно не требует гладкой дороги и позволяет легко преодолевать препятствия, сравнимые с размером ноги [11, 59].

Трение в суставах Трение важно для человека не только потому, что без него невозможно перемещение. Без него невозможно преобразование поступательного движения мышц во вращательное движение конечностей в суставах. Суставы человека и животных близки по своим функциям к шарнирам: шаровому и цилиндрическому. Плечевой, тазобедренный суставы, сочленение головы с позвоночником, глаз в своей орбите устроены по принципу шарового шарнира, состоящего из двух соприкасающихся сферических поверхностей: выпуклой и вогнутой — равного радиуса. Локтевой и коленный суставы, суставы пальцев напоминают цилиндрический шарнир, допускающий вращение только в одной плоскости. Сложнее устроена система запястья: она представляет собой аналог двух цилиндрических шарниров, оси которых взаимно перпендикулярны (рис. 2.6). Внешний вид шарнирного устройства, по своим возможностям напоминающего руку человека, изображен на рисунке 2.7.

Вся поверхность сустава, испытывающего трение, покрыта особой хрящеватой тканью, пропитанной так называемой синовиальной жидкостью. Эта жидкость по своему составу близка к плазме крови, но обладает значительно большей вязкостью. Под периодической внешней нагрузкой, например при ходьбе, жидкость выдавливается из капилляров хряща и, действуя, как смазка, обеспечивает коэффициент трения 0,003. Только болезни, вызванные отсутствием тренировок или возрастными изменениями, могут нарушить совершенство суставов. Последствия этого бывают тяжелыми для человека: часто он практически лишается способности нормально ходить [11, 184].

Вообще же проблема трения в суставах и их изнашиваемости решена природой на таком уровне, о котором инженеры-трибологи (специалисты по трению) могут только мечтать. Динамические нагрузки, превышающие тысячи ньютонов при прыжках, практическое отсутствие трения и изнашивания, никакого особого «техобслуживания» и безотказная работа в течение всей жизни — вот перечень качеств природного узла трения — сустава.

Тормозной путь С вопросом о трении, как факторе, обеспечивающем, в конечном счете, способность людей и устройств к перемещению, тесно связана проблема безопасности автомобильного движения. Относя эту проблему по справедливости к сфере «экологии» человека, необходимо привлечь к ней внимание учащихся, сформировать правиль-

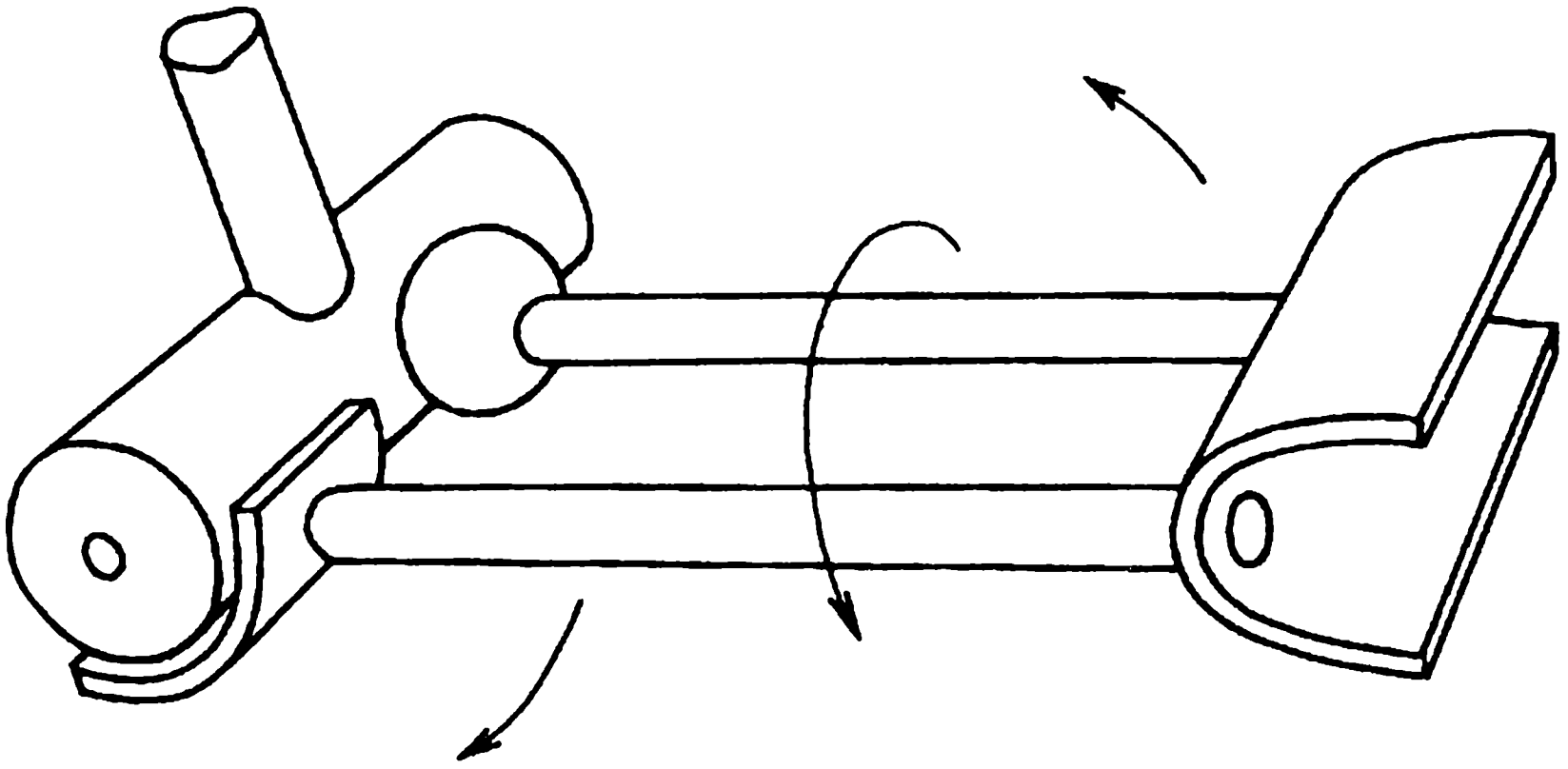


Рис. 2.6

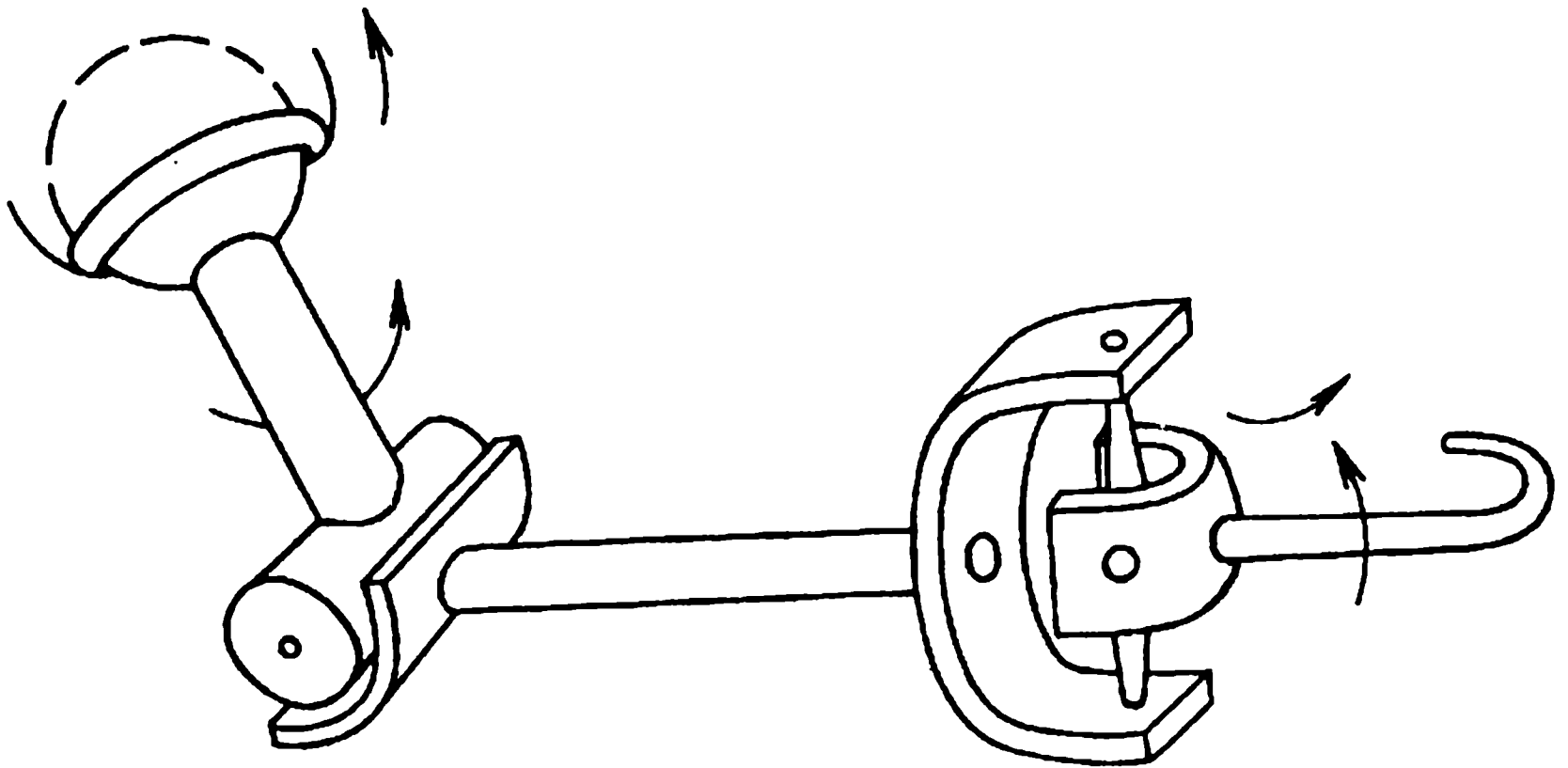


Рис. 2.7

ное отношение к ней, воздействуя на их рассудок и чувства. Полезной здесь может стать постановка таких вопросов: каковы, на ваш взгляд, масштабы гибели людей в автокатастрофах? Как эти числа соотносятся с данными о гибели людей в авиационных, железнодорожных и других катастрофах? Каковы причины гибели людей в автокатастрофах? При ответе на эти вопросы можно использовать следующие цифры. Известно, что автомобильные катастрофы ежегодно уносят 180 тыс. жизней, а число раненых при этом исчисляется миллионами [11,86].

Значительная доля дорожных происшествий вызвана плохой погодой: гололедом, дождем, снегом и т.д., вследствие чего изменяется важная характеристика покрытия дороги — коэффициент трения.

Из сравнения коэффициентов трения о сухой и мокрый асфальт (0,6 и 0,4 соответственно) видно, что в дождь или гололед условия торможения резко ухудшаются, тормозной путь, равный $l = \frac{v_0^2}{2kg}$, заметно увеличивается. С учетом конечного времени реакции водителя t_p эта формула примет вид

$$l = v_0 t_p - \frac{v_0^2}{2kg} .$$

Следует обратить внимание учащихся на тот факт, что значение t_p очень индивидуально: на него оказывают влияние такие факторы, как состояние здоровья, усталость, наличие алкоголя в крови и т.д.

В целом же последняя формула позволяет получить данные, которые находятся в более хорошем соответствии с экспериментом, чем полученные с помощью предыдущей формулы.

Затем можно предложить вниманию учащихся следующие задачи.

Задача 13.8. Найдите тормозной путь автомобиля массой 1500 кг, движущегося со скоростью $v = 90$ км/ч, если коэффициент трения шин о дорогу составляет 0,55.

Задача 13.9. Составьте таблицу значений тормозного пути автомобиля в зависимости от начальной скорости торможения. Выполните расчеты для $t = 0,8$ с и коэффициента трения 0,4. Постройте диаграмму скорость — тормозной путь по данным таблицы.

Задача 13.10. Во сколько раз возрастет тормозной путь при движении автомобиля по обледенелой дороге по сравнению с расстоянием, проходимым при экстренном торможении по сухому асфальту при прочих равных условиях?

Задача 13.11. Каким был бы тормозной путь автомобиля на Луне, если все остальные условия движения были бы, как в задаче 13.8?

Установившееся движение Еще один вопрос относится к сфере «экология» человека — динамика установившегося движения (см. § 6). Сформулируем задачу, приводящую к созданию проблемной ситуации.

Задача 13.12. Что произойдет с автомобилем, если водитель будет непрерывно нажимать педаль газа?

Один из возможных ответов: скорость будет увеличиваться до бесконечности. На самом деле этого не происходит, автомобиль сможет достичь некоторой предельной скорости, которая затем уже не будет изменяться. Почему скорость тела в среде не может превысить так называемую установившуюся скорость?

При поиске ответа на этот вопрос необходимо добиться понимания учащимися того факта, что скорость движения тела при наличии сухого трения может возрасти неограниченно с ростом силы, вызывающей ускорение, если последняя, конечно, превосходит силу трения покоя.

Иначе происходит при действии силы жидкого трения. Выражение для скорости движения тела в этом случае будет выглядеть следующим образом: $v(t) = \frac{F_0}{\beta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta t}{m}\right) \right]$.

График зависимости $v(t)$ изображен на рисунке 2.8. Из него видно, что скорость тела в среде, где действует сила

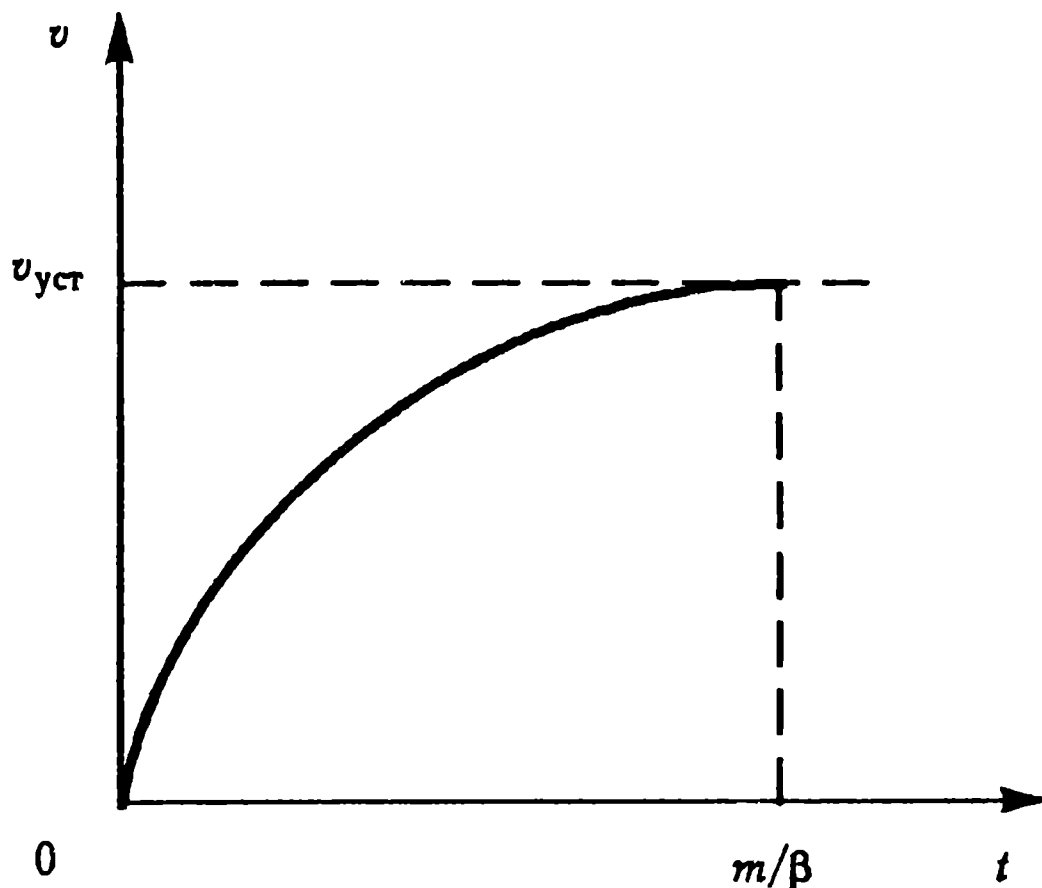


Рис. 2.8

жидкого трения, не будет возрастать бесконечно, а по прошествии определенного времени достигнет предельного значения, называемого установившейся скоростью движения

$$v_{\text{уст}} = \frac{F_0}{\beta}.$$

Величина $\frac{F_0}{\beta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta t}{m}\right) \right]$ будет быстро уменьшаться после достижения показателем степени e значения -1 . Из этого условия можно получить значение времени $t = \frac{m}{\beta}$, после которого тело достигает установившейся скорости [15, 263].

Для небольших (много меньше размера тела человека) тел шарообразной формы значение β определено и равно $\beta = 6\pi\eta$, где η — вязкость жидкости; r — радиус шарика. Тогда для силы жидкого трения получим

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v.$$

Экспериментально установлено, что сила жидкого трения, пропорциональная первой степени скорости, возникает только при малых скоростях движения тел в среде. Она гораздо меньше силы сухого трения. Поэтому для уменьшения трения между движущимися деталями машин применяют смазку.

При больших скоростях движения и размерах тел, примерно равных размеру тела человека, на тело, кроме силы жидкого трения, начинает оказывать влияние сила $\vec{F}_{\text{сопр}}$ — сила сопротивления движению, равная по модулю

$$F_{\text{сопр}} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \rho S v^2.$$

Здесь v — скорость движения тела; ρ — плотность среды; S — площадь поперечного сечения тела. Иллюстрировать эту зависимость можно с помощью опыта, предложенного Н.М.Шахмаевым [14, 109].

Таким образом, тело, движущееся в среде, испытывает действие двух сил: силы жидкого трения и силы сопротивления. При небольших скоростях сила сопротивления меньше силы жидкого трения, а при больших — значительно превосходит ее (рис. 2.9).

Из выражения для силы сопротивления видно, что ее значение сильно зависит от формы движущегося тела. Форму тела, при которой сила сопротивления мала, называют обтекаемой. Ракетам, самолетам, автомобилям и другим машинам, движущимся с большими скоростями в воздухе или в воде, придают обтекаемую, каплеобразную форму. С другой

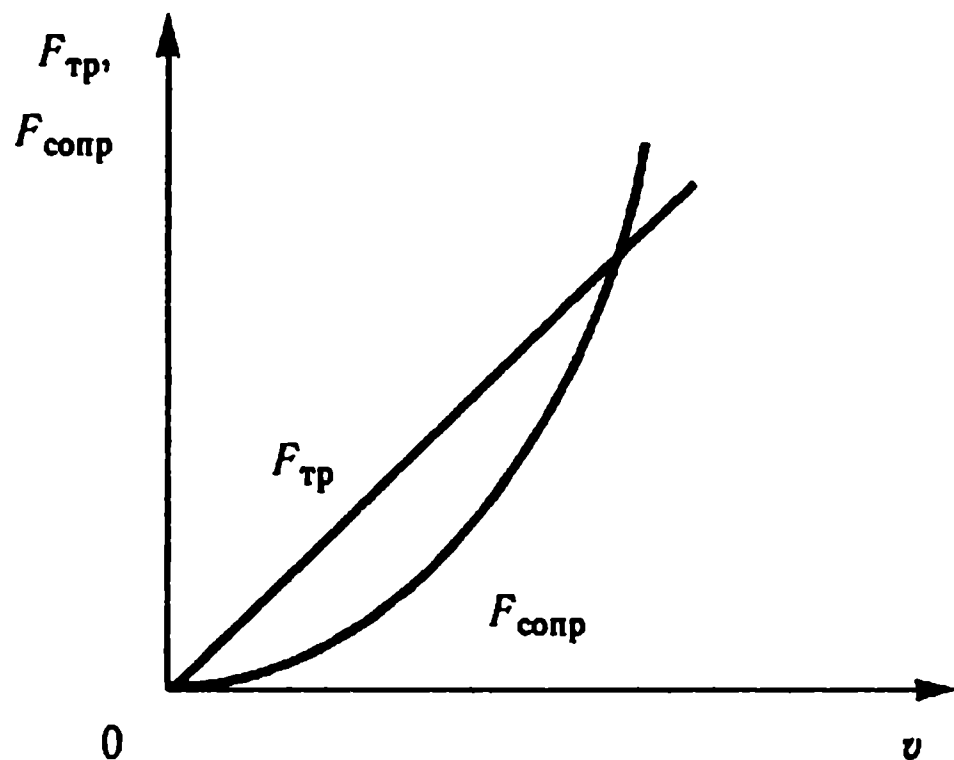


Рис. 2.9

стороны, изменяя размеры падающего тела, можно, увеличивая или уменьшая силу сопротивления воздуха, изменять установившуюся скорость.

Так, например, установившаяся скорость парашютиста, выполняющего затяжной прыжок, составляет примерно 60 м/с. Разводя руки и ноги в стороны, парашютист может уменьшить свою скорость до 40 м/с. Установившаяся скорость при полете с раскрытым парашютом равна примерно 6—8 м/с. А шар массой, равной массе человека, имеет установившуюся скорость 105 м/с.

Для иллюстрации понятия установившейся скорости можно предложить учащимся следующие задачи.

Задача 13.13. Парашютист массой 75 кг выпрыгнул из самолета на высоте 20 км и до высоты 1000 м летел, не раскрывая парашюта. Определите его скорость в момент раскрытия парашюта. Примите $S = 0,15 \text{ м}^2$, $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$.

Р е ш е н и е

$$mg = F_{\text{сопр}}; F_{\text{сопр}} = \rho S v^2,$$

откуда $v = \sqrt{\frac{mg}{\rho S}}; v = \sqrt{\frac{73 \cdot 10}{1,3 \cdot 0,15}} \text{ м/с} = 60 \text{ м/с}.$

Скорость всегда равна 60 м/с, с какой бы высоты человек ни падал. Подстановка полученного значения скорости в формулу пути при равноускоренном движении дает

$$h = \frac{v^2}{2g}; h = \frac{3600}{2 \cdot 10} \text{ м} = 180 \text{ м}.$$

Получили, что установившаяся скорость, равная 60 м/с, достигается парашютистом на первых 180 м километровой высоты, а весь остальной путь до раскрытия парашюта проделывается с постоянной скоростью.

Задача 13.14. Оцените скорость опускания с парашютом в предположении, что радиус парашюта равен 3 м.

Задача 13.15. Парашютист массой 80 кг совершает учебный прыжок с высоты $h = 1$ км и приземляется, имея вертикальную составляющую скорости 5 м/с. Считая силу сопротивления воздуха пропорциональной квадрату скорости, определите коэффициент пропорциональности между $F_{\text{сопр}}$ и v и время ускоренного движения.

Задача 13.16. Предположим, что пловец, неудачно прыгнув и шлепнувшись о воду, не должен испытывать ускорение $a = 50g$. При какой максимальной высоте прыжка, пловец еще не будет испытывать это ускорение, если средняя площадь его поперечного сечения при неудачном вхождении в воду $0,4 \text{ м}^2$?

Задача 13.17. Два шара, сделанных из одинакового материала, падают на землю, замедляясь в разреженном облаке пыли. Во сколько раз установившаяся скорость одного шара больше скорости другого, если радиус его вдвое больше радиуса другого шара?

Задача 13.18. Ракета движется равномерно сквозь разреженное облако пыли. Во сколько раз нужно увеличить силу тяги, чтобы скорость ракеты возросла вдвое?

Задача 13.19. С какой наименьшей скоростью можно двигаться на водных лыжах? Примите площадь поверхности лыж равной $0,2 \text{ м}^2$.

§ 14. Импульс. Закон сохранения импульса

Импульс тела Импульс тела — произведение массы тела на его скорость — важнейшая физическая величина, более эффективная с точки зрения интерпретации взаимодействий, чем каждая из составляющих ее величин по отдельности.

Чем больше у тела импульс, тем труднее его остановить и тем серьезнее будут последствия, если его остановка вызвана ударом или столкновением. Более вероятно, что футболист будет сбит с ног, если с ним столкнется игрок, бегущий с высокой скоростью, чем если бы он столкнулся с более легким или медленно бегущим игроком. И тяжелый, быстро движущийся грузовик нанесет больший ущерб при аварии, чем более легкий, медленно движущийся автомобиль.

При изучении темы «Импульс» с целью ее «гуманитаризации», можно познакомить учащихся со значениями импульсов человека, перемещающегося с разными скоростями,

импульсами тел и предметов из ближайшего окружения человека, а также со значениями импульсов космических объектов, в связи с чем предлагаем рассмотреть следующие задачи.

Задача 14.1. Вычислите импульсы: а) бегущего человека ($m = 70$ кг, $v = 10$ м/с); б) конькобежца на дистанции ($m = 70$ кг, $v = 12,5$ м/с); в) теннисного мяча ($m = 0,14$ кг, $v = 40$ м/с); г) ружейной пули ($m = 8$ г, $v = 750$ м/с); д) легкового автомобиля ($m = 1500$ кг, $v = 72$ км/ч); е) Земли, движущейся по орбите вокруг Солнца ($m = 6 \cdot 10^{24}$ кг, $v = 30$ км/ч).

Закон сохранения импульса Импульс наряду с энергией, массой и другими физическими величинами обладает свойством при некоторых условиях сохраняться как некая характеристика системы.

Закон сохранения импульса является результатом однородности пространства. Сохранение импульса в механических явлениях означает, что механическое движение не может бесследно исчезнуть или возникнуть из ничего.

Закон сохранения импульса можно проиллюстрировать многими демонстрационными опытами, например, такими:

1. Два человека разной массы стоят на легкоподвижных тележках, упираясь ладонями друг о друга. После толчка разъезжаются со скоростями, обратно пропорциональными массам.

2. Доска лежит, опираясь на две легкоподвижные тележки. Человек идет по доске в одну сторону, тележка едет в противоположную.

3. Человек стоит на легкоподвижной тележке с грузом (рюкзаком) в руках. Отбрасывая груз (перебрасывая его товарищу), едет в сторону, противоположную движению груза.

Перечисленные выше демонстрации можно показать по ходу изложения материала, а можно сопровождать ими решение задач. Первый опыт можно использовать для проведения лабораторной работы (см. Приложение).

Задача 14.2. Покажите, что время движения людей на тележках до полной остановки обратно пропорционально массам взаимодействующих людей.

Р е ш е н и е

По закону сохранения импульса $m_1 v_1 = m_2 v_2$,

где m_1, m_2 — массы людей; v_1, v_2 — модули их скоростей.

Поскольку при замедленном движении $v = at = kgt$, получаем

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{kg t_2}{kg t_1} = \frac{t_2}{t_1}.$$

Задача 14.3. Покажите, что при движении до остановки корень квадратный из отношения перемещений обратно пропорционален массам взаимодействующих людей.

Р е ш е н и е

Из закона сохранения энергии следует, что при торможении

$$\frac{mv^2}{2} = kmgs,$$

где m — масса тела; v — его скорость; s — перемещение.

$$\text{Тогда } \frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{kg t_2}{kg t_1}} = \sqrt{\frac{s_2}{s_1}}.$$

Задача 14.4. Сообщаете ли вы импульс Земле во время ходьбы? бега? прыжков?

Следует обратить внимание учащихся на выяснение такого вопроса: поскольку результат взаимодействия — изменение состояния, то как движется Земля после рассмотренного взаимодействия?

Задача 14.5. Может ли человек сдвинуть земной шар силой своих мускулов?

Р е ш е н и е

Для системы человек—Земля закон сохранения импульса имеет вид $mv = MV$, где mv и MV — импульсы человека и Земли соответственно. Вычислим скорость человека. При прыжке с места на высоту 1 м он должен иметь начальную скорость $v = \sqrt{2gh}$; $v = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1}$ м/с = 4,4 м/с.

Если принять массу человека равной 60 кг, а массу Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг, получим, что в результате прыжка человека земной шар приобретает скорость

$$V = \frac{mv}{M}; \quad V = \frac{60 \cdot 4,4}{6 \cdot 10^{24}} \text{ м/с} = 4,4 \cdot 10^{-23} \text{ м/с}.$$

Как мало это значение, можно понять из следующей оценки: если бы Земля двигалась с такой скоростью в течение 1 млрд. лет, она сдвинулась бы всего на 1 мкм.

Задача 14.6. При игре в хоккей защитник массой 140 кг, движущийся со скоростью 3 м/с, встречает нападающего массой 90 кг, набравшего скорость 7,5 м/с, и применяет к нему силовой прием. Какова будет совместная скорость этой пары непосредственно после столкновения?

Задача 14.7. Отец (массой 60 кг) и дочь (массой 20 кг) стоят на абсолютно гладком льду. Отец бросает дочери мяч массой 1 кг. Горизонтальная составляющая скорости мяча по модулю равна 5 м/с. С какой скоростью после этого начнет скользить отец? Какова будет скорость дочери после того, как она поймает мяч? Если мяч отскакивает от руки дочери со скоростью 4 м/с по направлению к отцу, какую скорость приобретет дочь?

Задача 14.8. Допустим, вы катитесь по инерции на велосипеде со скоростью 5 м/с. Ваша масса вместе с велосипедом составляет 70 кг. Вы наклоняетесь и подхватываете лежащий на земле рюкзак массой 15 кг. Чему будет равна ваша скорость после этого?

Задача 14.9. Предположим, что вы, как и в предыдущей задаче, катитесь по инерции на велосипеде со скоростью 5 м/с, но на этот раз держите в руках рюкзак массой 15 кг. Ваша полная масса составляет поэтому 85 кг. Чему будет равна ваша скорость, если вы уроните рюкзак?

Задача 14.10. Платформа длиной 20 м и массой 200 кг движется со скоростью 6 м/с по горизонтальным рельсам без трения. Человек массой 75 кг начинает движение от одного конца платформы к другому в направлении ее движения со скоростью 2,5 м/с относительно платформы. На какое расстояние переместится платформа за то время, которое потребуется человеку, чтобы пройти от одного ее конца к другому?

Задача 14.11. Лодка неподвижно стоит на озере. На корме и на носу лодки на расстоянии 2 м друг от друга сидят рыболовы. Масса лодки 140 кг, массы рыболовов 70 кг и 40 кг. Рыболовы меняются местами. Как перемещается при этом лодка?

Задача 14.12. Тележка массой M вместе с человеком массой m движется со скоростью v . Человек начинает идти с постоянной скоростью в том же направлении. При какой скорости человека относительно тележки она остановится? Трением пренебречь.

Задача 14.13. Четыре человека стоят друг за другом на длинной доске, лежащей на льду. Все они по очереди с разбега спрыгивают с доски, отталкиваясь от ее конца, со скоростью 2 м/с относительно доски. Масса каждого человека равна 60 кг, масса доски 10 кг. Чему равна конечная скорость доски?

Задача 14.14. Человек, стоящий в лодке, бросает камень массой 2 кг под углом 60° к горизонту. Общая масса человека с лодкой 100 кг. Начальная скорость камня относительно лодки 10 м/с. Определите расстояние между лодкой и камнем в момент падения камня в воду.

Задача 14.15. Ракета массой 7200 кг движется в космическом пространстве со скоростью 150 м/с в направлении к Солнцу. Предположим, что понадобилось изменить направление движения на 30° и это можно осуществить лишь за счет кратковременного выброса продуктов сгорания в направлении, перпендикулярном первоначальному. Если газы из ракеты выбрасываются со скоростью 2400 м/с, то какая масса газа должна быть при этом выброшена?

Простота решения задач на закон сохранения импульса определяется тем, что при его применении не надо знать характер действия и численные значения внешних сил.

Тем не менее закон сохранения импульса позволяет вычислить внешнюю силу, изменяющую импульс системы, если известен интервал времени, в течение которого она действует, а сама сила полагается неизменной в течение этого интервала и равной среднему значению.

Для иллюстрации вышесказанного можно рассмотреть следующие задачи. При желании содержание данных задач можно использовать для создания проблемной ситуации.

Задача 14.16. Человек может поймать баскетбольный мяч руками. Чтобы поймать бейсбольный мяч, игрок должен надеть на руку защитную рукавицу. Почему мы не ловим руками пули?

Р е ш е н и е

Импульс баскетбольного мяча

$$p_1 = 0,3 \cdot 20 \text{ кг}\cdot\text{м/с} = 6 \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

Импульс бейсбольного мяча

$$p_2 = 0,145 \cdot 45 \text{ кг}\cdot\text{м/с} = 6,5 \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

Импульс пули

$$p_3 = 0,008 \cdot 750 \text{ кг}\cdot\text{м/с} = 7,5 \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

По порядку величины все полученные импульсы одинаковы. Подсчитаем средние силы, действующие на «принимающего» снаряд человека. Сначала определим время действия силы

$$t = \frac{S}{v} :$$

$$t_1 = \frac{0,5}{10} \text{ с} = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$t_3 = \frac{0,01}{375} \text{ с} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Теперь вычислим соответствующие силы:

$$F_1 = \frac{6}{0,05} \text{ Н} = 120 \text{ Н};$$

$$F_2 = \frac{6,5}{5 \cdot 10^{-4}} \text{ Н} = 1,3 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$F_3 = \frac{7,5}{2,7 \cdot 10^{-5}} \text{ Н} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Сила, действующая на человека при «столкновении» его с пулей так велика, что вызовет разрушение тканей руки.

Задача 14.17. Известен цирковой номер, суть которого состоит в том, что после выстрела ассистента артист «ловит» пулю зубами. Оцените возможность осуществления этого номера.

Задача 14.18. Из винтовки массой 5 кг производится выстрел. Пуля массой 15 г вылетает с начальной скоростью 300 м/с. Какова скорость отдачи винтовки?

Р е ш е н и е

В соответствии с законом сохранения импульса скорость отдачи оказывается равной

$$V = \frac{mv}{M}; \quad V = \frac{0,015 \cdot 300}{5} \text{ м/с} = 0,9 \text{ м/с.}$$

Обычно на этом месте решение задачи прекращают, хотя анализ результатов может быть достаточно интересен с гуманитарной точки зрения.

Задача 14.19. Какой толчок в плечо ощутит при этом стрелок (см. задачу 14.18)?

Р е ш е н и е

Получившаяся при решении предыдущей задачи скорость оказывается достаточно большой, и, если приклад винтовки не будет крепко прижат к плечу, стрелок получит ощутимый удар.

Действующую при ударе силу можно оценить исходя из следующих соображений.

Если считать длину дула винтовки равной 0,6 м, а среднюю скорость пули в стволе 150 м/с, можно получить интервал действия силы отдачи винтовки $\Delta t = 4 \cdot 10^{-3}$ с. Тогда сила отдачи

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}; \quad F = \frac{0,015 \cdot 300 \text{ Н}}{0,004} = 1125 \text{ Н,}$$

т.е. почти сравнима с весом тела человека.

Такая сила, как мы уже видели, может сбить человека с ног.

Если же стрелок в момент выстрела плотно прижмет приклад винтовки к плечу, то удар амортизируется телом человека. Тогда для расчета скорости отдачи мы должны использовать вместо массы винтовки массу винтовки вместе с массой человека. Тогда скорость отдачи получится равной 0,045 м/с. Сила отдачи при этом останется прежней, но она будет распределена по всей массе человека.

В связи с рассмотрением этого вопроса можно предложить вниманию учащихся следующую задачу.

Задача 14.20. В ковбойских фильмах злодея часто сбивают с ног единственным выстрелом из винтовки героя. Крупная пуля калибра 9 мм имеет массу около 10 г и начальную скорость 400 м/с. Какой будет средняя скорость отдачи среднего мужчины при попадании в него такой пули? Возможно ли, что он будет сбит с ног?

Сравнение сил ударов спортсменов

Интерес для учащихся представляет вопрос о сравнении сил ударов двух спортсменов: боксера и каратиста. Оба они развили обычные человеческие способности к нанесению спортивных ударов путем специальных тренировок. В обоих случаях сила удара возникает за счет изменения импульса стоящего человека, ускоряющего наносящую удар руку из состояния покоя до некоторой скорости, на пути, равном размаху руки человека.

Можно считать, что исходные условия обоих ударов одинаковы. Почему же так различаются результаты?

Боксер передает большой импульс всей массе противника, сбивая его с ног. Каратист концентрирует свой удар на очень маленьком участке тела и старается завершить его на небольшой глубине. Поэтому каратист своим ударом легко может разрушить ткани и кости противника.

В кино и по телевидению часто показывают, как каратист рукой разбивает деревянные бруски и кирпичи. Длительности ударов каратиста и боксера составляют 0,005 с и 0,1 с, соответственно.

Возникающие при ударах силы оказываются равными в первом случае нескольким тысячам, а во втором — нескольким сотням ньютонов. Типичные графики зависимости F от t для ударов этих спортсменов приведены на рисунке 2.10, а, б.

Задача 14.21. Удар каратиста характеризуется следующими параметрами: скорость руки в момент удара 12 м/с, масса руки 0,7 кг, время удара $2 \cdot 10^{-3}$ с. По этим данным определите размер области удара (путь, на котором происходит торможение).

С какой высоты безопасно падать Очень интересна и даже в какой-то степени поучительна для молодых людей проблема безопасной высоты падения человека. По расчетам К.Э. Циолковского, она равна примерно удвоенному росту человека. Безопасной она называется потому, что при падении с нее человек остается невредимым. Познакомимся с соображениями, позволяющими вычислить безопасную высоту падения.

Задача 14.22. Какова безопасная высота падения для человека?

Р е ш е н и е

Человек, падающий или прыгающий с некоторой высоты, приземляясь на твердую землю, испытывает значительные напряжения в берцовых костях и особенно в костях голени. Определено (см. § 12), что сила, которую кости голени еще могут выдержать без перелома, равна примерно 10^5 Н.

Эта сила соответствует 130-кратному увеличению веса человека массой 75 кг.

Сила, действующая на кости ног человека, равна произведению массы тела на среднее ускорение, которое возникает при уменьшении скорости до нуля в момент приземления: $F = m\bar{a}$. Скорость v , достигнутая при падении с высоты H из состояния покоя, задается выражением $v^2 = 2gH$. Аналогично и среднее ускорение \bar{a} , характеризующее движение тела от скорости v до 0 на пути h , равно $\bar{a} = \frac{v^2}{2h}$. Сравнив последние выражения, получаем

$$\bar{a} = \frac{gH}{h}.$$

Следовательно, сила, действующая при торможении,

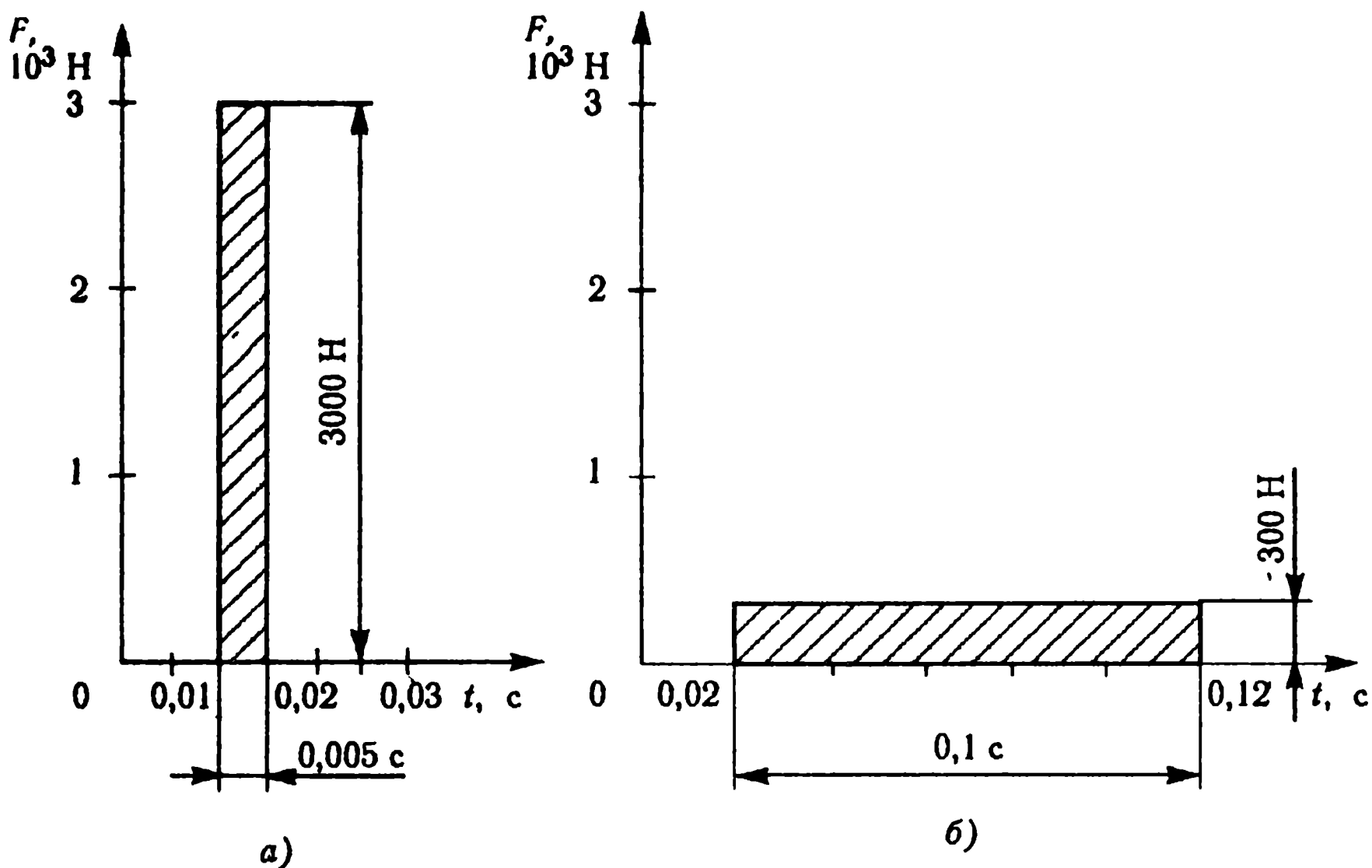


Рис. 2.10

$$F = \frac{mgH}{h}$$

Здесь величина $\frac{H}{h}$ есть отношение высоты падения к расстоянию, на котором происходит торможение тела до полной остановки.

Если человек приземляется на обе ноги жестко, т.е. не сгибая колени, то расстояние h равно примерно 1 см, и, поскольку сила не должна быть больше $130 mg$, получаем, что безопасная высота падения для человека составляет

$$H = \frac{h\bar{a}}{g}; \quad H = \frac{0,01 \cdot 130g}{g} \text{ м} = 1,3 \text{ м.}$$

Участок торможения можно сделать больше, согнув ноги в коленях во время приземления. Если считать расстояние, на которое перемещается при этом центр тяжести, равным 0,5 м, получим

$$H = \frac{0,5 \cdot 130g}{g} \text{ м} = 78 \text{ м.}$$

Многовато, не правда ли? И действительно, при прыжках с таких высот следует учесть, что связки и сухожилия ног человека могут выдержать силу, составляющую $1/20$ от той, при которой еще не ломаются кости. Тогда

$$H = \frac{0,5 \cdot 130g}{20g} \text{ м} = 3,75 \text{ м.}$$

Получили, что предельная безопасная высота падения для человека составляет величину порядка его удвоенного роста.

При приземлении на поверхность из податливого материала, например в воду, в сено, на мягкий снег, на деревья, человек может выдержать значительно большие силы столкновения. Имеются документальные свидетельства о военнослужащих, упавших без парашюта из самолета, летевшего на большой высоте, и оставшихся в живых, потому что приземлились в рыхлый снег или болото.

Аналогичным образом действуют такие страховочные средства при прыжках с больших высот, как натянутый брезент или сетка для спуска гимнастов из-под купола цирка. Во всех этих случаях нужный эффект достигается за счет увеличения пути торможения.

С целью лучшего овладения полученной информацией предлагаем для решения следующие задачи.

Задача 14.23. Человек массой 100 кг прыгнул в плавательный бассейн с высоты 5 м. Требуется 0,4 с, чтобы вода уменьшила его скорость до нуля. С какой средней силой действует вода на человека?

Задача 14.24. Определите среднее усилие, развиваемое ногами человека ростом 180 см, при приземлении его после прыжка с высоты 3 м, если его масса 70 кг.

§ 15. Реактивное движение

Существуют очень серьезные причины для выхода человечества за пределы мира, называемого Земля, в космическое пространство. Одной из них, очевидно, будет нехватка будущим поколениям людей жизненных ресурсов: воздуха, воды, жизненного пространства, полезных ископаемых. Кроме того, получение и использование энергии на Земле, связанные, по современным представлениям, с прогрессом человечества, ведут к тепловому загрязнению окружающей среды, которое не может увеличиваться беспредельно, так как иначе произойдут необратимые изменения климата планеты. В космосе же возможности и получения, и рассеяния энергии несравненно шире.

Для передвижения в космосе из всех известных человечеству способов подходит лишь один — реактивное движение.

В сущности, всякий двигатель, создающий силу тяги, можно назвать реактивным. Человек идет за счет того, что отталкивает назад землю. Самолет летит за счет того, что отталкивает пропеллером воздух.

Полет ракеты Реактивное движение отличается от других тем, что тяга создается за счет истечения части массы движущегося тела. Кроме того, в силу справедливости закона сохранения импульса, сохраняет свое положение в пространстве центр масс системы движущееся тело—истекающая масса.

Наиболее распространенным примером реактивного движения является полет ракеты.

Движение ракеты описывается с помощью уравнения Мещерского, имеющего в проекциях на вертикальную ось вид

$$M \frac{dv}{dt} = -F_{\text{вн}} - u \frac{dM}{dt},$$

где M — масса ракеты вместе с топливом; $\frac{dv}{dt}$ — изменение скорости ракеты; u — скорость истечения газов относительно

ракеты; $F_{\text{вн}}$ — модуль внешней силы, изменяющей импульс системы ракета—газы; $\frac{dM}{dt}$ — скорость потери массы.

Это уравнение очень похоже на второй закон Ньютона. Действительно, слева стоит произведение массы на ускорение, а справа, кроме внешней силы, выражение $u \frac{dM}{dt}$. Это выражение также может быть названо силой — силой реактивной тяги. Как видно из формулы, сила реактивной тяги пропорциональна скорости истечения продуктов реакции из сопла ракеты и расходу массы (массе, отнесенной ко времени).

Для иллюстрации формулы можно предложить следующие задачи.

Задача 15.1. Ракетный корабль испускает раскаленные газы со скоростью 2000 м/с относительно корабля. Чему равна сила тяги, если расход массы равен 100 кг/с?

Задача 15.2. Полностью заправленная топливом ракета имеет массу $2,1 \cdot 10^4$ кг, из которой $1,5 \cdot 10^4$ кг приходится на топливо. Расход топлива в процессе сгорания составляет 190 кг/с, а скорость вылета продуктов сгорания относительно ракеты равна 2800 м/с. При условии, что ракету запускают вертикально вверх, вычислите: а) силу реактивной тяги, действующую на ракету; б) силу, действующую на ракету в момент запуска, а также в момент, предшествующий полному выгоранию топлива. Сопротивлением воздуха пренебречь и считать ускорение свободного падения равным g .

Задача 15.3. Ракета с начальной массой M запущена вертикально вверх. Скорость газов на срезе выходного отверстия двигателя равна u , ежесекундно расходуется топливо массой m . Найдите ускорение ракеты через время t после запуска ракеты.

Реактивные двигатели можно использовать не только для перемещения космических кораблей, но и в качестве автономного двигательного средства для отдельного человека. «Ранцевые» двигатели и «летающие» кресла уже применяются космонавтами на орбите.

Задача 15.4. Человек поддерживается в воздухе на постоянной высоте с помощью небольшого реактивного двигателя за спиной. Двигатель выбрасывает струю газа вертикально вниз со скоростью 1000 м/с относительно человека. Расход топлива поддерживается таким, чтобы в любой момент, пока работает двигатель, реактивная сила уравновешивала вес человека с грузом. Сколько времени человек может продержаться на постоянной высоте, если его масса 70 кг, масса двигателя без топлива 20 кг? Какое расстояние в горизонтальном направлении может пролететь человек, если он разбежался по земле, приобрел горизонтальную скорость 10 м/с, а затем включил двигатель, поддерживающий его в воздухе на постоянной высоте?

Формула Циолковского Переходя к рассмотрению очень интересного вопроса о наибольшей достижимой скорости движения космических аппаратов на химическом топливе, можно создать проблемную ситуацию, используя следующую задачу.

Задача 15.5. Какую максимальную скорость может приобрести ракета при полном сгорании всего запасенного топлива?

Р е ш е н и е

Обозначим массу ракеты вместе с топливом M_0 , запас топлива m ; после сгорания топлива масса ракеты станет равной $M = M_0 - m$. Будем считать для простоты, что на систему не действуют внешние силы. Полагая $u = \text{const}$ и разделив переменные, перепишем уравнение Мещерского в виде

$$\frac{dv}{u} = -\frac{dM}{M}.$$

Проинтегрировав его с учетом того, что скорость ракеты меняется от v_0 до v_{max} , а масса от M_0 до M , получаем

$$\int_{v_0}^{v_{\text{max}}} dv = -\int_{M_0}^M \frac{u dM}{M},$$

или

$$v_{\text{max}} - v_0 = -u \ln \frac{M_0}{M}.$$

Окончательно будем иметь

$$v_{\text{max}} = v_0 + u \ln \frac{M_0}{M}.$$

При разгоне от $v_0 = 0$ получаем

$$v_{\text{max}} = u \ln z,$$

где $z = \frac{M_0}{M}$ — число Циолковского, а сама формула называется формулой Циолковского.

Задача 15.6. По данным задачи 15.2 определите скорость ракеты в момент выгорания топлива.

В результате расчетов можно получить, что развиваемая этой ракетой скорость гораздо меньше первой космической (примерно 8 км/с) (см. § 19). В действительности из-за влияния тяготения Земли и аэродинамического сопротивления атмосферы скорость ракеты в момент полного выгорания топлива и прекращения работы двигателей оказывается еще меньше.

Из анализа формулы Циолковского видно, что увеличивать скорость ракеты можно несколькими путями: либо увеличивая u , либо увеличивая z — относительную массу ракеты.

Задача 15.7. Какая часть первоначальной массы ракеты на химическом топливе выйдет за пределы земного тяготения?

Р е ш е н и е

При подстановке значения $u = 4 \cdot 10^3$ м/с в формулу Циолковского, получаем:

$$\frac{M_0}{M} = \exp \frac{v_{\max}}{u}; \quad \frac{M_0}{M} = \exp \frac{8 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} = 7,39.$$

При худших сортах топлива ($u = 1000$ м/с) $\frac{M_0}{M} = 2980$ — почти вся масса ракеты приходится на топливо.

Задача 15.8. Определите $\frac{M_0}{M}$ для достижения второй и третьей космических скоростей (11,2 км/с и 16,7 км/с).

Полученные в результате решения этой задачи значения $\frac{M_0}{M} = 17$ и $\frac{M_0}{M} = 64$ не очень велики. Но необходимость иметь в ракете запас топлива на обратный путь, на коррекцию траектории и торможение, сильно ухудшает ситуацию.

Задача 15.9. Каким должно быть отношение $\frac{M_0}{M}$ для ракеты, готовой совершить перелет на Марс и обратно?

Р е ш е н и е

Для Марса первая космическая скорость имеет почти такое же значение, как и для Земли. Тогда полет в одну сторону потребует выполнения условия $\frac{M_0}{M} \approx 60$. Для полета

в обратном направлении $\frac{M_0}{M} = 60$. Здесь под M понимается

масса ракеты, достигшей Марса. Окончательно $\frac{M_0}{M} \approx 3600$.

Получается, что для осуществления межпланетных полетов запас топлива должен превышать массу корабля в несколько тысяч раз.

Проблема получения максимальной скорости ракеты на химическом топливе свелась к проблеме снижения затрат топлива (уменьшения доли массы топлива в общей массе ракеты). Из формулы Циолковского следует, что этого можно добиться несколькими способами.

Первый способ заключается в создании многоступенчатой ракеты, в которой последовательно отбрасываются ступени, содержащие баки для топлива, после его сгорания.

Формула Циолковского в случае многоступенчатой ракеты с одинаковым числом z у всех ступеней имеет вид

$$v_{\max} = n u \ln z.$$

Задача 15.10. Какую часть массы ракеты должна составлять масса горючего, чтобы ракета, взлетая вертикально, приобрела в конце работы двигателя скорость 7,9 км/с? Как повлияет на ответ тот факт, что ракета имеет 2 ступени; 3 ступени?

Задача 15.11. Найдите наиболее выгодные параметры двухступенчатой ракеты, при которых заданному полезному грузу была сообщена заданная скорость. Пусть масса полезного груза 500 кг, заданная скорость 8 км/с, скорость истечения газов 2 км/с. Примите, что по конструктивным требованиям масса каждой ступени ракеты без горючего составляет 10% от массы горючего этой ступени.

Второй способ увеличения тяги ракеты заключается в параллельном соединении нескольких ракетных двигателей. Эта идея принадлежала С.П.Королеву, и ее успешная реализация способствовала достижению нашей страной выдающихся успехов в освоении космоса.

При этом необходимо, однако, помнить о том, что уменьшение времени ускорения, достигаемое при форсированной работе двигателей ракеты, приводит к росту перегрузок, опасных не только для космонавтов, но и для самой ракеты.

Несколько иначе обстоит дело с увеличением скорости истечения продуктов сгорания u .

Скорость истечения газов ограничена: ее значение опре-

деляется выражением $u \approx \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, где T — абсолютная темпе-

ратура газа; μ — молярная масса газа.

При использовании в качестве горючего самого легкого газа — атомарного водорода — и нагреве газа до 2000 К максимальная достижимая скорость современных ракет на химическом топливе не будет превышать 4—5 км/с [15, 213].

Задача 15.12. Оцените перспективы использования ракет на химическом топливе для достижения звездных миров. Допустим, что скорость истечения газов 10 км/с (что для химического топлива сильно завышено) и ракета должна достичь скорости 0,25 с. Определите отношение $\frac{M_0}{M}$ ракеты после достижения ею этой скорости.

Р е ш е н и е

$$v = u \ln \frac{M_0}{M}; \quad \frac{M_0}{M} = \exp \frac{v_{\max}}{u},$$

$$\frac{M_0}{M} = \exp \frac{0,25 \cdot 3 \cdot 10^8}{10^4} = 5 \cdot 10^{3327}.$$

Получим, что на каждую тонну полезного груза должно приходиться $5 \cdot 10^{3327}$ т топлива. Это отношение фантастично, так как даже отношение массы Вселенной к массе электрона меньше этого числа (см. § 1).

Низкая скорость ракет на химическом топливе накладывает серьезные ограничения на межзвездные перелеты. Полет к ближайшей к Земле звезде α Центавра со скоростью космического корабля, доставившего на Луну американских астронавтов, занял бы несколько тысяч лет.

Глава 3

РАБОТА. ЭНЕРГИЯ. МОЩНОСТЬ

§ 16. Механическая работа

Механическая работа — физическая величина, являющаяся характеристикой процесса действия силы на движущееся тело на некотором перемещении.

Понятие работы можно проиллюстрировать с антропоцентрической точки зрения следующим образом.

Прежде всего следует отметить двойственный смысл, который вкладывается в содержание термина «работа», т.е. обратить внимание на различие понятия работы в физическом и житейском смысле слова. Это различие можно разъяснить с помощью следующей задачи.

Задача 16.1. Человек, стоящий неподвижно, удерживает в руке груз. Совершает ли он механическую работу?

Р е ш е н и е

Организм человека (а также животных) имеет два механизма сопротивления механическим нагрузкам. Его инертные части: зубы, кости, волосы — воспринимают нагрузку точно так же, как и любое неживое твердое тело (см. § 12).

Но живой организм как целое ведет себя по-другому. Люди и животные способны сопротивляться приложенным силам: они напрягают свои мышцы в зависимости от того, что требует сложившаяся ситуация, — отталкивают или тянут что-то.

В отличие от неодушевленного предмета человек всегда, даже когда стоит неподвижно, производит направленные, хотя и бессознательные, подстроечные операции в мышцах тела. Это происходит следующим образом.

Мозг человека непрерывным потоком посылает волокнам мышц руки, удерживающей груз, электрические импульсы — управляющие сигналы. Получившее сигнал мышечное волокно сокращается, а затем опять расслабляется. При работе мышцы в нее сплошным потоком идут нервные импульсы и множество волокон сокращается, пока другие отдыхают.

Однако сохранение биомеханического напряжения мышц требует непрерывного расходования энергии, приводящего в конечном счете к усталости мышц. Это можно даже увидеть: когда рука устает держать груз, она начинает дрожать. Происходит это потому, что потоки импульсов от мозга нерегулярны и уставшие мышцы не успевают вовремя на них реагировать. При накоплении мышечной усталости человек может уронить груз, упасть, потерять сознание. Чтобы этого не произошло, человек должен либо прекратить работу, либо принять пищу для восполнения потерь энергии.

Таков механизм действия поперечнополосатых мышц человека и животных. Но природа позаботилась и о другом варианте устройства мышц: это гладкие мышцы, из которых сделаны стенки внутренних органов тела животных и человека. В отличие от быстродействующих поперечнополосатых мышц гладкие мышцы действуют очень медленно и независимо от нашей воли. Кроме того, они обладают свойством «цепенеть», замирать, и для поддержания их в таком состоянии не нужно никакой энергии. Существует предположение, что такими мышцами было бы более удобно поднимать грузы. Почему природа предпочла первый механизм второму, создавая наши конечности, можно только догадываться. Может быть, все дело именно в быстродействии и способности управления.

Задача 16.2. Человек поднимает груз массой 10 кг на высоту 1 м, переносит его по горизонтали на расстояние 10 м и опускает. Чему равна работа, совершенная человеком на каждом этапе, и какова полная работа по перемещению груза?

Задача 16.3. Человек поднимается по лестнице. Какую работу он совершает при подъеме на каждую ступеньку?

Задача 16.4. Человек тянет груз по горизонтальной поверхности с постоянной силой, направленной под углом 30° к горизонту. Чему равна эта сила, если каждую секунду он совершает работу 100 Дж, а скорость перемещения человека с грузом составляет 1,5 м/с?

Задача 16.5. Вращая педали велосипеда, велосипедист во время каждого нажатия на педали действует на них с силой 85 Н, направленной вертикально вниз. Если диаметр окружности, описываемой каждой педалью, равен 36 см, то какая работа совершается при каждом нажатии на педаль?

Задача 16.6. Велосипедист собирается въехать на холм высотой 100 м и уклоном 10° . Считая массу велосипедиста вместе с велосипедом равной 80 кг, вычислите работу, которую необходимо совершить против силы тяжести. Если при каждом полном обороте педалей велосипедист должен продвинуться вперед на 5,1 м, то какую среднюю силу нужно приложить к педалям по касательной к их движению по окружности? Трением и

другими источниками потерь энергии пренебречь. Педали вращаются по окружности диаметром 36 см.

Задача 16.7. Как зависит совершаемая человеком работа от его линейных размеров?

Р е ш е н и е

Оценим работу, которую человек должен совершить, чтобы поднять руку вверх. Нетрудно подсчитать, что $A = mgh$. Но $m \sim L^3$, $g = \text{const}$, $h = \text{const}$. Следовательно, $A \sim L^3$.

Мышечная сила F пропорциональна площади сечения мышцы, т.е. $F \sim S \sim L^2$.

Поскольку $A = FL$, получается, что работа не зависит от размеров существа, совершающего ее.

Действительно, работа определяется произведением силы на расстояние. Оценим силу, которую может создавать мышца, а затем расстояние, на которое укорачивается мышца при работе. Это даст нам работу, которую производит мышца при одиночном сокращении.

Максимальное напряжение, которое может создать любая мышца, определяется внутренней структурой мышечных волокон (филаментов). Оно составляет примерно 300—400 кПа и не зависит от размеров тела, это напряжение одинаково для всех животных [51, 179].

Степень сокращения скелетной мышцы не зависит от размеров тела. Максимальное относительное сокращение, или растяжение, по-видимому, составляет примерно 0,3.

Из этого мы можем заключить, что максимальная работа, производимая при одном сокращении в пересчете на единицу объема мышцы, не зависит от L . Кстати, этот факт подтверждается еще и тем, что плотность филаментов постоянна у всех животных независимо от их размеров.

Работа, совершаемая человеком, обладает важной особенностью: в одних и тех же условиях человек может работать с разной эффективностью. Для иллюстрации вышесказанного рассмотрим следующую задачу.

Задача 16.8. Определите эффективность процесса: человек массой 70 кг поднимается в гору с грузом массой 20 кг.

Р е ш е н и е

Коэффициент полезного действия $\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}}$.

$A_{\text{п}} = mgh$, где h — высота поднятия груза; m — масса груза.

$A_{\text{з}} = (m + M)gh$, где M — масса человека.

$$\text{Тогда } \eta = \frac{mgh}{(m+M)gh} = \frac{m}{m+M}.$$

Получили, что коэффициент полезного действия пропорционален массе поднимаемого груза.

§ 17. Кинетическая энергия

Кинетическая энергия человека и предметов из его окружения Тема «Кинетическая энергия» позволяет наполнить ее гуманитарной проблематикой путем включения задач на расчет кинетической энергии по-разному движущегося человека и предметов из его окружения, а также задач на применение теоремы о связи энергии и работы.

Задача 17.1. Чему равна кинетическая энергия поступательного движения Земли, движущейся со скоростью $3 \cdot 10^4$ м/с по орбите вокруг Солнца? Считайте Землю материальной точкой.

Задача 17.2. Чему равна кинетическая энергия человека, бегущего изо всех сил?

Задача 17.3. Чему равно изменение кинетической энергии человека, быстро бегущего и внезапно остановившегося? Чему равна в этом случае работа силы трения подошв ног человека о землю? Какую работу совершает человек для остановки?

Задача 17.4. Какова кинетическая энергия прыгуна в длину в наивысшей точке траектории прыжка?

Задача 17.5. Чему равна кинетическая энергия мяча массой 300 г, если его бросили со скоростью 40 м/с?

Задача 17.6. Утверждают, что чемпион мира по пинг-понгу может сообщить шарик кинетическую энергию, примерно равную 1 Дж. С какой скоростью должен быть подан шарик?

Задача 17.7. Игрок бросает мяч массой примерно 150 г со скоростью 150 км/ч в горизонтальном направлении. Какая кинетическая энергия передана игроку, поймавшему мяч?

Задача 17.8. Какую работу против силы трения совершает человек, изменяя свою скорость во время спурта на последних метрах 800-метровой дистанции от 6,9 до 8 м/с?

Задача 17.9. Футболиста массой 80 кг, бегущего со скоростью 5 м/с, останавливает защитник другой команды в течение 1,0 с. Какова была первоначальная кинетическая энергия футболиста? Какая средняя мощность потребовалась, чтобы остановить его?

Значение кинетической энергии может быть использовано для оценки результатов столкновения двух тел. Раньше мы

рассматривали эту проблему в § 14, изучая тему «Импульс. Закон сохранения импульса» с точки зрения импульса. Силу, действующую на тела при столкновении, мы определяли через время взаимодействия t . Можно, оказывается, делать такие же расчеты, пользуясь понятием кинетической энергии. Только при этом в качестве «критического» параметра необходимо использовать тормозной путь s .

Задача 17.10. Бейсбольный мяч массой 140 г, движущийся со скоростью 30 м/с, попав в руку игрока, отводит ее назад на 35 см. Чему равна сила, действующая на руку игрока со стороны мяча?

Задача 17.11. Сравните между собой величины $p = mv$ и $W = \frac{mv^2}{2}$. Как они связаны друг с другом? Какая из них полезнее? Нужны ли они обе?

При рассмотрении биологических объектов — животных и человека — теорема о связи работы и кинетической энергии может быть проиллюстрирована следующим образом.

Так как $\frac{mv^2}{2} = Fs$, то $F = \frac{mv^2}{2s}$, т.е. развиваемая при столкновении тел сила тем больше, чем больше энергии запасено в теле или чем меньше путь, на котором она расходуется. И наоборот, тем большую энергию можно запасти, чем дольше понемногу работать или работать на большем пути, притом что сила удара тем больше, чем тверже сталкивающиеся тела. Поэтому в живой природе имеют место следующие закономерности: 1) все ударные орудия (рога, бивни, клыки) должны быть из твердого материала; 2) удар по мягкой ткани воспринимается менее болезненно, чем по твердой части — кости, суставу; 3) искусственно удлиняя путь торможения, можно ослабить силу удара. Этим объясняется действие пружины, рессоры, суставов (при сгибании ног в конце прыжка).

Упругий и неупругий удары Понятие кинетической энергии используется при рассмотрении таких физических явлений, как упругий и неупругий удары.

Упругий удар характеризуется тем, что после него взаимодействующие тела разлетаются, перераспределив свои скорости пропорционально массам, а потери энергии не происходит.

При неупругом ударе тела после взаимодействия продолжают двигаться вместе, энергия теряется на взаимную деформацию. При этом потеря энергии (и связанная с ней

деформация) тем больше, чем больше относительная скорость взаимодействующих тел.

Задача 17.12. Какой вариант столкновения автомобилей вы считаете более опасным (в смысле возможных повреждений) для находящихся в них пассажиров: когда автомобили после столкновения разлетаются в стороны или когда они продолжают движение как единое целое?

Задача 17.13. Для пассажира автомобиля, попадающего в дорожное происшествие, решающим фактором является изменение скорости.

Предположим, что движущийся со скоростью 30 км/ч по обледенелой дороге большой автомобиль массой 2 т, сталкивается «в лоб» с малолитражкой массой 1 т, движущейся навстречу со скоростью 30 км/ч. В результате столкновения автомобили оказываются сцепленными. Примите, что по обледенелой дороге они скользят без трения. Чему равно изменение скорости каждого автомобиля?

Задача 17.14. Какая кинетическая энергия «теряется» при столкновении грузовика с легковым автомобилем? Примите, что масса грузовика 15 т, масса легкового автомобиля 1,5 т, их скорости равны каждая 100 км/ч и направлены навстречу друг другу.

Задача 17.15. Метеорит массой $m = 10^8$ кг сталкивается с Землей ($M = 6 \cdot 10^{30}$ кг) при скорости $v = 15$ м/с и застревает в ней. Какую скорость отдачи получила Земля? Какая доля кинетической энергии метеорита перешла в кинетическую энергию Земли? На сколько изменилась кинетическая энергия Земли в результате этого столкновения?

Пользуясь законом сохранения импульса и формулой кинетической энергии, можно показать, что при упругом взаимодействии двух тел не только скорости, но и кинетические энергии распределяются обратно пропорционально массам тел.

Поэтому при выстреле пуля получает гораздо большую энергию, чем отдающее ружье. При ходьбе затрачиваемая человеком энергия практически полностью расходуется на перемещение тела.

Задача 17.16. Почему из всех видов перемещения: плавание, полет, ползание — природа наделила человека способностью ходить?

Р е ш е н и е

Для ответа на этот вопрос вычислим, какую энергию приобретает в результате ходьбы человек; Земля. Как относятся эти величины?

Поскольку масса Земли очень велика по сравнению с массой человека, вся кинетическая энергия будет использована им на перемещение своего тела. Земля же приобретет скорость, практически равную нулю, а вместе с ней нулевую кинетическую энергию.

Иначе обстоит дело, когда человек плавает. Движения рук и ног смещают назад несколько десятков килограммов

воды, на что расходуется приблизительно столько же энергии, сколько на сообщение скорости самому пловцу.

Еще менее выгодно использование энергии при полете. Здесь отбрасываемая масса (масса воздуха) имеет совсем малое значение. Затраты энергии на движение будут почти полностью связаны с отбрасыванием воздуха, а не перемещением летящего тела.

«Энергетика» бега Следующий вопрос, который можно рассмотреть в связи с изучением физики человека,— «энергетика» бега.

Задача 17.17. Как зависит скорость бегуна от его размеров?

Р е ш е н и е

При беге энергия, накопленная в теле бегуна в результате принятия пищи, расходуется несколькими путями:

превращается во внутреннюю энергию;

тратится на движение центра масс бегуна вверх-вниз (если под бегом понимать систему последовательных прыжков);

тратится на отталкивание от земли;

тратится на поддержание поступательного движения тела человека в направлении вперед.

При этом ноги человека, масса которых составляет примерно половину массы тела, совершают полезную работу по поддержанию этого движения:

$$A = Fd = \frac{mv^2}{2},$$

где F — сила мышц ног; v — скорость тела; d — расстояние, на которое перемещается тело при каждом шаге.

Но $F \sim L^2$; $d \sim L$; $m \sim L^3$.

Следовательно,

$$v^2 \sim \frac{Fd}{m} \sim L^2 \frac{L}{L^3} = \text{const.}$$

Получили, что скорость v не зависит от размеров тела. Аргументом в подтверждение этого результата является таблица 3.1.

В действительности этот анализ относится не только к человеку. Все животные с аналогичными формами будут иметь сравнимые скорости бега независимо от размеров. За исключением данных о человеке максимальная и минимальная скорости отличаются менее чем вдвое.

Скорости бега животных

Животное	Скорость, м/с	Животное	Скорость, м/с
Гепард	30	Заяц	18
Газель	28	Волк	18
Страус	23	Гончая собака	16
Лисица	20	Человек	11
Лошадь	19		

Люди — плохие бегуны, поскольку их движение обеспечивается мышцами, целиком сосредоточенными в ногах. Слишком велика масса, которая должна быть ускорена и заторможена. Самые быстроходные животные имеют худые ноги, а основная мышечная масса сосредоточена у них в теле.

Если бы скорости бега животных действительно не зависели от их размеров, то природный баланс между охотником и добычей нарушился бы. Заметим, что волк и заяц имеют почти одинаковые скорости бега, что верно и в случае гепарда и газели. Большие кошки не обладают худыми ногами гепарда и имеют значительно меньшие скорости бега. Большие мышцы ног этих кошек приспособлены для прыжков (т.е. больших ускорений), а не для быстрого бега. Они ловят добычу, бросаясь на нее, после того как тихо подкрадутся. Если лев (главный охотник) не сможет поймать свою добычу после внезапного броска и погони в несколько прыжков, он вернется и будет терпеливо поджидать более счастливой возможности.

Вероятно, на какой-то стадии своей эволюции люди отказались от использования при передвижении четырех конечностей и стали ходить прямо. Считается, что за изменение функций верхних конечностей люди заплатили проигрышем в эффективности бега. Однако современные эксперименты показывают, что переход к прямохождению не слишком сильно влияет на эффективность бега. Группа шимпанзе была выдрессирована бегать как на двух, так и на четырех конечностях. Измерения потребления кислорода показали, что бег с одинаковой скоростью при использовании любого стиля требует одинаковой мышечной работы. Следовательно, низкая скорость бега у людей по сравнению с другими животными не является результатом использования двух ног [6, 132].

Вопрос об энергетической эффективности бега человека будет рассмотрен в § 21.

§ 18. Потенциальная энергия упругодеформированного тела

При изучении этой темы можно выйти на вопросы гуманитарной проблематики следующим образом.

Сила упругости была второй после силы тяжести сознательно используемой человеком в практических целях. Известно, что одним из древнейших видов охоты людей был способ, основанный на поражении животного каменной глыбой, сброшенной с большой высоты. Очевидна низкая эффективность этого вида охоты: для его успешной реализации необходимо было стечение многих обстоятельств. В частности, нужно было, чтобы животное оказалось точно на месте падения глыбы.

Но можно было «разрушительную силу», которой обладает поднятый на высоту камень, «запаси» в специальных устройствах: компактных, легкотранспортируемых, находящихся всегда под рукой. Речь идет о древних видах оружия человека — праще и луке.

«Разрушительная сила» пращи создавалась за счет упругой скрутки растительных волокон и кожи; «разрушительная сила» лука, как известно, создается туго натянутой тетивой, в древности изготавливаемой из сухожилий животных.

На языке современной физики «разрушительная сила» древних — потенциальная энергия, или, иначе, запасенная, законсервированная в теле способность совершать работу. При этом легко видеть, что во всех трех рассмотренных случаях имеется в виду одна и та же энергия, различающаяся лишь способами ее запасания, или аккумуляции. Оказывается, что выбор того или иного способа не имеет принципиального значения, а определяется удобством использования.

Потенциальная энергия упругодеформированного тела $W = \frac{kx^2}{2}$. Так как $F = kx$, то $W = \frac{F^2}{2k}$. Из последней формулы видно, что, воздействуя с одной и той же силой на упругие тела (растягивая с одной и той же силой разные пружины), мы сообщаем им разные потенциальные энергии. Чем жестче пружина, тем меньше W , и наоборот. Последнее обстоятельство широко используется в технике при устройстве рессор, предназначенных для гашения толчков транспортных средств при движении по неровностям дороги. Автомобильные рессоры играют роль резервуаров энергии, позволяющих

временно запасать энергию в виде потенциальной, смягчая при езде по неровной дороге удары и предохраняя экипаж от разрушения, а пассажиров от травм. Также и амортизатор шасси самолета при посадке, сжимаясь, должен произвести большую работу, гася вертикальную скорость самолета. В амортизаторе, изготовленном из вещества с малой жесткостью, сжатие будет больше, зато возникающая сила упругости будет меньше и самолет будет предохранен от разрушения [7, 195].

Оказывается, сухожилия, в частности ахилловы сухожилия на ногах, играют роль рессор при движении человека [30, 66].

Сухожилия представляют собой части мышц, которыми последние крепятся к костям и коже. Общая масса их в теле человека 0,5 кг. Состоят сухожилия из плотной соединительной ткани и почти нерастяжимы. Насколько эффективно может работать это изобретение живой природы, можно понять, рассмотрев таблицу 3.2.

Сравнение биологических материалов с искусственными, например сухожилий и стали, показывает, что у сухожилий запас энергии, отнесенный к единице массы, примерно в 20 раз больше, чем у стали. Последнее обстоятельство еще раз подтверждает, что природа для решения своих технических задач изобрела лучшие материалы, чем человек.

Таблица 3.2

Способность материалов запасать потенциальную энергию упругой деформации

Материал	Относительная рабочая деформация, %	Рабочее напряжение, МПа	ρ , кг/м ³	Запас энергии, Дж/кг
Железо древних	0,03	70	7800	1,3
Современная пружинная сталь	0,3	700	7800	130
Бронза	0,3	400	8700	70
Древесина тиса	0,9	120	600	900
Сухожилие	8,0	70	1100	2500
Роговая ткань	4,0	90	1200	1500
Резина	300	7	1200	800

Задача 18.1. Оцените потенциальную энергию, которую может запасти 1 кг сухожилий.

Рассмотрим еще одно гуманитарное приложение темы — удары спортсменов.

Задача 18.2. Известно, что мастера-каратисты могут так концентрировать энергию своего удара, что оказываются способными разбить деревянный брусок, стопку кирпичей, бетонный блок. Как велика должна быть энергия, необходимая для этого? Как может рука разбивать прочные предметы?

Р е ш е н и е

Энергия, необходимая для деформации бетонного блока, может быть найдена следующим образом:

$$W = \frac{kx^2}{2}; \text{ но } k = \frac{ES}{x}, \Delta x = \frac{\sigma x}{E},$$

где в соответствии с законом Гука $\sigma = E\varepsilon$ ($\sigma = \frac{F}{S}$ — напряжение; $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$ — относительная деформация).

$$\text{Тогда } W = \frac{\varepsilon V \sigma}{2}, \text{ или } W = \frac{V \sigma^2}{2E}.$$

Таким образом, получаем, что для деформации бетонного блока размером $0,4 \times 0,2 \times 0,05$ м ($V = 0,004$ м³) при

$$E = 1,65 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \sigma = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

необходимо затратить энергию, равную

$$W = \frac{0,004(2,1 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 1,65 \cdot 10^{10}} \text{ Дж} = 0,53 \text{ Дж}.$$

Скорость движения руки каратиста 12 м/с, ее масса 0,7 кг. Энергия, передаваемая в момент удара,

$$W' = \frac{mv^2}{2}; W' = \frac{0,7 \cdot 12^2}{2} \text{ Дж} = 50 \text{ Дж}.$$

Получили, что рука каратиста обладает в момент удара достаточным запасом энергии, чтобы разрушить бетонный блок.

То, что рука каратиста не ломается при ударе о кирпич, частично объясняется большой прочностью кости по сравнению с бетоном. Высокоскоростная съемка показывает, что замедление кулака каратиста в момент удара составляет по модулю 4000 м/с². Поэтому сила, действующая на кулак в момент удара, $F = 2800$ Н. Если весь кулак в момент удара заменить костью длиной 6 см и диаметром 2 см, фиксированной в двух крайних точках, а удар о блок моделировать силой, действующей на ее середину, то в таких

условиях кость может выдержать 25 000 Н. Это приблизительно в 8 раз больше, чем сила, действующая на кулак каратиста при разрушении бетонного блока. Однако возможности у руки каратиста противостоять таким ударам еще больше, так как в отличие от бетонного блока она не поддерживается по краям и удар приходится точно в середину. Кроме того, между костью и блоком всегда находится эластичная ткань, амортизирующая удар.

С рассмотренным выше вопросом связан вопрос о видах скелетов живых организмов. Как известно, в природе существуют два вида скелетов: наружный (например, у насекомых) и внутренний (у животных и человека).

Анализ достоинств и недостатков внешнего и внутреннего скелетов, проведенный на основе фундаментальных законов механики, позволяет сделать вывод, что наружный скелет превосходит внутренний по устойчивости на изгиб и скручивание. Однако, когда речь идет о воздействии внешних сил, ситуация меняется. В этом случае наружный скелет неудобен, в особенности для больших и подвижных животных, какими являются позвоночные.

Кинетическая энергия, переходящая в момент удара в энергию деформации, пропорциональна квадрату скорости, поэтому скорость в данном случае особенно важна. Внутренний скелет страдает во время удара гораздо меньше, поскольку мышечные ткани могут поглотить большее количество энергии без серьезных повреждений.

§ 19. Потенциальная энергия тел, взаимодействующих посредством тяготения

Энергия гравитационного взаимодействия Гравитационное взаимодействие тел и связанная с ним потенциальная энергия, по видимому, были первыми физическими реалиями, которые приходилось учитывать древнему человеку. Удар тяжелой дубиной прекращал сопротивление раненого зверя; валун, сброшенный с утеса, поражал нападающего врага и т.д. и т.п.

Формула для потенциальной энергии тела массой m в поле тяготения, созданного телом массой M , имеет вид

$$W = -\frac{GMm}{r},$$

где r — расстояние между центрами взаимодействующих тел; G — гравитационная постоянная.

Задача 19.1. Найдите потенциальную энергию следующих систем: а) человека массой 70 кг и Земли; б) Луны и Земли; в) Земли и Солнца.

Задача 19.2. Найдите энергию тела массой 1 кг на поверхности Земли.

Задача 19.3. Вычислите, во сколько раз кинетическая энергия спутника, движущегося по круговой траектории вблизи Земли, меньше его потенциальной энергии.

Задача 19.4. Планета Солнечной системы, двигаясь по круговой орбите, внезапно теряет свою круговую скорость. Рассчитайте скорость, с которой она упадет на Солнце.

Задача 19.5. Расстояние между Землей и Солнцем в течение года изменяется в пределах $1,471 \cdot 10^8$ — $1,521 \cdot 10^8$ км. Каким при этом будет общее изменение: а) потенциальной энергии; б) кинетической энергии; в) полной энергии?

Задача 19.6. Предположим, что механическая энергия системы искусственный спутник—Земля уменьшается вследствие потерь на трение на 2%. Принимая, что орбита спутника до и после потери энергии мало отличается от окружности, вычислите, как изменится при потере 2% энергии: а) радиус орбиты; б) скорость спутника; в) период обращения.

Задача 19.7. Получите формулу для потенциальной энергии тела массой m , находящегося на высоте h над поверхностью Земли.

Р е ш е н и е

Вычислим работу по перемещению тела массой m с поверхности Земли на высоту h :

$$A = \Delta W = -GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Поскольку

$$\frac{GMm}{R^2} = g \quad (R \text{ — радиус Земли}), \text{ то } \Delta W = -mgR^2 \left(\frac{1}{R+h} - \frac{1}{R} \right).$$

Вблизи поверхности Земли, где $\frac{R}{r} \leq 1$, $Rh \ll R^2$.

$$\text{Тогда } \Delta W = -mgR^2 \left(\frac{1}{R+h} - \frac{1}{R} \right) \approx mgh.$$

Задача 19.8. Чему равно изменение потенциальной энергии человека при его прыжке на максимальную высоту?

Одной из возможных форм освоения околосолнечного пространства человеком может быть, по мнению некоторых

ученых, изменение радиуса орбит некоторых планет Солнечной системы. Целью такого преобразования может быть улучшение теплового режима планеты, более эффективное использование солнечной энергии на ее поверхности, приближение источников сырьевых ресурсов непосредственно к месту их потребления [49, 194].

Задача 19.9. Оцените работу, которую необходимо совершить, чтобы перевести Марс и Венеру на орбиту Земли.

Еще более важной и актуальной в цикле работ по преобразованию Солнечной системы будет, по-видимому, «разборка» планет и астероидов с целью использования их вещества (например, для создания «сферы Дайсона» или «раковины Покровского»).

Задача 19.10. Оцените работу, затраченную на «полную» разборку Луны.

Р е ш е н и е

Для простоты расчетов будем считать Луну шаром с равномерно распределенной плотностью $\rho = \frac{3M}{4\pi R^3}$.

Потенциальная энергия частиц планеты, взаимодействующих силами тяготения, равна работе, которую необходимо затратить, чтобы все вещество ее рассеять в окружающем пространстве. Будем производить «разборку» планеты, последовательно убирая один слой ее вещества за другим. При этом по-прежнему будем считать, что сферически однородный слой вещества не создает в ограниченной им шаровой полости никакого гравитационного поля.

В слое толщиной dr на расстоянии r от центра шара (рис. 3.1) содержится масса $dm = \rho 4\pi r^2 dr$. При удалении этого слоя на него действует лишь шар радиусом r .

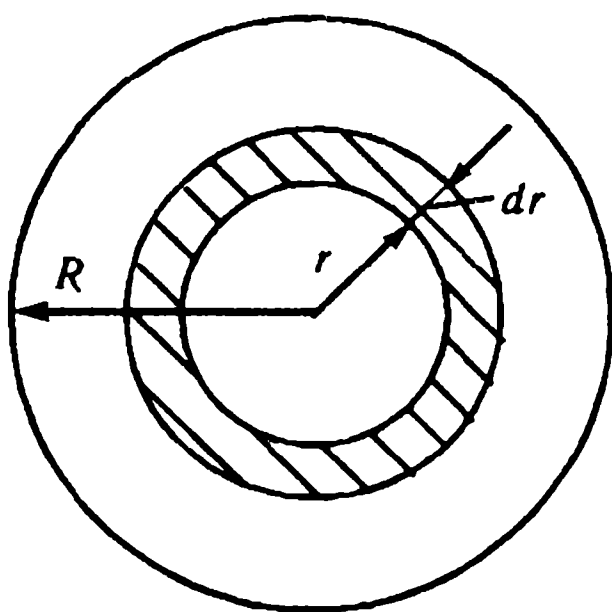


Рис. 3.1

Работа удаления равна изменению потенциальной энергии этого шарового слоя в гравитационном поле, созданном всеми внутренними слоями:

$$dW = -\frac{GMm}{r}dr = -G\frac{4\pi r^3}{3}\frac{4\pi r^2 dr}{r}.$$

Интегрируя это выражение по всему объему шара, т.е. от $r = 0$ до $r = R$, получим потенциальную энергию шара:

$$W = -\frac{G \cdot 16\pi^2}{15} \cdot \frac{9M^2}{(4\pi R^3)^2} R^5 = -\frac{3GM^2}{5R}.$$

Для Луны $M = 7,5 \cdot 10^{22}$ кг; $R = 1,7 \cdot 10^6$ м.

Тогда $A = W = -12,5 \cdot 10^{28}$ Дж.

По физическому содержанию формула $W = -\frac{3GM^2}{5R}$ выражает потенциальную энергию шара. Интересны ее астрофизические приложения.

Задача 19.11. Предположим, что правы Гельмгольц и Кельвин, предполагавшие, что звезды светятся за счет энергии, выделяющейся при их гравитационном сжатии. При сжатии звезды потенциальная энергия вещества, падающего к центру, переходит в кинетическую, а следовательно, во внутреннюю энергию вещества. Может ли это явление обеспечить длительное и постоянное свечение звезды?

Р е ш е н и е

Время сжатия звезды под действием гравитационных сил легко оценить. Действительно, потенциальная энергия Солнца $W = 2,28 \cdot 10^{41}$ Дж. В настоящее время мощность излучения Солнца составляет $3,86 \cdot 10^{26}$ Вт. Если считать, что скорость излучения Солнца не менялась во времени, то возраст Солнца будет равен

$$t = \frac{2,28 \cdot 10^{41}}{3,86 \cdot 10^{26}} \text{ с} \approx 5,7 \cdot 10^{14} \text{ с} \approx 1,9 \cdot 10^7 \text{ лет.}$$

С учетом реального распределения плотности Солнца получим $6 \cdot 10^7$ лет. Но и это число слишком мало. Возраст Земли, по геологическим оценкам, составляет 4—4,5 млрд. лет. Возраст Солнца не может быть меньше. Это показывает, что гравитационное сжатие является слишком слабым источником, чтобы компенсировать потери энергии Солнцем на излучение. В действительности источником энергии звезд и Солнца являются ядерные реакции, идущие в их недрах.

Следует, однако, отметить, что гравитационное сжатие становится основным источником энергии на более поздних стадиях эволюции звезд: для белых карликов, нейтронных звезд (пульсаров), черных дыр (коллапсаров) [37, 310].

Космические скорости

Представление о потенциальной энергии используется для вычисления многих важных характеристик окружающего человека мира. В частности, с его помощью рассчитываются космические скорости.

Первой космической скоростью называется скорость полета по круговой орбите радиусом, равным радиусу Земли. В этом случае центростремительное ускорение равно ускорению свободного падения на поверхности Земли: $\frac{v^2}{R} = g$.

При $R = 6400$ км и $g = 9,8$ м/с² получаем

$$v_I = \sqrt{gR}; v_I = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Второй космической скоростью называется скорость, которую должно иметь тело у поверхности Земли, для того чтобы преодолеть земное притяжение.

Из равенства $\frac{mv^2}{2} = \frac{GMm}{R}$ или $\frac{mv^2}{2} = mgR$

получаем

$$v_{II} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2}v_I; v_{II} = 1,12 \cdot 10^4 \text{ м/с.}$$

Третьей космической скоростью называется скорость, которая необходима телу, удаленному от Солнца на расстояние, равное радиусу земной орбиты r , для того чтобы покинуть пределы Солнечной системы. Для получения этой скорости в ранее полученное выражение для v подставим массу Солнца $M = 2 \cdot 10^{30}$ кг и $r = 1,2 \cdot 10^{11}$ м. Это даст $v_{III} = 4,2 \cdot 10^4$ м/с.

Задача 19.12. Найдите первую космическую скорость для Луны, используя данные о том, что $R_L = 1,7 \cdot 10^6$ м, а $M_L = 7,3 \cdot 10^{22}$ кг.

Расчеты показали, что первая космическая скорость для Луны составляет 2,5 км/с, что гораздо меньше этой скорости для Земли. Это означает, что экономически более выгодно осуществлять запуски космических кораблей с Луны, а не с Земли. Вот почему в проектируемых поселениях на Луне обязательно отводится место для межпланетного космодрома.

Задача 19.13. Во сколько раз меньшую энергию нужно затратить на старт космических кораблей с Луны, чем с Земли?

Задача 19.14. Спутника какой планеты Солнечной системы создать легче всего? труднее всего?

Задача 19.15. Ракета запущена с первой космической скоростью точно по направлению от центра Земли. На какую высоту она поднимется?

Задача 19.16. Оцените скорости метеоритов в момент их падения на Землю.

Р е ш е н и е

Рассмотрим частицу, приходящую к Солнцу с бесконечно большого расстояния. (На самом деле метеориты приходят не из бесконечности, а возникают в нашей планетной системе. Однако их скорости мало отличаются от скоростей, которые наблюдались бы при движении из бесконечности.) В момент, когда она достигнет того же расстояния от Солнца, что и Земля на своей орбите, частица приобретет вычисленную выше скорость (42 км/с). Скорость метеорита относительно Земли равна векторной сумме этой скорости и скорости движения Земли по орбите вокруг Солнца (30 км/с). Если метеорит сталкивается с движущейся навстречу Землей, то скорость столкновения будет равна $(42 + 30)$ км/с = 72 км/с. Если же метеорит догоняет Землю, эта скорость равна 12 км/с. Большинство метеоритов имеет скорости столкновения в интервале 10—70 км/с [5, 214].

Из анализа формул для космических скоростей видно, что их значения зависят от массы планетного тела, но не зависят от массы ускоряемого тела. Другими словами, скорости освобождения от действия сил тяготения планет одинаковы как для ракет, так и для молекул газа.

Атмосферы планет С расчетом скорости убегания молекул газа связан вопрос об атмосферах планет. А наличие у планеты атмосферы и определенный ее химический состав — неперемное условие возникновения жизни на этой планете. Действительно, атмосфера необходима для дыхания живых существ. Химический состав важен потому, что, например, для земной формы жизни необходим кислород, а многие другие газы ядовиты.

Молекулы атмосферы, находясь в непрерывном хаотическом движении, постепенно покидают ее [34, 34]. Происходит, как говорят, диссипация атмосферы. В этом процессе понятным из вышесказанного соображениям смогут принять участие лишь те молекулы, скорости которых превышают первую космическую. Скорости молекул определяются со-

отношением $\bar{v}_B = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$, из которого видно, что более легкие

молекулы имеют больше шансов покинуть атмосферу, чем тяжелые. К тому же распределение частиц газа в атмосфере с высотой таково, что в верхних слоях преобладают газы

с малой молекулярной массой (см. барометрическую формулу).

По известной в астрофизике формуле

$$t = \frac{\bar{v}^3}{2g^2R} \exp \frac{2gR}{\bar{v}^2}$$

можно рассчитать время полного улетучивания разных газов из атмосфер разных планет. Так, оказалось, что время полного улетучивания водорода (самого легкого газа) из земной атмосферы составляет всего несколько десятков лет, а время улетучивания гелия — несколько миллиардов лет. Эти значения времени слишком малы по сравнению с продолжительностью существования Земли, поэтому в земной атмосфере мало водорода и гелия. Однако их потеря восстанавливается за счет диссоциации молекул воды под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца (водород) и в результате выделения из земных пород (гелий).

Масса планеты также оказывает влияние на наличие и газовый состав собственной атмосферы. Действительно, чем больше масса планеты и ускорение свободного падения, тем меньше скорость диссипации атмосферы. Планеты с малым значением g — Луна и Меркурий — обладают гораздо более разреженной атмосферой, чем Земля. Планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун — благодаря большому значению ускорения свободного падения и низкой температуре сохранили в своих атмосферах много водорода и гелия [33, 224].

За критерий устойчивости планетной атмосферы принято условие $\bar{v}_v \leq 0,2v_{II}$.

Его можно получить, если учесть, что при менее сильном соотношении всегда найдется сравнительно большая доля молекул, которые окажутся способными покинуть атмосферу, и время диссипации будет меньше времени существования планеты.

Задача 19.17. Почему Луна не сохранила свою атмосферу?

Задача 19.18. Какова наименьшая масса планеты, еще способной удерживать атмосферу?

Интересным приложением темы является вопрос о некоторых антропоцентрических характеристиках малых планетных тел.

Задача 19.19. С тела какой массы может спрыгнуть человек? Примите, что начальная скорость его прыжка 5 м/с.

Задача 19.20. С шара какой массы и радиуса человек может бросить бейсбольный мяч? Примите скорость мяча равной 33 м/с.

Задача 19.21. Тело какой массы и радиуса может покинуть ружейная пуля? Примите скорость пули равной 800 м/с.

Результаты вышеприведенных задач интересны вот почему. Люди, исследующие астероиды, должны быть осторожны, бросая тяжелые предметы или открывая стрельбу, так как объект, брошенный в горизонтальном направлении со скоростью больше круговой орбитальной, но меньше параболической, навсегда останется на орбите и будет представлять определенную опасность всякий раз, когда он будет проноситься мимо места, где он ближе всего к поверхности планеты.

Гравитационный радиус Формула для потенциальной энергии позволяет вычислить такую важную характеристику нашего мира, как гравитационный радиус.

Задача 19.22. Вычислите гравитационный радиус Вселенной.

Р е ш е н и е

Энергия покоя тела $W = mc^2$.

Вычислим радиус шара, в который стягивается это тело, так что потенциальная энергия, которой обладает тело, полностью превращается в энергию покоя стянувшегося шара:

$$\frac{Gm^2}{r} \approx mc^2,$$

откуда $r = \frac{Gm}{c^2}$. Эта величина называется гравитационным радиусом. Для Вселенной $r = 10^{26}$ м.

Получили интересный результат: искомый гравитационный радиус оказался равным радиусу Вселенной (см. задачу 1.9). Это означает, что гравитация играет в масштабах Вселенной очень большую и во многом определяющую роль.

Задача 19.23. Найдите отношение гравитационного радиуса Вселенной к радиусу протона (10^{-15} м).

Задача 19.24. Вычислите гравитационный радиус человека.

Задача 19.25. Оцените гравитационный радиус Земли, Солнца.

Результаты, полученные при решении этой задачи, покажут, что, для того чтобы потенциальная энергия была равна энергии покоя, необходимо было бы все вещество Земли

(Солнца) сжать в шарик диаметром 1 см (3 км). Фактический же диаметр Земли порядка 10^7 м. Отсюда следует, что в общем энергетическом балансе Земли, включающем и ее энергию покоя, потенциальная энергия играет пренебрежимо малую роль.

Важным физическим содержанием понятия гравитационного радиуса является представление о том, что область внутри сферы такого радиуса как бы теряет всякую связь с областью вне этой сферы, за исключением гравитационного взаимодействия. Это означает, что свет не сможет выйти из внутренней области. Во внешнем пространстве эта область проявлялась бы лишь громадным тяготением. Пролетающие вблизи нее частицы и кванты излучения должны были бы втягиваться внутрь сферы гравитационного радиуса и там исчезать. Поэтому такая область называется черной дырой. В настоящее время имеются экспериментальные данные, подтверждающие существование черных дыр во Вселенной [15, 238].

§ 20. Мощность

Мощность — одна из важнейших энергетических характеристик, определяемая как быстрота совершения работы.

Диапазон мощностей различных природных и технических объектов огромен. Рассмотрим шкалу мощностей, построенную в логарифмическом масштабе (см. диаграмму на рис. 3.2). Самыми большими значениями мощности в природе обладают астрономические объекты. Например, мощность радиоизлучения квазара равна 10^{45} Вт, чуть меньшая мощность выделяется при взрывах сверхновых и новых звезд: 10^{36} Вт и 10^{32} Вт соответственно. Еще меньше мощность излучения Солнца: 10^{27} Вт.

Мощность всех рек и водопадов Земли составляет 10^{13} Вт, мощность урагана 10^{12} Вт. Предельная мощность, достигнутая техническим устройством — импульсным лазером, 10^{12} Вт.

Мощности, характерные для человека, приведены с левой стороны шкалы. Эти значения отмечены сравнительно небольшим разбросом: от мощности сердца (порядка 0,1 Вт) до наибольшей мощности, которую может развить человек (порядка нескольких киловатт).

Мощность

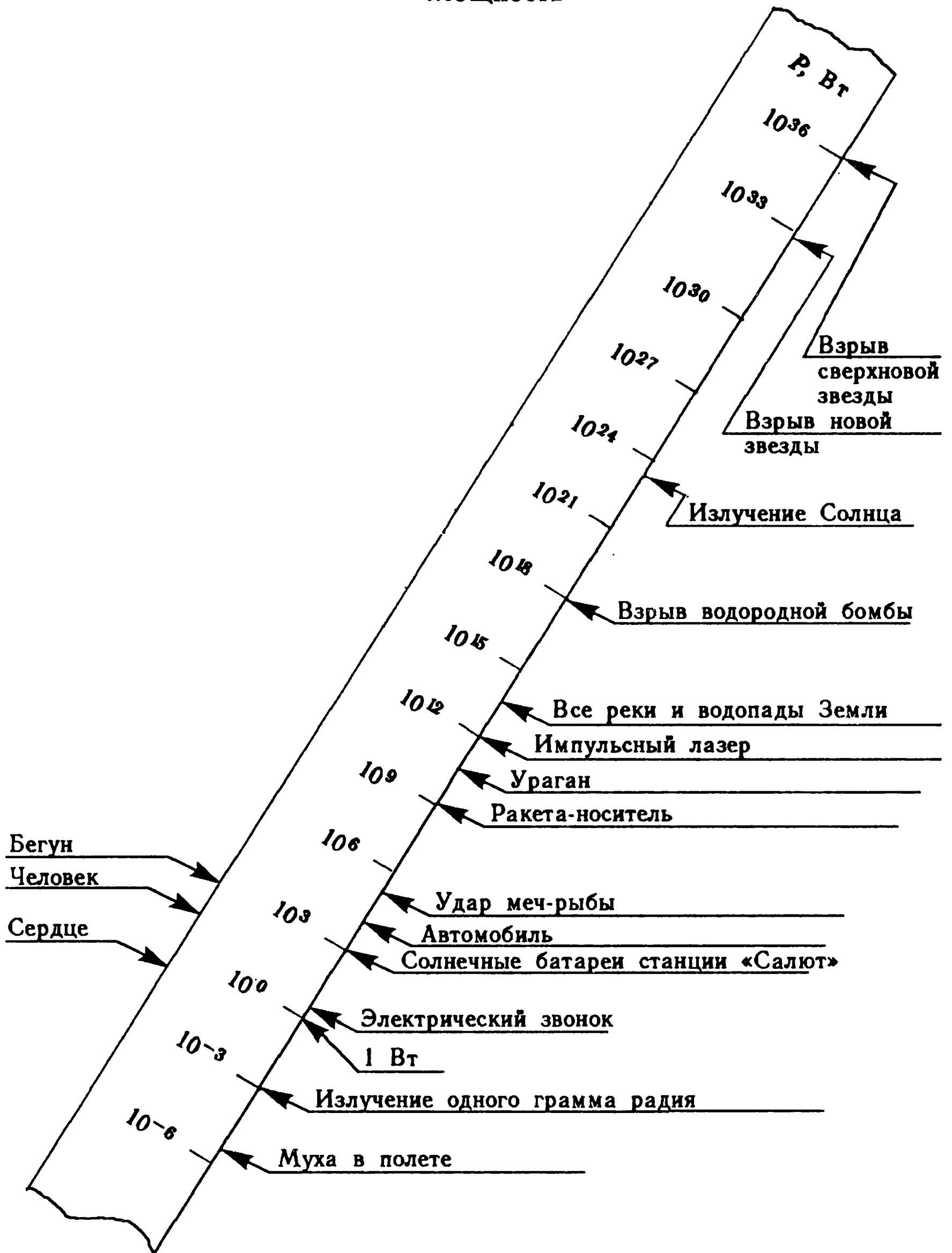


Рис. 3.2

Для пополнения приведенной выше диаграммы, а также для расширения представлений учащихся о возможностях человека можно предложить их вниманию следующие задачи.

Задача 20.1. По нормативам, принятым в армии США, военнослужащий должен выполнять 72 отжатия от пола за 1 мин. Какая мощность при этом развивается?

Задача 20.2. Определите среднюю мощность, развиваемую бегуном на дистанции 100 м.

Задача 20.3. Спортсмен подтягивается на перекладине, выполняя одно подтягивание за 1 с. Какова мощность, развиваемая при этом спортсменом?

Задача 20.4. Человек выполняет приседания на двух ногах, делая два приседания за 1 с. Какую среднюю мощность он при этом развивает? Примите, что при приседании человек перемещает $\frac{4}{5}$ своей массы на расстояние 0,5 м.

Задача 20.5. В книге рекордов Гиннеса упоминаются следующие результаты: а) некто проделал 1985 отжиманий в стойке на руках за 1 ч; б) некто за 24 ч 4313 раз поднял корпус из положения лежа; в) некто за 12 ч 21 598 раз поднял ноги из положения лежа. Какую мощность они при этом развивали?

Задача 20.6. Человек взбегаёт вверх по лестнице, преодолевая один пролет за 2,5 с. Какова развиваемая им мощность?

Задача 20.7. Оцените среднюю мощность, развиваемую конькобежцем при равномерном движении на дистанции, если при торможении от максимальной скорости до полной остановки он проезжает 360 м за 60 с?

Задача 20.8. В каком из рассмотренных выше случаев человек развивает наибольшую мощность? Какова причина различий в значениях развиваемой мощности?

Полезно, на наш взгляд, сопроводить решение приведенных выше задач там, где это возможно, экспериментальным определением соответствующих величин (частот движений, перемещений частей тела, мощностей). Можно провести лабораторную работу, посвященную вычислению мощностей, развиваемых человеком при различного рода движениях (см. Приложение).

Собрав опытный материал и выполнив необходимые расчеты, целесообразно проанализировать полученные результаты.

Действительно, мощность, вычисляемая как отношение $\frac{A}{t}$, определяется временем совершения работы и запасом полной энергии, необходимой для ее совершения. Чем больше скорость выполнения работы (в нашем случае частота выполнения упражнений), тем больше вырабатываемая человеком мощность. При одинаковой скорости движения

мощность больше в тех случаях, когда больше сила, против которой совершается работа. В связи с этим становится понятным, почему подтягивания более эффективный с энергетической точки зрения вид деятельности по сравнению с отжиманиями и приседаниями, а бег вверх по лестнице — по сравнению с бегом по ровной поверхности.

Однако применение понятия мощности к человеку и животным имеет одну очень важную особенность. К ее пониманию может привести проблемная ситуация, созданию которой может помочь следующая задача.

Задача 20.9. Велосипедист развивает силу тяги 100 Н. Считая силу трения постоянной и равной 50 Н, а массу велосипедиста с велосипедом равной 100 кг, определите ускорение и скорость велосипедиста через 20 мин после начала движения.

Р е ш е н и е

Ускорение велосипедиста вычисляется по формуле

$$a = \frac{F - F_{\text{тр.}}}{m}; \quad a = \frac{100 - 50}{100} \text{ м/с}^2 = 0,5 \text{ м/с}^2.$$

Скорость при равноускоренном движении

$$v = at; \quad v = 0,5 \cdot 1200 \text{ м/с} = 600 \text{ м/с}.$$

Получили, что скорость велосипедиста через 20 мин после начала движения достигнет значения скорости ружейной пули!

Ответ, безусловно, неверен, хотя в самом решении ошибки нет. Ошибка состоит в допущении, что человек непрерывно в течение 20 мин развивает силу 100 Н. Нетрудно подсчитать, что для этого он должен развить среднюю мощность, приблизительно равную 30 000 Вт (40 л.с.), что, как свидетельствует жизненный опыт, конечно, невозможно.

Почему человек не может развивать большую мощность в течение длительного промежутка времени?

Ограничение на значение мощности, развиваемой человеком, накладывается значением скорости, с которой человеческий организм преобразует химическую энергию пищи в механическую энергию. Эта скорость определяется скоростью сгорания жиров и углеводов. Она не поддается регулировке, так как выработалась в процессе естественного отбора применительно к условиям жизни на нашей планете (см. § 28).

Эксперименты показывают, что человеческий организм обычно совершает в секунду до 100 Дж механической работы, иногда может увеличить расход мощности в 5—10 раз, но в течение короткого времени.

Способность организма человека совершать достаточно большую механическую работу в течение сравнительно большого интервала времени называется выносливостью. Это свойство очень ценится во многих видах спорта, в частности у стайеров-бегунов на длинные дистанции, марафонцев, велосипедистов, лыжников, пловцов на длинные и сверхдлинные дистанции. В этих видах деятельности особое значение приобретают правильное распределение сил на дистанции и экономная техника движений.

Моментальная, или взрывоподобная, отдача энергии, когда развиваемая человеком мощность может превысить основную скорость обмена веществ почти в 500 раз, имеет место в таких видах спорта, как спринтерский бег, прыжки, толкание ядра, поднятие штанги. Способность развивать очень большую мощность, хотя бы на короткий промежуток времени, — одно из основных качеств, которыми должен обладать организм таких спортсменов. На выработку этого умения и направлены в основном многочасовые, требующие большого напряжения тренировки спортсменов.

Ниже приводятся задачи на вычисление мощностей, развиваемых человеком при выполнении такого рода упражнений.

Задача 20.10. Толкатель ядра сообщает снаряду массой 7,3 кг такое ускорение, что скорость ядра через 2 с становится равной 15 м/с. Какую среднюю мощность он развивает?

Задача 20.11. Какую мощность должен развивать в начале бега спортсмен массой 70 кг, если за 2 с он должен сообщить своему телу скорость 9 м/с?

Задача 20.12. Оцените мощность, развитую штангистом при подъеме штанги массой 217,5 кг на высоту 2,3 м, если время подъема 0,2 с.

Задача 20.13. Вычислите работу, выполняемую прыгуном массой 70 кг при перемещении его из согнутого положения до максимальной высоты. Если мышцы действуют в течение 0,25 с, то какую мощность они развивают?

Задача 20.14. Оцените мощность, развиваемую каратистом в момент удара рукой (см. § 14).

Р е ш е н и е

$$N = \frac{A}{t}; \quad A = \frac{mv^2}{2}; \quad N = \frac{mv^2}{2t};$$

$$N = \frac{0,7 \cdot 144}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \text{ Вт} = 25 \text{ кВт.}$$

§ 21. Закон сохранения энергии

Тема «Закон сохранения энергии» позволяет осуществить несколько «выходов» на гуманитарную проблематику. Это, во-первых, обсуждение энергетических возможностей человека. Применение закона сохранения энергии к разного рода механическим движениям человека, во-вторых. И наконец, в-третьих, проблема энергетического кризиса и новых видов энергии.

«Энергетика» и развитие человека Диаграмма «Энергия» приведена на рисунке 3.3. Диапазон значений энергий, встречающихся в природе, составляет 85 порядков: от энергии химической связи (10^{-18} Дж) до энергии, заключенной в доступной наблюдению части Вселенной (10^{67} Дж).

Самым интересным, с нашей точки зрения, на этой диаграмме является значение энергии, расходуемой человечеством за год. На сегодняшнем уровне развития человеческой цивилизации эта энергия составляет 10^{-12} от энергии, излучаемой Солнцем за то же время (10^{36} Дж), или 10^{-2} от энергии, получаемой за год от Солнца Землей (10^{26} Дж).

Опираясь на эти цифры, можно обсудить с учащимися следующие вопросы.

Понятие энергии очень важно для нашей цивилизации и нашей химической формы жизни. Разнообразные химические реакции, протекающие в земных живых организмах, требуют для своего осуществления какого-то источника энергии. Этим источником является термоядерный синтез в недрах нашего светила — Солнца.

В процессе эволюции за многие миллиарды лет многие формы жизни на Земле приобрели способность извлекать энергию непосредственно из солнечного излучения с помощью удивительной реакции — фотосинтеза.

В реакции фотосинтеза под действием солнечного света происходит превращение углекислого газа в воду и органические молекулы (углеводы). В качестве побочного продукта реакции образуется кислород. Углеводы запасают энергию в химических связях. Эта энергия по мере необходимости высвобождается при окислении углеводов.

Эти процессы протекают преимущественно в хлоропластах внутри клеток тех организмов, которые мы называем растениями.

Энергия

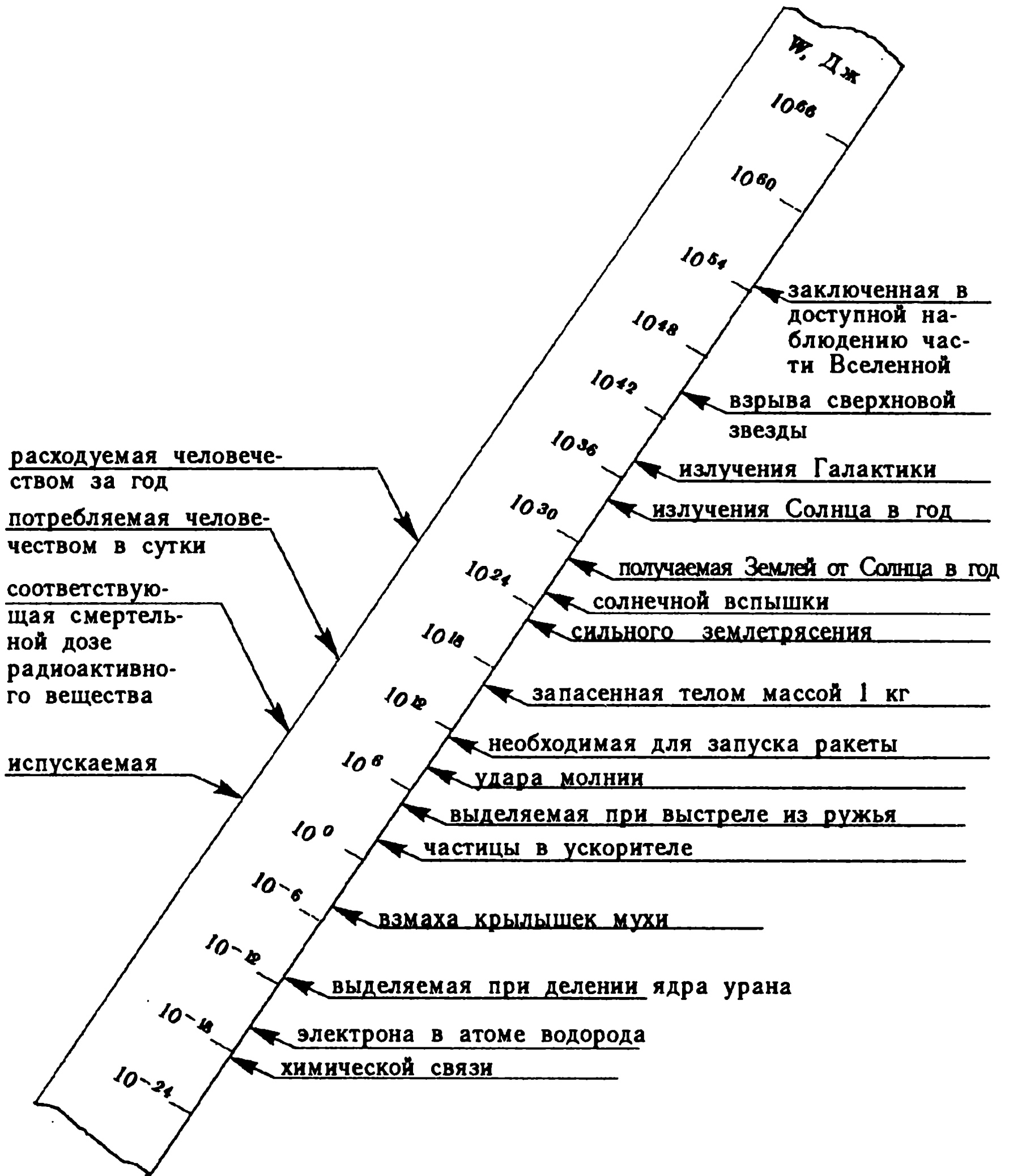


Рис. 3.3

Так жизнь решила проблему утилизации, накопления и хранения солнечной энергии, позволив другим формам жизни (животным и человеку) существовать за этот счет.

Таким образом, длительное существование земной жизни обусловлено постоянным источником энергии и реакцией фотосинтеза. Мир животных и людей невозможен без мира растений: без них животные и люди не могли бы питаться и дышать. Отсюда возможность назвать образ жизни человека в некотором смысле паразитическим [18, 186].

Однако человек в отличие от животных не удовлетворяется той энергией, которую может получать естественным путем от Солнца или поедая растения и животных. Уже в древности, чтобы защитить себя от холода и диких зверей, человек научился использовать огонь, сжигая растения и древесину (подвергая реакции окисления заключенные в них углеводы). При этом он высвобождал опять-таки запасенную солнечную энергию.

Дальнейшее развитие человечества было связано с изменением среды обитания: возделыванием культурных растений, строительством жилищ, созданием машин. Для всего этого требовалось все возрастающее количество энергии.

Новые источники энергии человек нашел сначала в мускульной силе животных. Затем он поставил себе на службу воду и ветер. Стал использовать энергию, выделяющуюся при сгорании угля, нефти, газа. Еще позже была открыта возможность получения энергии за счет реакций деления и синтеза атомных ядер.

В связи с изучением механической энергии интересно проследить за изменением вклада мускульной энергии человека в общее количество вырабатываемой человечеством энергии. В наше время вклад мускульной энергии человека и животных составляет не более 1% от всей вырабатываемой человечеством энергии, хотя еще в середине прошлого века он составлял 94% [13, 12].

Поддержание определенного (и достаточно высокого) уровня жизни человека требует все нарастающих энергетических затрат, а следовательно, и все большего производства энергии.

Подсчитано, что производство энергии на душу населения составляло в сутки:

в первобытном обществе	8,4 МДж	в капиталистическом	300 МДж
в рабовладельческом	50 МДж	в современном	200 МДж
в феодальном	100 МДж	(в индустриальных странах)	до 1000 МДж

При этом структура энергопотребления такова, что 31% от всей потребляемой энергии расходуется на промышленность и сельское хозяйство, 42% — на строительство и сферу обслуживания, 18% — на транспорт, 9% — на питание. К началу следующего века эти тенденции сохранятся. На долю перечисленных сфер потребления будет приходиться 40, 29, 27 и 4% от всей потребляемой энергии соответственно [42, 16].

Современное суточное потребление энергии на душу населения в развитых странах в 100 раз превосходит то количество энергии, которое содержится в дневном пищевом рационе. Энергетический эквивалент этого рациона примерно в 4 раза меньше энергетических затрат на его получение. Этот парадокс легко разрешим. Современное сельское хозяйство является большим потребителем энергии. Подсчитано, например, что затраты энергии на производство одной тонны зерна возросли в сотни раз по сравнению с концом прошлого века. Замена лошади трактором, навоза — химическими удобрениями — вот что является причиной повышения энергоемкости. Человеку легче добывать и использовать энергию из угля, нефти или газа, чем держать волов и лошадей.

Развитие человеческой цивилизации неразрывно связано с производством все увеличивающегося количества энергии. Это обстоятельство заставляет считать производство энергии показателем развития цивилизации. Сейчас, однако, в среде ученых возникло сомнение в том, что технологический путь развития цивилизации единственно возможный и разумный. Эта мысль родилась из ощущения тупика, в который человечество само себя загоняет, связанного с трудностями нашего развития: созданием возможности для самоуничтожения, исчерпанием природных ресурсов, загрязнением среды обитания. Кроме того, к этой мысли можно прийти из анализа так называемого астроинженерного парадокса, суть которого состоит в том, что если есть цивилизации, стоящие на более высоком уровне развития, чем земная, то почему мы не наблюдаем следов их разумной астроинженерной деятельности? Если возникновение цивилизаций разумных существ — закономерный этап эволюции материи, если цивилизации долго существуют, не самоуничтожаясь, то, может быть, мы не вступаем с ними в контакт потому, что путь их развития иной, не связанный с требующими больших энергетических затрат преобразованиями окружающей среды?

В том, что количество мускульной энергии, которую может производить отдельный человек, очень невелико, мы убедились, решая задачи по темам предыдущих параграфов. Не велики и совокупные механические усилия всех живущих на Земле людей.

Применение закона сохранения энергии к некоторым видам движения человека Рассмотрим несколько задач на применение закона сохранения механической энергии.

Задача 21.1. Парашютист обычно приземляется со скоростью $6,7$ м/с. Если вам придет в голову потренироваться в приземлении с такой скоростью, спрыгивая с платформы, на какой высоте должна находиться платформа?

Задача 21.2. Герой приключенческого фильма Тарзан разбегаются до максимальной скорости 8 м/с и цепляется за лиану, свешивающуюся вертикально вниз с высокого дерева. На какую максимальную высоту поднимется Тарзан, раскачавшись на лиане? Повлияет ли на ответ длина лианы?

Задача 21.3. Гимнаст «крутит солнце» на перекладине. Масса гимнаста m . Считая, что масса гимнаста сосредоточена в центре тяжести, определите силу, действующую на руки гимнаста в нижней точке.

Задача 21.4. Доска качелей с сидящим на ней ребенком имеет массу m . Какое наибольшее натяжение испытает веревка, если отвести качели на 45° от положения равновесия и предоставить им качаться?

Задача 21.5. Велосипедист должен проехать через «чертову петлю». С горки какой высоты должен он съехать, чтобы не упасть в верхней части петли? Радиус петли R .

Задача 21.6. Было установлено, что череп человека может быть пробит движущимся предметом с площадью сечения в несколько квадратных сантиметров, если давление равно $5 \cdot 10^7$ Па. Предположим, что молоток (масса 2 кг, диаметр головки $2,5$ см) падает с высоты h и ударяет человека по голове. При этом торец головки параллелен поверхности черепа. Какова минимальная высота, падение с которой приведет к травме черепа, если удар продолжается 1 мс?

Задача 21.7. Инженер рассчитывает пружину, которую необходимо поместить на дно шахты лифта, чтобы при обрыве троса лифта на высоте h над верхним концом пружины пассажиры при торможении не испытывали перегрузок больше 10 . Пусть масса лифта с пассажирами равна M . Какой должна быть при этом жесткость пружины?

Задача 21.8. Определите силу, с которой гимнаст массой 60 кг действует на упругую сетку при прыжке с высоты 8 м, если под действием веса гимнаста сетка прогибается на 16 см.

Задача 21.9. Девушка, масса которой M , стоит неподвижно на коньках и держит в руках мяч массой m . Она бросает мяч со скоростью v . Мяч упруго отскакивает от стены, после чего девушка его ловит. Чему равна ее конечная скорость, если ее движение происходит без трения? Откуда у нее берутся импульс и кинетическая энергия? Ведь сначала у нее не было ни того, ни другого?

Следующие задачи иллюстрируют применение закона сохранения полной механической энергии в случае действия в системе непотенциальных сил.

Задача 21.10. Мальчик разбежался и проехал на ногах по ледяной дорожке до полной остановки 8 м. Какова должна быть скорость его разбега, если коэффициент трения подошв ног мальчика о лед 0,25?

Задача 21.11. Шофер, едущий в автомобиле по горизонтальной дороге в тумане, внезапно заметил недалеко впереди себя стену, перпендикулярную направлению движения. Что лучше сделать: затормозить или повернуть в сторону, чтобы предотвратить аварию?

Задача 21.12. Ребенок массой 17 кг скатывается на санках с горы высотой 4,6 м. Чему равно количество выделившейся при этом теплоты, если скорость санок у подножия горы 2 м/с?

Задача 21.13. Масса санок вместе с седоком равна 50 кг, а сила трения 20 Н. Какую работу нужно совершить человеку, чтобы втащить эти санки на гору высотой 10 м и длиной склона 100 м? Если пустить санки с вершины, то какую кинетическую энергию они приобретут у подножия горы? Какова при этом будет их скорость?

Задача 21.14. Лыжник скатывается с холма с нулевой начальной скоростью и проезжает 30 м вниз по склону, составляющему 18° с горизонтом. Чему равна скорость лыжника у подножия холма, если коэффициент трения 0,08? Если у подножия холма имеется горизонтальная площадка, покрытая снегом с тем же коэффициентом трения, то на какое расстояние по ней укатится лыжник?

Задача 21.15. Лыжник, идущий по ровной лыжне со скоростью 12,6 м/с, достигает подножия горы, склон которой составляет 20° с горизонтом, а затем проезжает вверх по склону 11,4 м. Чему равен коэффициент трения лыж о снег?

**Оценка
механических
возможностей
человека**

Перейдем к оценке механических возможностей человека с точки зрения выполнения закона сохранения полной механической энергии.

Начнем рассмотрение с оценки эффективности бега человека.

Задача 21.16. Оцените эффективность бега человека.

Р е ш е н и е

Чтобы переместить свое тело на расстояние L , человек производит следующие энергетические затраты.

Развивает кинетическую энергию:

$$W = \frac{Mv^2}{2}; \quad W = \frac{70 \cdot 100}{2} \text{ Дж} = 3500 \text{ Дж}$$

(здесь M — масса человека; v — средняя скорость бега на дистанции 100 м).

Совершает работу по вертикальному перемещению своего центра масс:

$$A = MghN$$

(здесь h — вертикальное перемещение центра масс; N — число шагов на дистанции; принимаем, что при каждом шаге центр масс человека перемещается на 0,1 м, а всего на дистанции 100 м он делает в среднем 50 шагов),

$$A = 70 \cdot 10 \cdot 0,1 \cdot 50 \text{ Дж} = 3500 \text{ Дж.}$$

Совершает работу по подъему ноги:

$$A = mgHN$$

(здесь H — перемещение центра масс ноги; m — масса ноги человека),

$$A = 20 \cdot 10 \cdot 0,4 \cdot 50 \text{ Дж} = 4000 \text{ Дж.}$$

Совершает работу против силы сопротивления движению:

$$A = FL = \beta vL$$

(здесь $F = \beta v$ — сила сопротивления движению; $\beta = 0,2 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ — коэффициент сопротивления),

$$A = 0,2 \cdot 10 \cdot 100 \text{ Дж} = 200 \text{ Дж.}$$

Итого:

$$W = 3500 \text{ Дж} + 3500 \text{ Дж} + 4000 \text{ Дж} + 200 \text{ Дж} = 11\,200 \text{ Дж.}$$

Полученный результат находится в хорошем соответствии с опытом: известно, что человек может развить мощность до 1 кВт, в нашем случае она оказывается равной

$$N = \frac{W}{t}; \quad N = \frac{11\,200}{10} \text{ Вт} = 1120 \text{ Вт.}$$

Задача 21.17. Принимая, что человек при подъеме тяжестей затрачивает такое же количество энергии, что и при скоростном беге, оцените массу груза, который он может поднять.

Р е ш е н и е

Так как $Mgh = \frac{mv^2}{2}$, то

$$M = \frac{mv^2}{2gh}$$

(здесь M — масса груза; m — масса человека; v — скорость бега человека; h — высота поднятия груза).

При $m = 110 \text{ кг}$, $h = 1,8 \text{ м}$, $v = 10 \text{ м/с}$ получаем

$$M = 321 \text{ кг.}$$

Средний человек ($m = 80 \text{ кг}$) поднимет груз массой 207 кг.

Теперь перейдем к рассмотрению процесса прыжка в длину.

Задача 21.18. Чтобы осуществить прыжок в длину, спортсмен должен приобрести скорость 10 м/с. Пользуясь законом сохранения энергии, определите высоту прыжка и скорость спортсмена в этой точке. Примите угол вылета спортсмена равным 25° .

А теперь рассмотрим процесс метания.

Задача 21.19. Оцените усилия спортсмена при толкании ядра.

Задача 21.20. Мировые рекорды в толкании ядра, метании диска и копья равны примерно 22, 73 и 99 м соответственно. Массы этих снарядов 7,3, 2,0 и 0,8 кг. Хороший игрок может бросить теннисный мяч ($m = 0,14$ кг) на 120 м.

Предположив, что каждый бросок выполняется под оптимальным углом 45° , вычислите кинетическую энергию каждого спортивного снаряда. Какое сопротивление воздуха они испытывают? Может ли разница в рекордах быть полностью или отчасти объяснена разными потерями энергии на преодоление сопротивления воздуха? Какими еще характеристиками мы пренебрегли? Какова эффективность мышц при броске спортивных снарядов различных масс? Существуют ли очевидные причины для различий?

Представляет интерес применение закона сохранения механической энергии к прыжкам в высоту.

Задача 21.21. Оцените силу, с которой отталкивается от земли спортсмен в момент прыжка в высоту.

Р е ш е н и е

Спортсмен осуществляет прыжок в высоту за счет работы мышц ног $A = Fd$, где d — расстояние, на которое перемещается центр масс человека при приседании (рис. 3.4).

По закону сохранения энергии эта работа равна изменению энергии:

$$A = Fd = Mg(h + d),$$

где h — наибольшая высота, на которую поднимается центр масс человека при прыжке вверх.

Тогда

$$F = \frac{Mg(h + d)}{d} = Mg\left(\frac{h}{d} + 1\right).$$

Лучший прыжок в высоту, который может выполнить мужчина, поднимает его центр масс примерно на 0,6 м. При прыжке мышцы ног работают на расстоянии, примерно равном 0,3 м. Значит, сила

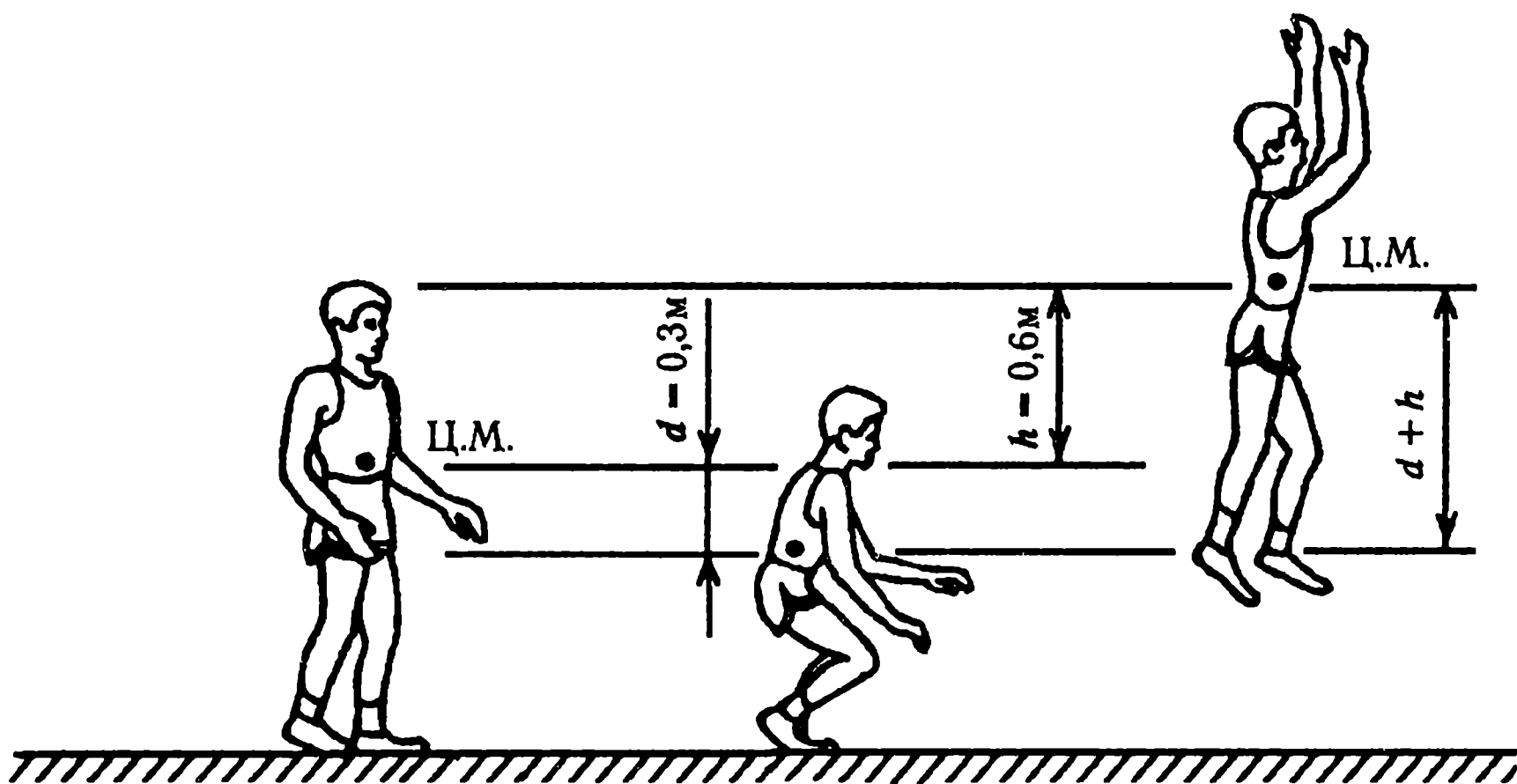


Рис.3.4

$$F = Mg\left(\frac{0,6}{0,3} + 1\right) = 3Mg.$$

Сила мышц ног, производящих прыжок, составляет три веса человека.

Задача 21.22. Как зависит высота прыжка от размера тела человека?

Р е ш е н и е

Воспользуемся результатом предыдущей задачи:

$$h + d = \frac{Fd}{Mg}.$$

Из прежних оценок $F \sim L^2$; $M \sim L^3$; $d \sim L^3$, где L — характеристическая длина (рост человека).

Тогда

$$h + d = \frac{LL^2}{L^3} = \text{const.}$$

Получили, что высота прыжка не зависит от характеристической длины, т.е. размера тела человека, и одинакова для всех существ сходной формы [6, 136].

Задача 21.23. Оцените эффективность прыжков в высоту с разбега.

Р е ш е н и е

Мировой рекорд по прыжкам в высоту составляет 2,4 м.

Это значит, что спортсмен перемещает свой центр масс на высоту 1,4 м. Еще следует учесть 0,1 м, так как центр масс находится внутри тела человека (рис. 3.5).

Тогда

$$h = 2,4 \text{ м} + 0,1 \text{ м} - 1,0 \text{ м} = 1,5 \text{ м}.$$

Расстояние 0,6 м человек преодолевает за счет прыжка (работы мышц ног). Оставшееся расстояние 0,9 м должно быть преодолено за счет разбега. Кинетическая энергия разбега

$$W = \frac{Mv^2}{2}; \quad W = 0,5 \cdot 70 \cdot 6^2 \text{ Дж} = 1260 \text{ Дж}.$$

Энергия, необходимая для поднятия на высоту $h = 0,9 \text{ м}$, находится по формуле

$$W = Mgh; \quad W = 70 \cdot 10 \cdot 0,9 \text{ Дж} = 617 \text{ Дж}.$$

Таким образом, прыгун в высоту преобразует в энергию прыжка половину энергии разбега.

Если бы это преобразование можно было выполнить с большей эффективностью, человек смог бы прыгнуть на бóльшую высоту [6, 137].

Задача 21.24. На какую высоту смог бы прыгнуть человек, если бы он всю свою энергию разбега преобразовал в энергию прыжка?

Задача 21.25. С какой вертикальной скоростью должен отделиться от земли прыгун в высоту, чтобы преодолеть планку на высоте 2,3 м?

Задача 21.26. Прыгун отрывается от земли со скоростью 5 м/с и преодолевает планку со скоростью 1,2 м/с. На какую высоту при этом был поднят его центр масс?

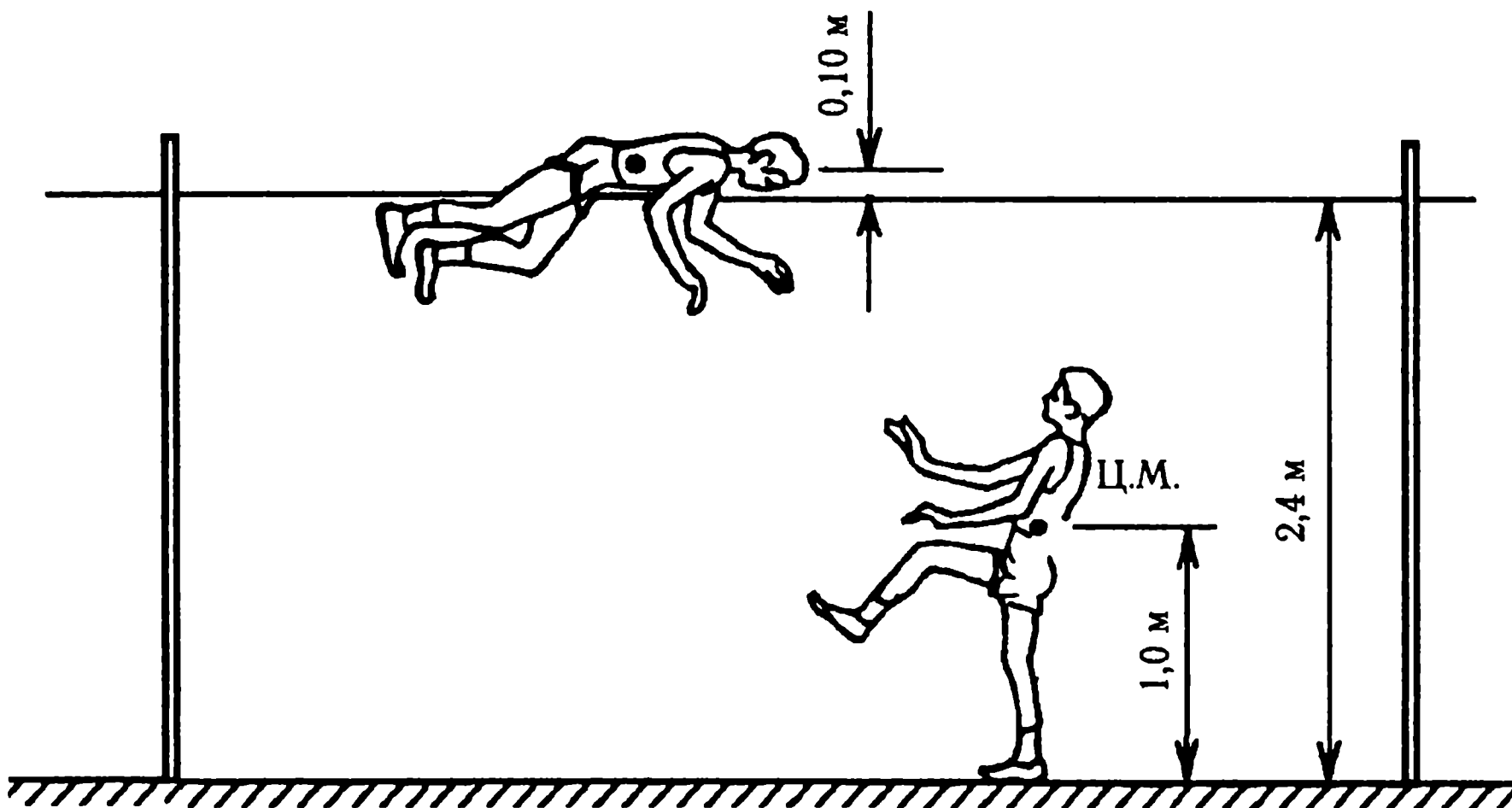


Рис.3.5

Задача 21.27. Результат задачи 21.23 показывает, что, используя одни лишь ноги, прыгун в высоту не в состоянии превратить всю энергию разбега в энергию прыжка. Прыгун в высоту с шестом использует свой спортивный снаряд для более эффективного преобразования этой энергии. Оцените максимальную высоту, которую может преодолеть прыгун с шестом.

Р е ш е н и е

При прыжке с шестом кинетическая энергия поступательного движения спортсмена при разбеге превращается в потенциальную энергию упругой деформации при сгибании шеста (рис. 3.6). Когда в следующий момент шест начинает разгибаться, то за счет этой энергии он совершает работу, поднимая прыгуна над планкой. Если на подъем прыгуна пошла вся энергия, то

$$\frac{Mv^2}{2} = Mgh.$$

В этом случае высота перекладины H , которую он сможет преодолеть, будет равна

$$H = h + 1,0 \text{ м} + 0,6 \text{ м} = \left(\frac{0,5v^2}{g} + 1,6\right) \text{ м}$$

(здесь 1 м — высота центра масс человека; 0,6 м — высота прыжка с места).

Если считать, что максимальная скорость равна 9,5 м/с (мы не можем считать ее равной 10 м/с, так как прыгун еще несет шест), то

$$H = 4,6 \text{ м} + 1,6 \text{ м} = 6,2 \text{ м}.$$

Эта оценка для высоты несколько превосходит реально достигнутое значение, так как не вся кинетическая энергия

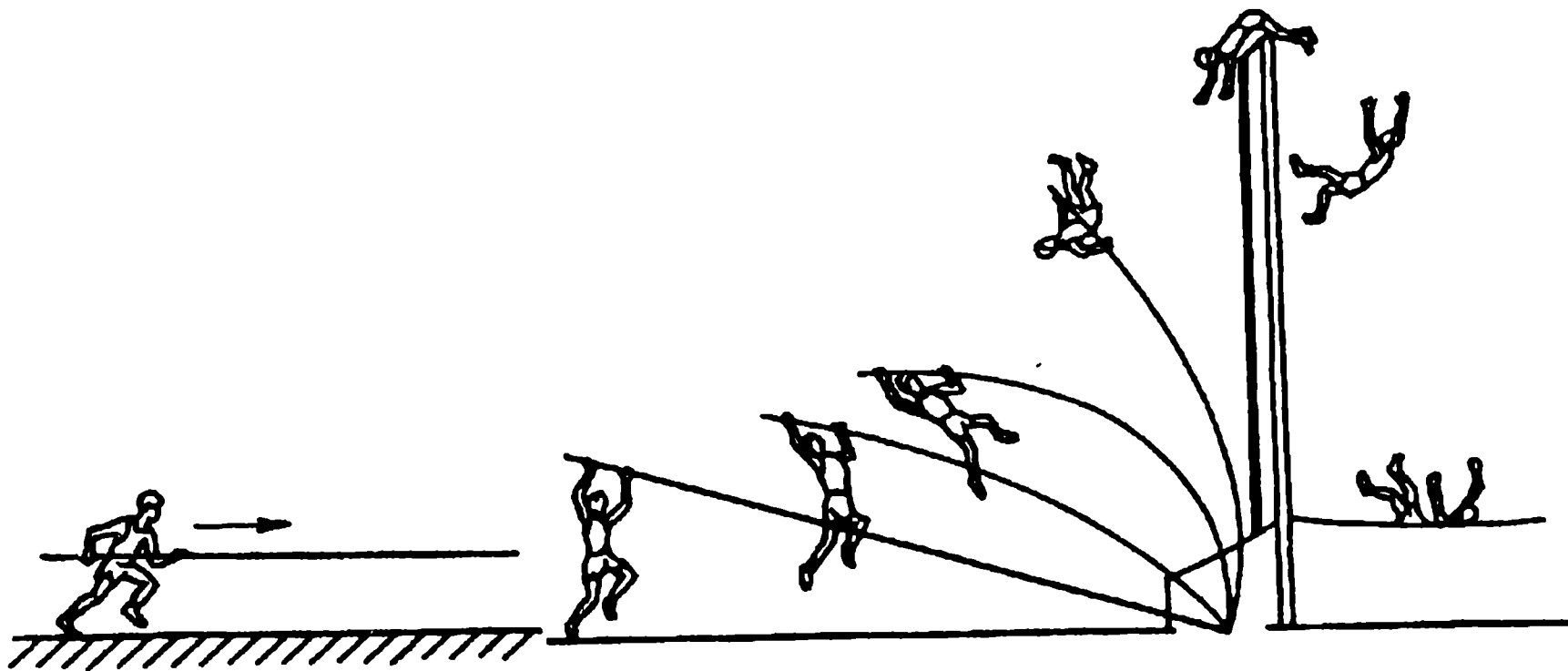


Рис. 3.6

прыгуна может превратиться в потенциальную энергию упругой деформации шеста: прыгун должен обладать еще и некоторой горизонтальной скоростью для пересечения планки.

Задача 21.28. В рассуждениях о прыжке с шестом дополнительная высота 0,1 м, включаемая в прыжок в высоту с разбега, не учитывалась. Как вы думаете почему? Предположите, что прыгун в высоту исполняет свой прыжок перекатом, и сравните его с прыжком с шестом. Что можно сказать о движении центра масс прыгуна с шестом? Используя аналогичные рассуждения, объясните, почему прыгун в высоту, используя технику фос-бери-флоп, может достичь большей высоты, чем при прыжке перекатом.

Задача 21.29. Вычислите кинетическую энергию и скорость прыгуна с шестом массой 70 кг, необходимую для того, чтобы он преодолел планку на высоте 5 м. Считайте, что центр масс прыгуна перед прыжком располагается на высоте 0,9 м над поверхностью земли и достигает максимальной высоты на уровне планки.

Глава 4

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

§ 22. Динамика и энергетика вращательного движения

Для иллюстрации данной темы можно предложить следующие задачи.

1. Вычисление момента инерции тела человека

Задача 22.1. Вычислите момент инерции тела человека, висящего на руках на перекладине. Для вычисления воспользуйтесь таблицей 5.1 пособия.

В экспериментальных исследованиях было определено, что момент инерции человека принимает очень разные значения в зависимости от принятой человеком позы. Например, в стойке «смирно» он равен $1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, «арабеск» — $8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, лежа в горизонтальном положении — $17 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, в группировке — $0,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Приведенные данные хорошо иллюстрируют общую для всех тел зависимость момента инерции от распределения массы тела вокруг оси вращения: чем дальше от оси находится масса вращающегося тела, тем больше его момент инерции.

Задача 22.2. Вычислите, пользуясь таблицей 5.1, значения моментов инерции тела человека в зависимости от принимаемой им позы. Сравните полученные результаты с данными эксперимента.

Задача 22.3. Вычислите приближенное значение момента инерции тела человека, принимая его за цилиндр массой 60 кг , радиусом 12 см и высотой 17 м , а руки — за тонкие стержни массой 5 кг и длиной 60 см , прикрепленные к цилиндру под прямым углом.

Задача 22.4. Вычислите момент инерции пары фигуристов, исполняющих фигуру «тодес» (вращение в паре, при котором партнерша касается головой льда).

2. Вычисление моментов сил

Задача 22.5. Чему равен наибольший момент силы, создаваемый велосипедистом массой 60 кг , когда он поднимается в гору и давит на каждую

педаль своим весом? Каждая педаль при вращении описывает окружность радиусом 18 см.

Задача 22.6. Человек действует с силой 18 Н на дверь шириной 84 см. Чему равен момент этой силы, если она действует: а) перпендикулярно двери; б) под углом 60° к плоскости двери?

Задача 22.7. Какой момент силы создает бицепс, действующий на нижнюю часть руки с силой $F = 700$ Н (рис. 4.1)? Ось вращения проходит через локтевой сустав, мышца прикреплена на расстоянии $d = 5$ см от него.

Как известно, основным закон динамики вращательного движения является аналогом второго закона Ньютона для вращающихся тел. Следующие задачи помогут проиллюстрировать действие этого закона. Часть из них связана с преобразованием поступательного движения во вращательное, осуществляющимся в узлах трения человека — в суставах (см. § 13).

Задача 22.8. На рисунке 4.2 изображено предплечье руки человека, сообщающее шару массой 10 кг ускорение 8 м/с^2 за счет действия трехглавой мышцы — трицепса. Вычислите: а) момент силы, необходимый, чтобы сообщить телу такое ускорение; б) силу, которую создает трицепс. Массой руки можно пренебречь.

Задача 22.9. Предположим, что бросок мяча массой 1 кг совершается исключительно за счет предплечья, которое вращается относительно локтевого сустава под действием трехглавой мышцы (см. рис. 4.2). Первоначально покоящийся мяч достигает скорости 10 м/с за 0,22 с и в этот момент отпускается. Вычислите: а) угловое ускорение предплечья; б) силу, создаваемую трехглавой мышцей. Будем считать, что масса предплечья равна 3,2 кг и оно вращается как однородный стержень относительно оси, проходящей через его конец.

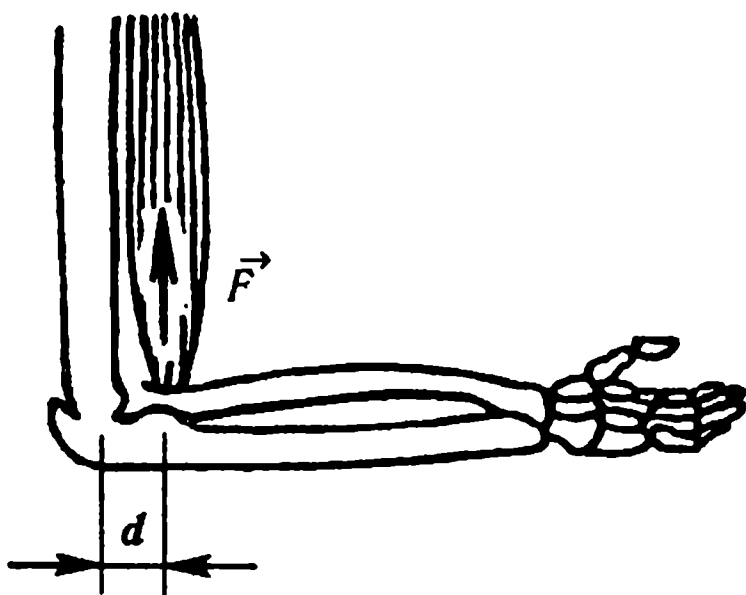


Рис. 4.1

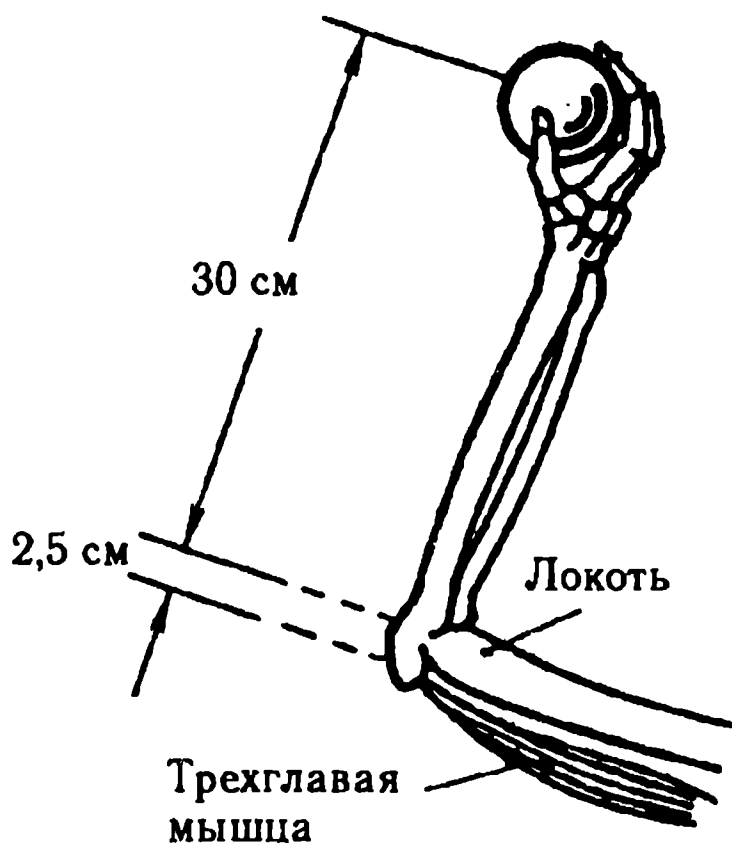


Рис. 4.2

Задача 22.10. Метатель молота за 4 оборота сообщает первоначально покоящемуся молоту массой 7,3 кг скорость 27,2 м/с, после чего его бросает. Предположив, что угловая скорость молота увеличивается равномерно, а радиус окружности, описываемой молотом, равен 2 м, вычислите: а) угловое ускорение; б) линейное (тангенциальное) ускорение; в) центростремительное (нормальное) ускорение молота перед броском; г) силу, действующую на молот со стороны атлета непосредственно перед броском.

Задача 22.11. У млекопитающих, существование которых зависит от умения быстро бегать, форма ног такова, что внизу они довольно тонкие, а мясо и мышцы сосредоточены высоко наверху (вблизи лопаток). Объясните с точки зрения динамики вращательного движения, почему такое распределение массы у животных целесообразно.

Задача 22.12. Какой тормозящий момент следует приложить к Земле, чтобы ее вращение остановилось через 10^7 лет?

3. Вычисление кинетической энергии вращающегося тела

Задача 22.13. Используя результаты задачи 22.2, определите: а) изменение кинетической энергии при изменении человеком позы от стойки «смирно» до положения с горизонтально раскинутыми руками; б) в каком случае человеку труднее поднять руки: когда он вращается или когда он покоится.

Задача 22.14. Чему равна кинетическая энергия Земли при вращении ее вокруг своей оси? Примите $I = 0,2 mR^2$, $m = 6 \cdot 10^{24}$ кг, $R = 6,4 \cdot 10^6$ м.

Задача 22.15. Чему равна кинетическая энергия Луны при обращении ее вокруг Земли? Масса Луны $m = 7,3 \cdot 10^{22}$ кг, расстояние от Земли до Луны $R_{зл} = 3,84 \cdot 10^8$ м.

Задача 22.16. Оцените приближенно кинетическую энергию Земли относительно Солнца, представив ее в виде двух слагаемых:

- 1) энергии при обращении вокруг Солнца с периодом 1 год;
- 2) энергии при вращении вокруг собственной оси с периодом 1 сут.

Считайте Землю однородным шаром массой $6 \cdot 10^{24}$ кг и радиусом $6,4 \cdot 10^6$ м. Расстояние от Земли до Солнца составляет $1,5 \cdot 10^{11}$ км.

Интересен следующий аспект изучаемой темы.

Планы преобразования Солнечной системы связаны, по мнению некоторых ученых, с изменением скорости собственного вращения некоторых ее тел с целью формирования на их поверхности климата, подходящего для человека. Эти авторы [48, 198] считают целесообразным уменьшение длительности суток на Меркурии и Луне, поскольку из-за медленного вращения этих планет на их поверхности наблюдается огромный перепад дневных и ночных температур (см. § 8).

Задача 22.17. Оцените, какая потребовалась бы энергия для сокращения длительности суток на Меркурии до 25 ч.

Необходимо отметить, что у такого «преобразования» природы, конечно, будут и негативные последствия. Одним из

них является потеря планетой значительной части своей атмосферы.

Задача 22.18. Какие негативные последствия могут иметь место при таком «преобразовании»?

§ 23. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса

Ознакомление с вращательным движением твердых тел продолжается при изучении темы «Момент импульса. Закон сохранения момента импульса».

Закон сохранения момента импульса и движение космических объектов Более широкое распространение вращательного движения космических объектов по сравнению с объектами макро- и микромиров находит отражение в количестве задач, иллюстрирующих те или другие области применения. Чаше других при изучении данной темы мы будем рассматривать задачи с астрономическими сюжетами.

Решение задач по теме целесообразно начать с вычисления собственных и орбитальных моментов импульса вращающихся тел.

Задача 23.1. Вычислите собственный (относительно собственной оси вращения) момент импульса Земли. Считайте Землю правильным шаром радиусом $6 \cdot 10^6$ м и плотностью $5,5 \cdot 10^3$ кг/м³.

Задача 23.2. Вычислите орбитальный момент импульса Земли. Каково отношение собственного и орбитального моментов импульса Земли?

Задача 23.3. Чему равен полный момент импульса системы Земля—Луна?

Задача 23.4. Каково отношение собственных моментов импульса Земли и Луны?

Задача 23.5. Вычислите собственные и орбитальные моменты импульса тел Солнечной системы. Результаты запишите в таблицу 4.1. Вычислите, какой процент от общего момента импульса системы составляют орбитальные моменты импульса Солнца и планет, результаты также запишите в таблицу.

Анализ полученных результатов позволяет обнаружить, что все планеты и Солнце обладают моментами импульса. Собственные моменты импульса тел Солнечной системы гораздо меньше их орбитальных моментов. Направление вектора \vec{L} для всех тел примерно одинаково. Момент импульса нашей планетной системы распределен неодинаково. На долю

Солнца приходится 0,15% массы и 98% момента импульса всей системы. Диаграмма, иллюстрирующая это обстоятельство, приведена на рисунке 4.3.

Таблица 4.1

Характеристики вращательного движения тел Солнечной системы

Тело	Среднее расстояние от Солнца, 10^9 м	Период вращения вокруг оси	Период обращения вокруг Солнца, годы	Собственный момент импульса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	Орбитальный момент импульса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	Доля от суммарного момента импульса, %
Солнце	—	25.4 сут	—			
Меркурий	58	58,65 сут	0,241			
Венера	108	243 сут	0,615			
Земля	150	23 ч 56 мин 4 с	1,000			
Марс	228	24 ч 37 мин 23 с	1,881			
Юпитер	778	9 ч 50 мин	11,86			
Сатурн	1426	104 ч 14 мин	29,46			
Уран	2869	10,8 ч	84,01			
Нептун	4496	15,8 ч	164,8			
Плутон	5900	6,4 сут	247,7			

Несмотря на такое соотношение, при котором на долю Солнца приходится почти весь момент импульса Солнечной системы, Солнце — медленно вращающаяся звезда.

Задача 23.6. Предположим, что все планеты нашей системы упали на Солнце и его момент импульса увеличился до 100%. Во сколько раз увеличилась бы при этом скорость вращения Солнца?

Расчеты показывают, что в результате таких изменений экваториальная скорость вращения нашей звезды должна увеличиться в 50 раз. Но это соответствует скорости вращения обычных горячих звезд. Отсюда вывод: аномально медленное вращение Солнца можно объяснить тем, что значительная часть его момента импульса отдана планетной системе. Таким образом, поиск не обнаруживаемых с помощью телескопов планетных систем можно заменить отысканием звезд с низкой скоростью собственного вращения. В современных теориях

эволюции звезд утверждается, что если процесс образования Солнечной системы — обычное явление, то потеря звездой своего момента импульса связана с существованием у нее планетной системы. Это одно из важнейших исходных положений, которые принимаются в расчет при оценке вероятности существования внеземных цивилизаций (ВЦ). По самым грубым подсчетам, таких звезд в нашей Галактике примерно 10^{10} .

Момент импульса — третья из сохраняющихся в механике величин. Справедливость закона сохранения момента импульса обусловлена изотропностью пространства, под которой понимается эквивалентность различных направлений в пространстве. Это означает, что развитие событий в изолированной системе не зависит от того, как она ориентирована в пространстве.

Изменить момент импульса системы можно при наличии неравного нулю момента внешних сил.

Примером действия закона сохранения импульса является обращение Земли вокруг Солнца, Луны и других спутников вокруг своих центральных тел.

Задача 23.7. Покажите, что момент импульса Земли относительно Солнца — величина постоянная.

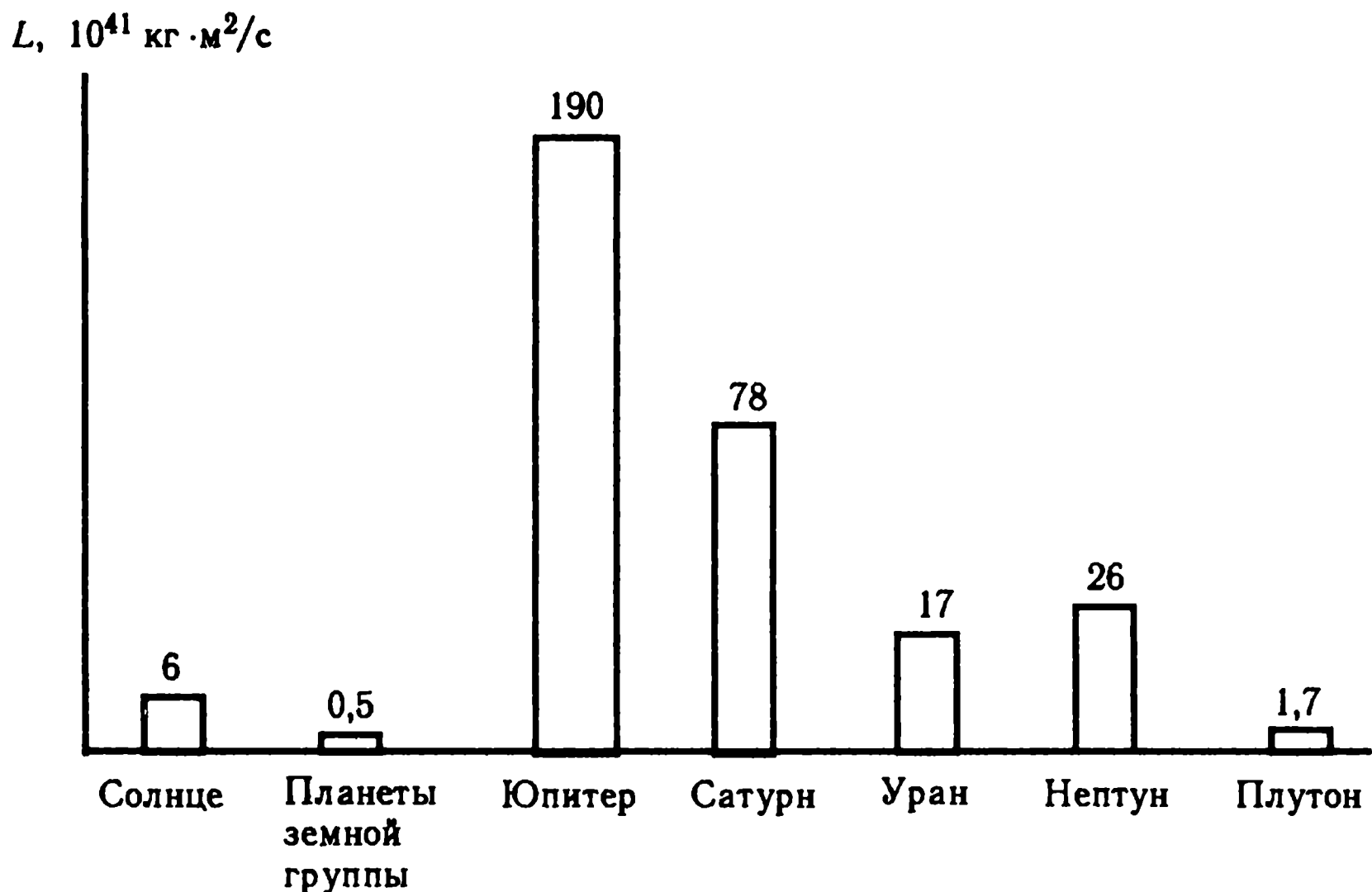


Рис. 4.3

Р е ш е н и е

При движении Земли вокруг Солнца на нее действует лишь гравитационная сила $F = \frac{GMm}{r^2}$. Поскольку она на-

правлена по радиусу, ее момент равен $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = 0$, так как $\sin 0^\circ = 0$. Следовательно, $\Delta L = 0$, а $L = \text{const}$.

Постоянство момента импульса означает постоянство угловой скорости обращения планеты вокруг Солнца, т.е. постоянство продолжительности земного года.

В реальных условиях нашего мира момент импульса Земли возрастает. Одна из причин этого заключается в том, что на поверхность Земли непрерывно выпадают метеориты.

Задача 23.8. Оцените изменение момента импульса и периода обращения Земли вокруг Солнца за счет выпадения на поверхность планеты метеоритов. Примите, что за год масса Земли возрастает на $5 \cdot 10^6$ кг.

Результаты расчетов дадут изменение периода на 0,57 с за столетие.

Так обстоят дела с орбитальным моментом импульса Земли. Изменение момента импульса системы Земля—Луна по указанной выше причине будет гораздо заметнее.

Задача 23.9. Метеорит массой 10^5 т, двигавшийся со скоростью 50 км/с, ударился о Землю на широте 60° . Вся его кинетическая энергия перешла во внутреннюю энергию, а сам он испарился. Как изменится продолжительность суток вследствие такого удара?

Задача 23.10. Если бы вдруг произошла значительная миграция населения Земли в сторону экватора, то как это сказалось бы на продолжительности земных суток?

Задача 23.11. Покажите, что из закона сохранения момента импульса для вращающегося тела сферической формы следует сохранение величины $\frac{R^2}{T}$.

Задача 23.12. После того как у звезды происходит выгорание термоядерного горючего, она испытывает гравитационный коллапс и сжимается. В соответствии с законом сохранения момента импульса величина $\frac{R^2}{T}$ должна оставаться постоянной. Каким будет минимальный радиус Солнца, прежде чем оно «разлетится на части»? Последнее произойдет, когда центростремительное ускорение станет больше ускорения свободного падения на его поверхности. Солнце совершает один оборот вокруг своей оси за 25 сут.

Задача 23.13. Период радиоизлучения пульсара изменяется в пределах $3 \cdot 10^{-2} - 4$ с. Определите период вращения пульсара, в который превратилось бы Солнце, сжавшееся в результате гравитационного коллапса

в нейтронную звезду. Плотность вещества нейтронной звезды считать равной 10^{17} кг/м³. Пренебречь изменением плотности в разных слоях Солнца и тем фактом, что его слои вращаются с разными скоростями. В настоящее время плотность Солнца $1,41 \cdot 10^3$ кг/м³, а период его вращения $2,2 \cdot 10^6$ с.

Задача 23.14. Как объяснить, опираясь на закон сохранения момента импульса, форму нашей Галактики?

Р е ш е н и е

Рассмотрим очень большую массу газа, обладающего первоначально некоторым моментом импульса. Газ сжимается в результате гравитационного взаимодействия. Так как объем, а с ним и радиус становятся меньше, закон сохранения момента импульса требует, чтобы увеличивалась угловая скорость вращения. Работа, идущая на увеличение угловой скорости вращения и равная изменению кинетической энергии

$$A = \Delta W_1 = \frac{Mv_0^2 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2}{2},$$

может быть получена только за счет изменения потенциальной энергии:

$$\Delta W_2 = -\frac{GMm}{r}.$$

Полная энергия $W = W_1 + W_2$ обладает экстремальным значением, т.е.

$$\frac{d(W_1 + W_2)}{dt} = 0, \text{ или}$$

$$d \left(\frac{Mv_0^2 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2}{2} - \frac{GMm}{r} \right) = 0.$$

При условии, что $r = f(t)$, имеем

$$-\frac{Mv_0^2 r_0^2}{r^3} + \frac{GMm}{r^2} = 0,$$

$$\text{или } r = \frac{v_0^2 r_0^2}{GM} = \frac{v^2 r^2}{GM} = 0.$$

Получили, что сжатие в экваториальной плоскости ограничено величиной r . Сжатие в направлении, параллельном \vec{L} ,

обусловленное лишь гравитационным взаимодействием, может быть очень сильным. Таким образом объясняется дискообразная форма Галактики [31, 210].

Закон сохранения момента импульса Действие закона сохранения момента импульса проявляется во многих явлениях, и некоторые виды связанных с движением человека. Например, движения человека мер, фигуристка, выполняющая вращение на льду, сначала, когда ее руки раздвинуты в стороны, вращается с небольшой угловой скоростью. Прижимая руки к телу, фигуристка сразу начинает вращаться быстрее, так как при этом уменьшается ее момент инерции.

Задача 23.15. Пользуясь результатом задачи 22.3, оцените, как изменяется частота вращения фигуристки, если в начале вращения она стояла на носке с разведенными в стороны руками, а в конце вращения прижимала руки к туловищу.

Аналогичные явления происходят с прыгуном в воду. Момент импульса, необходимый для совершения вращения, он приобретает, отталкиваясь от гибкой доски. В процессе прыжка момент импульса сохраняется приблизительно одинаковым. А скорость вращения зависит от того, как спортсмен распределит свою массу. Группируясь, т.е. подтягивая руки и ноги к туловищу, спортсмен уменьшает свой момент инерции, увеличивая соответственно скорость своего вращения. И наоборот, выпрямляя руки и ноги, спортсмен увеличивает свой момент инерции и уменьшает скорость вращения до совсем малого значения перед входом в воду.

Задача 23.16. Оцените момент импульса, приобретаемый человеком при прыжке в воду с трамплина.

Задача 23.17. Прыгун в воду может уменьшить свой момент инерции примерно в 3,5 раза, если сгруппируется. Чему равна угловая скорость его вращения в распрямленном состоянии, если при вращении в группировке он может совершить 2 оборота в секунду?

Задача 23.18. Карусель диаметром 0,8 м свободно вращается с угловой скоростью 0,7 рад/с; ее момент инерции 1750 кг·м². Стоящие на земле 4 человека массой по 65 кг одновременно прыгают на край карусели. Чему после этого будет равна угловая скорость карусели? Какой была бы угловая скорость, если бы люди, стоящие вначале на карусели, в некоторый момент спрыгнули бы с нее на землю?

Задача 23.19. Человек стоит с вытянутыми в стороны руками на платформе, которая вращается с частотой 0,5 с⁻¹. Если человек под-

нимает руки вверх, то скорость вращения увеличивается. Чему она станет равна?

Задача 23.20. Платформа диаметром 6 м имеет момент инерции $1800 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. В начальный момент времени платформа находится в покое, но, когда человек массой 60 кг начинает бежать со скоростью 4,2 м/с по ее периметру, платформа приходит во вращение в противоположную сторону. Вычислите угловую скорость платформы.

Задача 23.21. Пусть в предыдущей задаче человек держит в каждой руке гирию массой 15 кг. Чему равно отношение угловых скоростей платформы для двух случаев: 1) руки человека подняты в стороны; 2) руки опущены вниз?

Задача 23.22. Две девочки массой 50 кг каждая находятся на противоположных концах доски длиной 6 м, масса которой пренебрежимо мала. Доска с девочками равномерно вращается вокруг оси, проходящей через центр доски, с частотой $1,5 \text{ с}^{-1}$. Предположим, одна из девочек передвинулась вдоль доски до точки, находящейся на половине расстояния от оси вращения. Какова новая угловая скорость системы?

Глава 5

СТАТИКА

§ 24. Элементы статики

Статика занимается изучением сил, действующих на тела, находящиеся в равновесии. Методы статики применяются в самых различных областях деятельности человека. Архитекторы и инженеры должны уметь рассчитывать силы, действующие на конструкционные элементы зданий, мостов, станков, автомобилей, космических кораблей и других объектов, поскольку любой материал может деформироваться или разрушаться, если приложить к нему очень большую силу.

Статика в теле человека Знание сил, действующих в суставах и мышцах человека, очень важно для медицины (и прежде всего для лечения травм), не менее важно для научного подхода к занятиям спортом.

Задача 24.1. Где следует посадить ребенка массой 20 кг, чтобы уравновесить качели длиной 4 м? Отец (масса 70 кг) и мать (масса 60 кг) сидят на концах качелей.

Задача 24.2. Трос имеет длину 10 м и массу 20 кг. Один конец его прикреплен к балке, выступающей из стены здания. Человек массой 80 кг скользит вниз по тросу с постоянной скоростью 0,8 м/с. Чему будет равно натяжение троса на расстоянии 5 м от вершины, когда человек достигнет этой точки?

Задача 24.3. Мужчина удерживает с помощью блока груз массой M в статическом равновесии (рис. 5.1). Какова сила натяжения в каждом канате, если $M = 30$ кг, а масса балки $m = 20$ кг?

Много задач на равновесие сил можно сформулировать, рассматривая системы вытяжки костей. При лечении травм, чтобы срастить сломанные кости или устранить другие повреждения, необходимо фиксировать травмированные участки и уравновешивать силы, которые действуют в месте

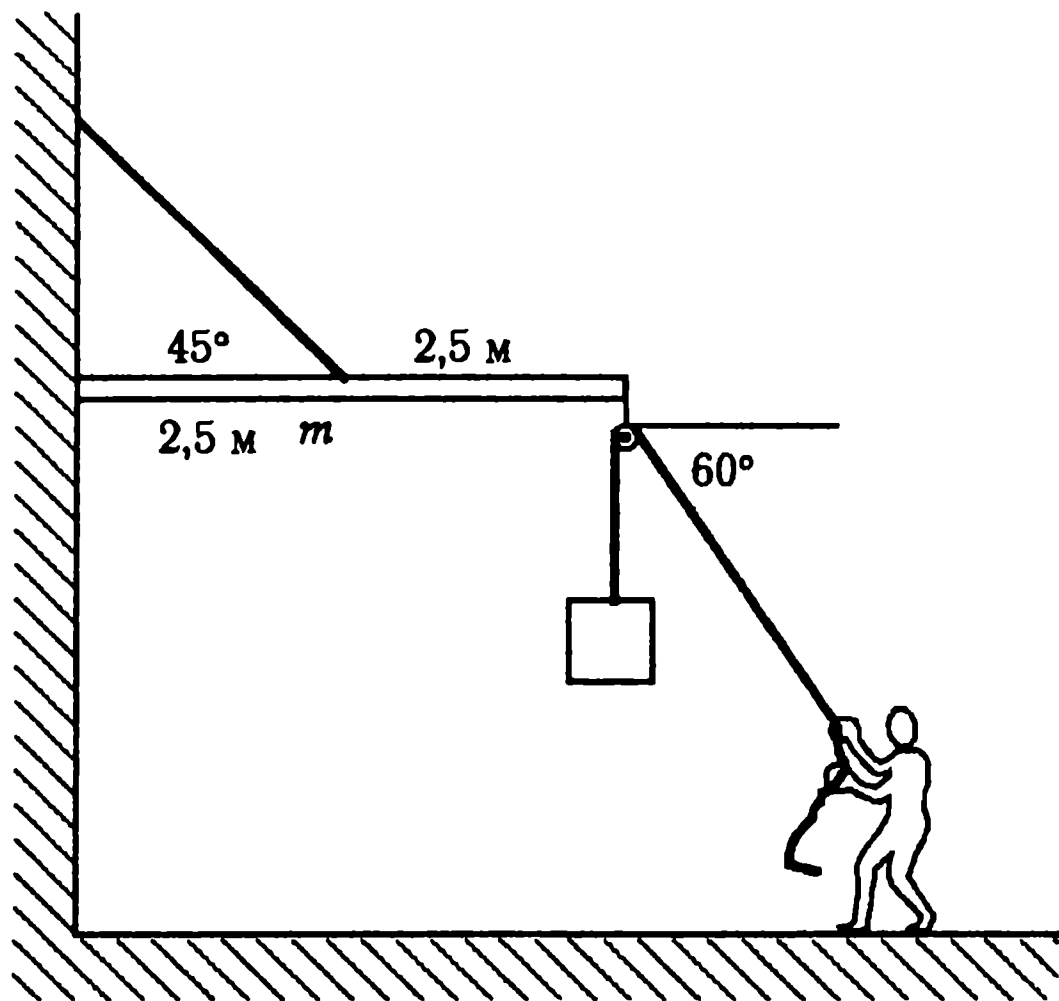


Рис. 5.1

перелома, до тех пор, пока он не срастется. Во врачебной практике для этого применяют различные системы вытяжки, использующие грузы, тросы и блоки. Конструкция всех этих систем основана на том, что натяжение троса одинаково во всех его точках и равно Mg , где M — масса груза, создающего натяжение. (При этом предполагается, что масса блока мала, так же как и трение в блоке.) Блоки обычно служат для изменения направления действия силы.

Задача 24.4. Сравните силы, действующие в двух системах вытяжки (рис. 5.2, а, б). Найдите равнодействующую этих сил.

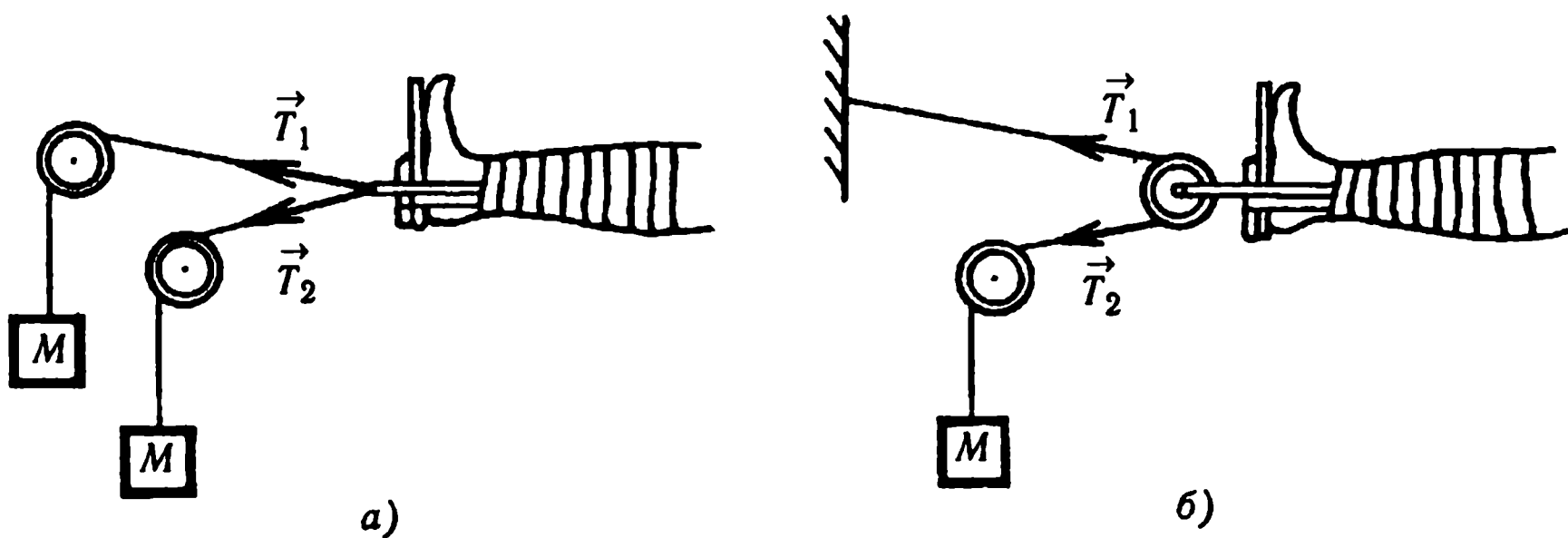


Рис. 5.2

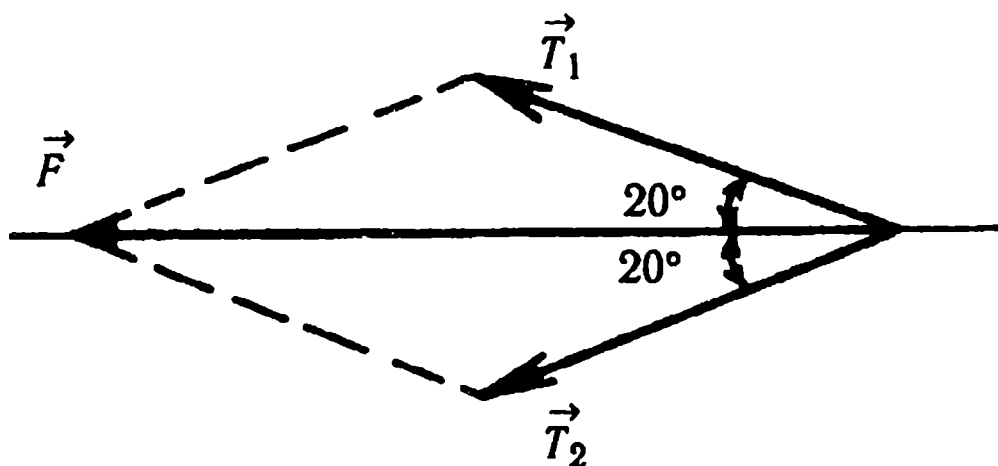


Рис. 5.3

Задача 24.5. Пусть силы натяжения \vec{T}_1 и \vec{T}_2 (см рис. 5.2, а) составляют угол 20° с горизонтом, грузы имеют массу по 5 кг, а сила \vec{F} , действующая на ногу, равна по модулю 92 Н и направлена горизонтально (рис. 5.3). Предположим, что ногу пациента приподнимают до тех пор, пока сила \vec{T}_2 не станет горизонтальной, а сила \vec{T}_1 не станет направлена под углом 30° к горизонту. Каково значение и направление силы, действующей на ногу?

Задача 24.6. На рисунке 5.4,а изображена система вытяжки, используемая для иммобилизации бедра. Найдите значение и направление силы \vec{F} (рис. 5.4,б), действующей на бедро при массе груза $M = 4$ кг.

Задача 24.7. Найдите значение и направление силы, действующей на голову пациента в системе вытяжки шеи, показанной на рисунке 5.5, если масса груза $M = 1,5$ кг.

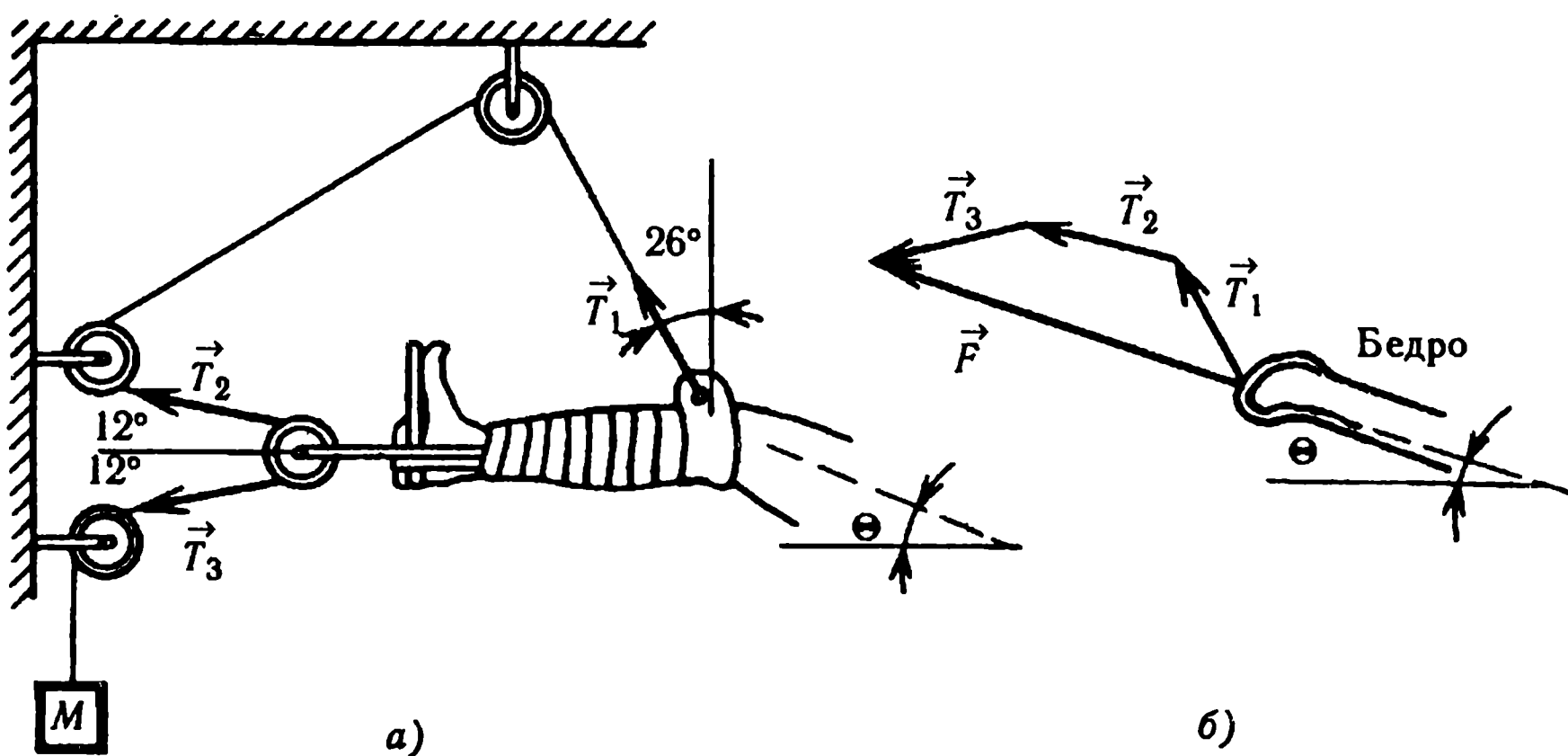


Рис. 5.4

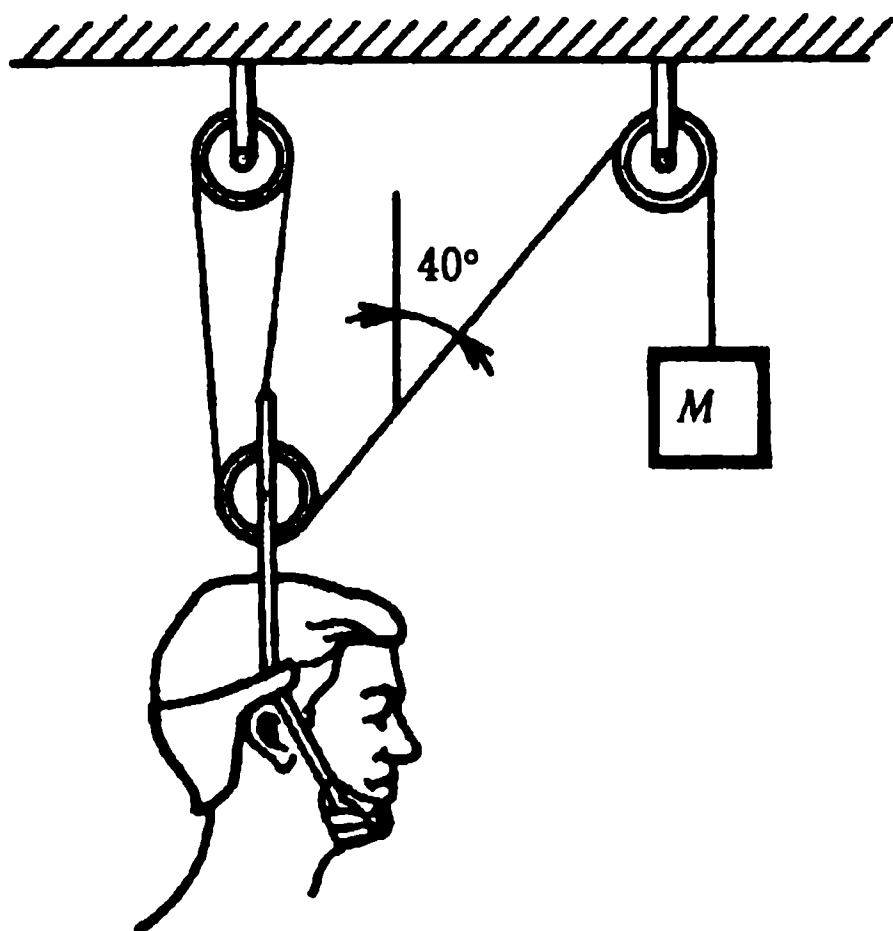


Рис. 5.5

Центр тяжести тела человека

Для реализации идеи гуманитаризации курса физики можно рассмотреть задачи на определение центра тяжести тела человека. Начнем с простых задач, доступных даже школьникам младших классов.

Задача 24.8. Где находится центр тяжести тела человека? От чего зависит его положение? Предложите способ экспериментального определения центра тяжести тела человека.

Одним из возможных ответов может быть такой. Человек ложится на пол или другую горизонтальную подставку, опираясь животом на валик. Перемещая валик, находит положение, при котором его тело в состоянии мускульного напряжения будет находиться в равновесии. Точка опоры в этом случае и укажет положение центра тяжести тела человека.

Другим вариантом ответа может быть способ, описанный в следующей задаче.

Задача 24.9. Человек ростом 160 см лежит на доске с пренебрежимо малой массой, установленной на двух весах таким образом, что одни весы находятся под макушкой, а другие — под ступнями ног лежащего. Показания весов равны соответственно 32,8 кг и 29,8 кг. Где находится центр тяжести лежащего человека?

Можно определить положение центра масс тела среднего человека на основании антропологических исследований большого количества людей, как это было сделано американской службой НАСА (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

Положения центров масс различных частей тела среднего человека

Расстояние от пола до суставов, % полного роста	Суставы (●)	Расстояние от пола до центра масс различных частей (✱), % полного роста	Процент массы тела
91,2	Позвонок у основания черепа	Голова	93,5 6,9
81,2	Плечевой сустав	Верхняя часть рук	71,7 6,6
	Локоть 62,2	Туловище и шея	71,1 46,1
	Запястье 46,2	Нижняя часть рук	55,3 4,2
52,1	Тазобедренный сустав	Кисти рук	43,1 1,7
	Коленный сустав	Верхняя часть ног (бедра)	42,5 21,5
28,5		Нижняя часть ног	18,2 9,6
4,0	Лодыжка	Ступни	<u>1,8</u> <u>3,4</u>
			58,0 100,0

Задача 24.10. Человек имеет массу 80 кг, рост 183 см. Каково положение центра масс этого человека (над уровнем пола), когда он находится в нормальном положении стоя?

Задача 24.11. Предположим, что человек (см. предыдущую задачу) поднял обе руки вверх. Каково новое положение центра масс?

Задача 24.12. Где находится центр масс женщины: выше или ниже, чем у мужчины? Объясните ваши рассуждения.

Задача 24.13. Оцените положение вашего центра масс, когда вы наклоняетесь и касаетесь пола пальцами рук.

Рычаги в теле человека

Еще одним гуманитарным приложением темы, логически продолжающим вопрос о равновесии сил, является проблема рычага.

Задача 24.14. Чтобы приподнять валун массой 200 кг, подсовывают под него конец двухметрового лома. Точкой опоры служит бревно, лежащее в 25 см от конца лома. С какой силой нужно надавить на другой конец лома, чтобы сдвинуть валун?

Рычаг обладает очень важным свойством, обусловившим его широкое распространение в природных механизмах, таких, например, как скелеты человека и животных. Это свойство — очень высокий коэффициент полезного действия, достигающий 98—100% [29, 39]. Высокий КПД рычага определяется тем, что в нем малы потери на трение.

Рычажными механизмами в скелетах животных и человека являются почти все кости, имеющие некоторую свободу движения: кости конечностей, нижняя челюсть, череп (точка опоры — первый позвонок), фаланги пальцев.

Главные кости и мышцы руки человека показаны на рисунке 5.6. Кисть посредством лучезапястного сустава крепится к лучевой кости, которая, в свою очередь, прикрепляется к локтевой кости посредством локтевого сустава. При помощи плечевого сустава рука крепится к лопатке.

Основными рабочими мышцами руки, отвечающими за перемещение предплечья, являются бицепс (двуглавая мышца) и трицепс (трехглавая мышца). Как все мышцы, они не могут создавать толкающих усилий — они могут только

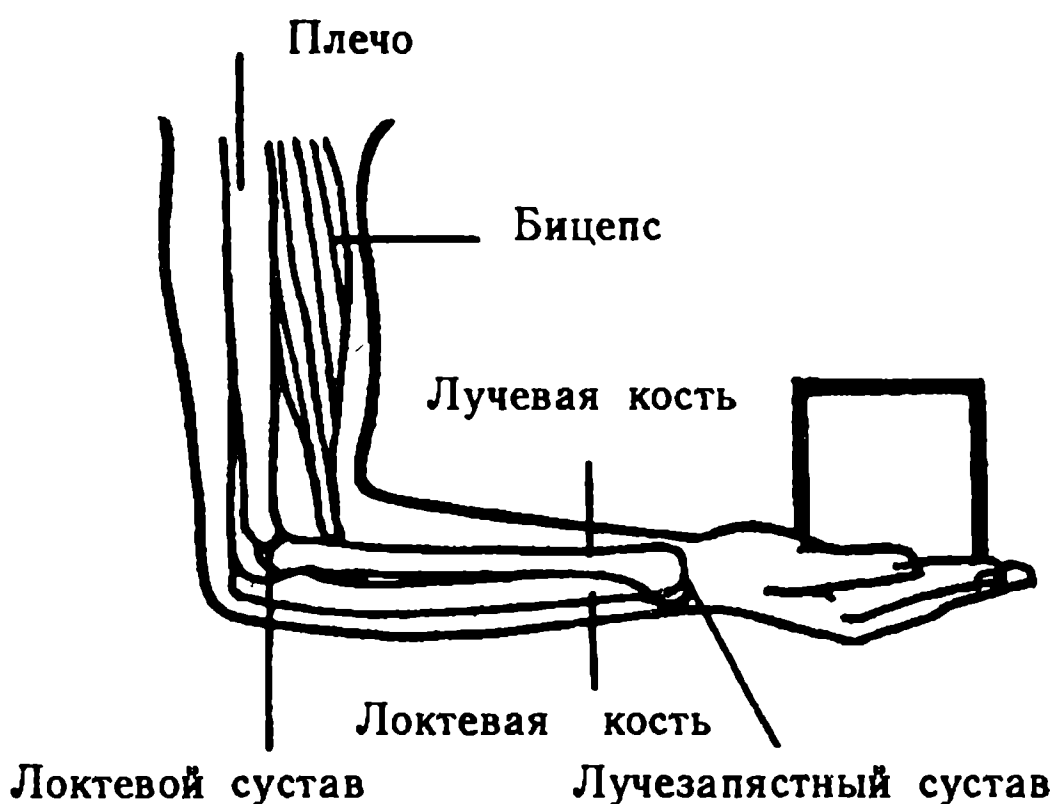


Рис. 5.6

тянуть. Когда человек поднимает одной рукой предмет, бицепс сокращается, а трицепс удлиняется. Когда человек опускает предмет, происходит противоположное, в чем нетрудно убедиться на опыте.

В частности, чтобы удержать груз некоторой массы, необходимо усилие мышцы F_2 , почти в 10 раз превышающее силу тяжести, действующую на груз.

Последнее обстоятельство не означает тем не менее, что рука как рычаг далека от совершенства. Напротив, то, что мы проигрываем в силе, не имеет особого значения, так как мышцы обладают достаточной силой. Важно, что, проигрывая в силе, мы выигрываем в расстоянии. Это значит, что достаточно небольшого движения мышцы, чтобы заставить кисть двигаться с большим размахом. Большие перемещения на выходе руки-рычага обуславливают большие скорости движения кисти.

Известный популяризатор науки Л.В.Тарасов по этому поводу сказал следующее: «Вообразим ... что мышца была бы прикреплена, например, в середине лучевой кости. Такой рычаг позволил бы нам удерживать и поднимать в 5 раз более тяжелые грузы. Но зато мы бы в 5 раз проиграли в высоте и скорости подъема... К тому же какими поистине уродливыми сделались бы наши конечности! Кому нужен выигрыш в силе, если он достигается путем утраты подвижности, свободы перемещения, изящности строения тела? Именно потому, что природа предпочла проиграть в силе, наши конечности оказались столь совершенными» [38, 324].

С другой стороны, небольшое (1—2 см) увеличение плеча силы, действующей на бицепс (за счет перемещения точки крепления бицепса к лучевой кости), было обнаружено у спортсменов, обладающих выдающимися способностями по подъему тяжестей или метанию копья.

Задача 24.15. Какая сила действует со стороны плеча на локтевой сустав в руке, согнутой под углом 90° к горизонту? Масса удерживаемого груза 10 кг.

Р е ш е н и е

Силы, действующие на мышцы и кости руки человека, схематически показаны на рисунке 5.7:

\vec{F}_1 — сила, действующая со стороны плеча на локтевой сустав;

\vec{F}_2 — сила, действующая со стороны бицепса на локтевой сустав;

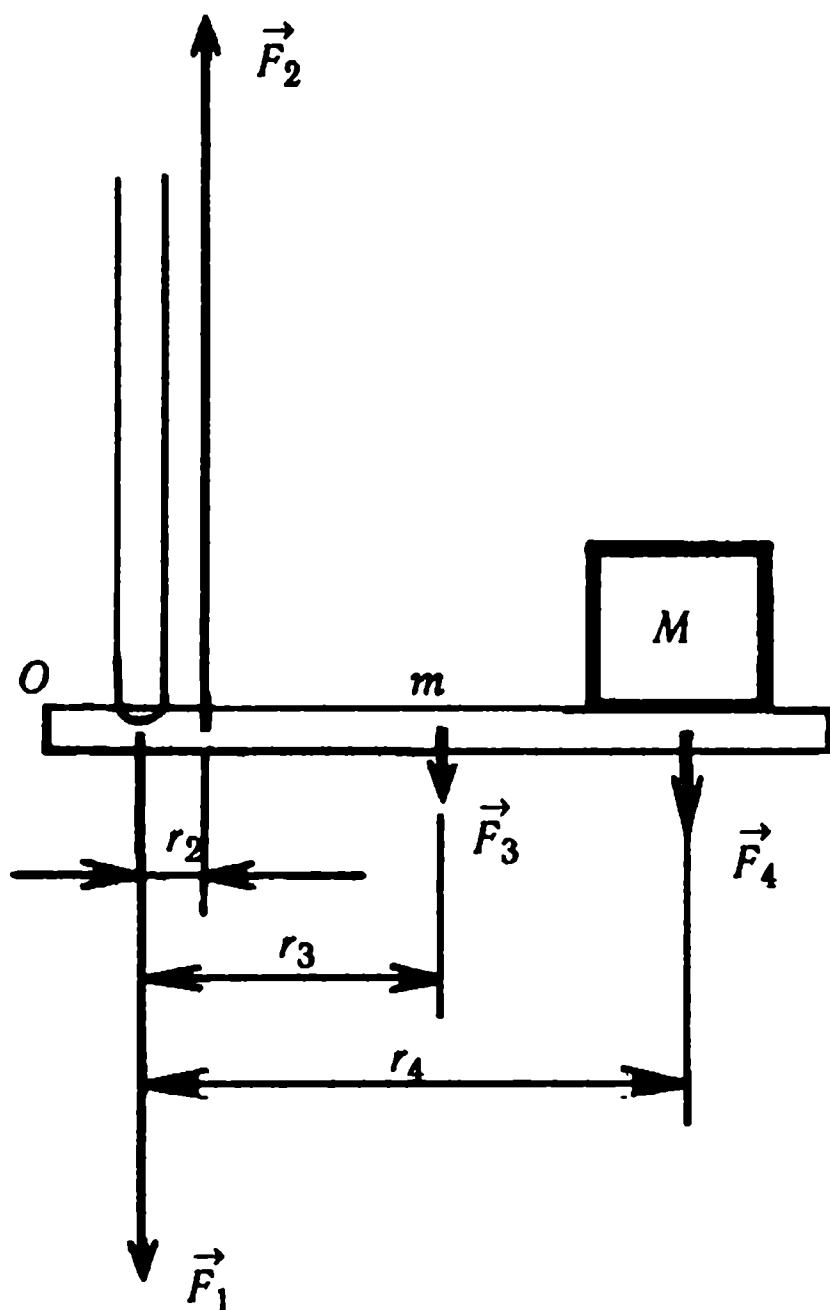


Рис. 5.7

$\vec{F}_3 = m\vec{g}$ — сила тяжести, действующая на систему рука—кисть;

$\vec{F}_4 = M\vec{g}$ — вес груза;

r_2 — расстояние от локтя (точка O) до точки присоединения бицепса (обычно 4 см);

r_3 — расстояние от точки O до центра масс системы рука—кисть;

r_4 — расстояние от точки O до центра масс груза (считается, что он совпадает с центром масс руки).

Если предположить, что человек, удерживающий груз, имеет массу 80 кг и рост 1,83 м, то величины, характеризующие руку как рычаг, могут быть такими: $r_4 = 0,35$ м; $r_3 = 0,19$ м; $F_3 = 24$ Н; $F_4 = 98$ Н.

Решая уравнения сил и моментов

$$\Sigma \vec{F} = 0; \quad \Sigma \vec{M} = 0,$$

получаем

$$\begin{aligned} F_2 - (F_1 + F_3 + F_4) &= 0; \\ r_1 F_1 + r_2 F_2 - r_3 F_3 &= 0. \end{aligned}$$

Окончательно имеем

$$F_2 = 968 \text{ Н}; F_1 = 847 \text{ Н}.$$

Эти силы значительно больше, чем вес груза, удерживаемого рукой.

Задача 24.16. Какую силу должен развивать бицепс, чтобы человек мог удерживать в ладони груз массой 5 кг в руке, согнутой под углом 45° (рис. 5.8)? Общая масса руки и предплечья равна 2 кг.

Другой пример рычага в теле человека — череп (рис. 5.9). Ось вращения этого рычага проходит через сочленение черепа с первым позвонком. Спереди от точки опоры на относительно коротком плече действует сила тяжести головы $m\vec{g}$, позади — сила \vec{F} тяги мышц и связок, прикрепленных к затылочной кости.

Еще одним примером рычага в теле человека является действие свода стопы при подъеме на полупальцы (рис. 5.10). Опорой рычага в этом случае служит головка плюсневых костей. Преодолеваемая сила — вес тела — приложена к таранной кости. Мышечная сила, осуществляющая подъем тела, передается через ахиллово сухожилие и приложена к выступу пятки.

Задача 24.17. Какие силы действуют на стопу человека при подъеме на полупальцы?

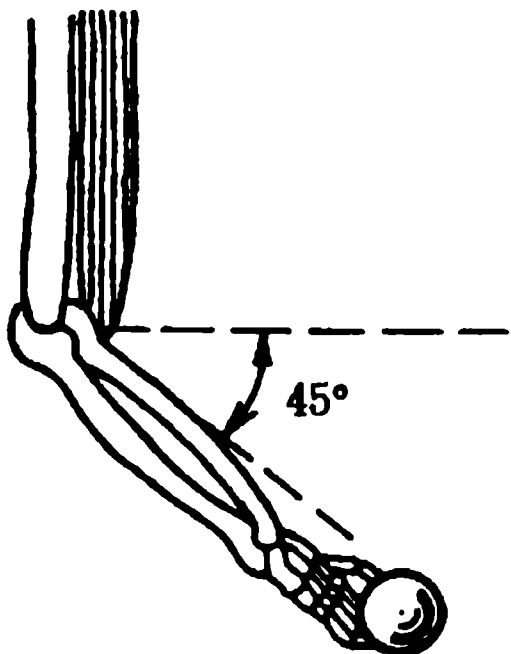


Рис. 5.8

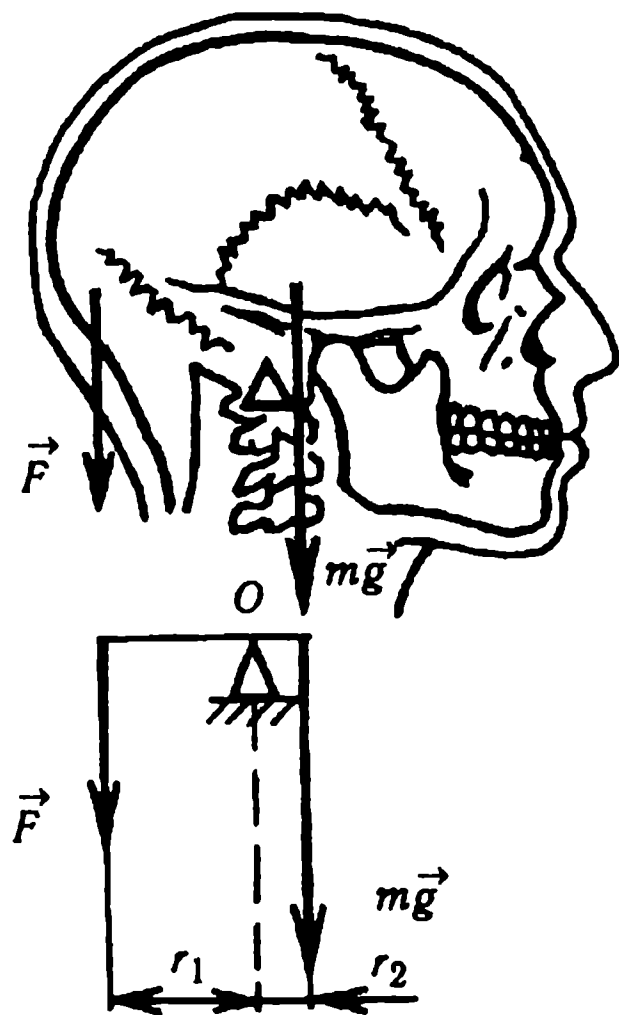


Рис. 5.9

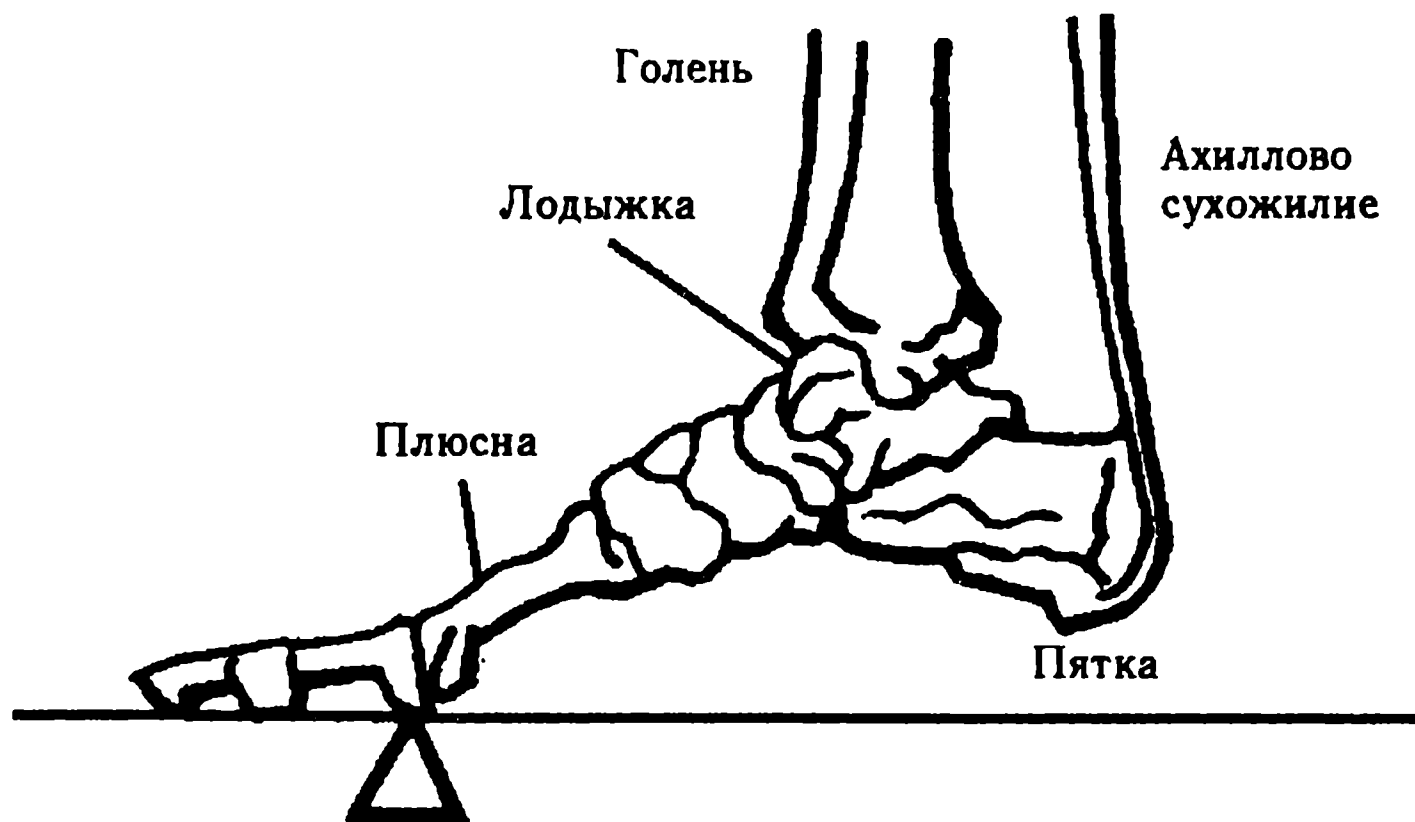


Рис. 5.10

Р е ш е н и е

На рисунке 5.11 изображены силы, действующие на стопу при подъеме на полупальцы, и их плечи:

$\vec{F}_1 = m\vec{g}$ — сила реакции пола, равная по модулю весу тела и действующая на плюсневую кость ($m = 80$ кг);

\vec{F}_2 — сила, действующая со стороны голени на верх лодыжки;

\vec{F}_3 — сила, действующая со стороны ахиллова сухожилия на пятку (считаем ее направленной вертикально вверх, хотя в действительности она образует небольшой угол с вертикалью);

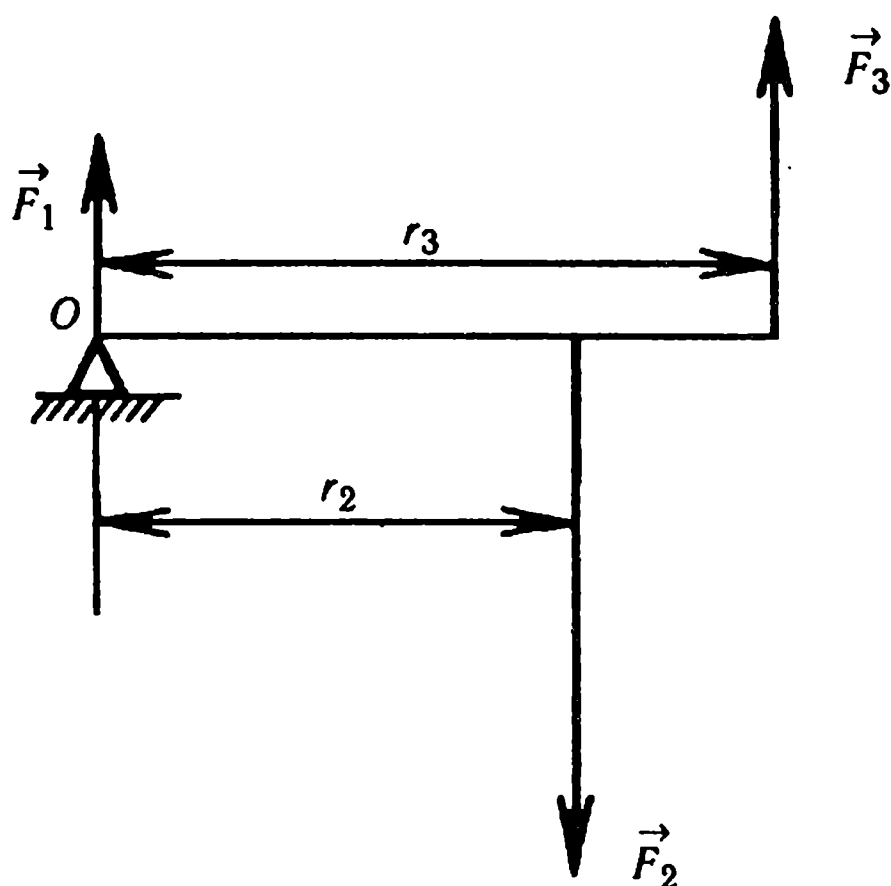


Рис. 5.11

r_2 — расстояние от соединения стопы (точки O) до точки касания плюсны и пола (обычно 12 см);

r_3 — расстояние от точки касания плюсны и пола до точки действия ахиллова сухожилия (обычно 18 см).

Исходные уравнения сил и их моментов:

$$\begin{cases} F_2 = F_1 + F_3, \\ F_3 r_3 = F_2 r_2. \end{cases}$$

Подставив числовые значения и решив эту систему уравнений, получим

$$F_3 = 1567 \text{ Н}; F_2 = 2352 \text{ Н}.$$

Теперь нетрудно понять, почему «стоять на цыпочках» так тяжело. Ведь силы, удерживающие стопу человека в таком положении, составляют $F_2 = 3 mg$ и $F_3 = 2 mg$.

**Клин — прообраз
ручных орудий
труда**

Перейдем к рассмотрению вопроса о клине. Клин — один из простых механизмов, издревле известных человеку. Ударники (чоперы, рубила) — камни, удобные для удержания кистью руки, оббитые специальным образом с целью получения острого края, — находят во множестве на местах стоянок древнего человека. Эти орудия использовались для раскалывания костей, разрубания туш, нарезания мяса, расчленения суставов и хрящей, выскабливания шкур добытых на охоте животных. Кроме того, с помощью рубил изготавливались новые орудия труда.

Интересно обсудить проблему клина с точки зрения применения его современным человеком. Поскольку размах, размер, сила мышц руки человека остались неизменными с момента возникновения вида до нашего времени, можно ожидать, что ручные орудия, основанные на применении клина, такие, как нож, топор и т.д., сохранят свое значение для человека при любом уровне развития техники. Будучи наилучшим образом приспособленными к физиологическим особенностям руки человека, они как бы являются ее продолжением, расширяют функциональные возможности хватательной конечности человека.

Как древний человек сумел придумать свое первое орудие? Конечно, он не знал законов механики. Отдельные закономерности он устанавливал из опыта, подсказывающего ему, что ударник должен быть тяжелым, а кремниевый нож — острым, что именно эти конструктивные особенности орудий наилучшим образом соответствуют предъявляемым к этим орудиям функциональным требованиям. Так единство конструктивной формы орудия с технологическим процессом его

использования, определяемое закономерностями объективного мира, познавалось в трудовой деятельности, которая накапливала материал для последующих обобщений. Интерес учащихся может вызвать информация о рождении новой науки — экспериментальной археологии. Ее родоначальники Л.Лики, С.А.Семенов, Ф.Борда научились изготавливать каменные орудия, строго придерживаясь того ассортимента средств и приемов труда, которыми обладали мастера каменного века. При этом выяснилось, что против ожидания непосвященных работа каменными орудиями довольно эффективна: например, Л.Лики за 4 мин сделал чоппер (примитивное каменное рубило), за 20 мин освежевал и разделал тушу антилопы, а ученики С.А. Семенова за 20—30 ч сумели изготовить каменный топор, а затем в течение всего 10 ч срубили вековой дуб [47, 100].

Клин широко распространен в живой природе. В элементах организмов животных и человека клин встречается преимущественно как колющее орудие: зубы, когти, рога, всевозможные колючки и жала. К клину сводится и заостренная голова быстрых рыб. Именно среди зубов, колючек и жал мы находим образцы клиньев необыкновенной остроты, соответствующих громадной механической выгоде. Увеличению КПД способствует то, что трение сводится к минимуму чрезвычайной гладкостью боковых поверхностей [28, 38].

Как работает клин? Для ответа на этот вопрос рассмотрим следующую задачу.

Задача 24.18. Каков выигрыш в силе у клина с углом заточки 20° ?

Р е ш е н и е

Пусть на тыльную сторону клина (рис. 5.12) действует сила \vec{F} . На боковые поверхности клина действуют силы реакции опоры \vec{N}_1 и \vec{N}_2 со стороны раскалываемого тела. При движении клина внутрь тела возникают силы трения $\vec{F}_{\text{тр}1}$ и $\vec{F}_{\text{тр}2}$, направленные в сторону, противоположную движению клина.

Второй закон Ньютона имеет вид

$$\vec{F} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{тр}1} + \vec{F}_{\text{тр}2} = 0.$$

(В силу симметрии клина $N_1 = N_2 = N$ и $F_{\text{тр}1} = F_{\text{тр}2} = F_{\text{тр}}$.)

В проекциях на ось Y имеем:

$$F - 2F_{\text{тр}} \cos \alpha - 2N \sin \alpha = 0,$$

где α — половина угла между гранями клина.

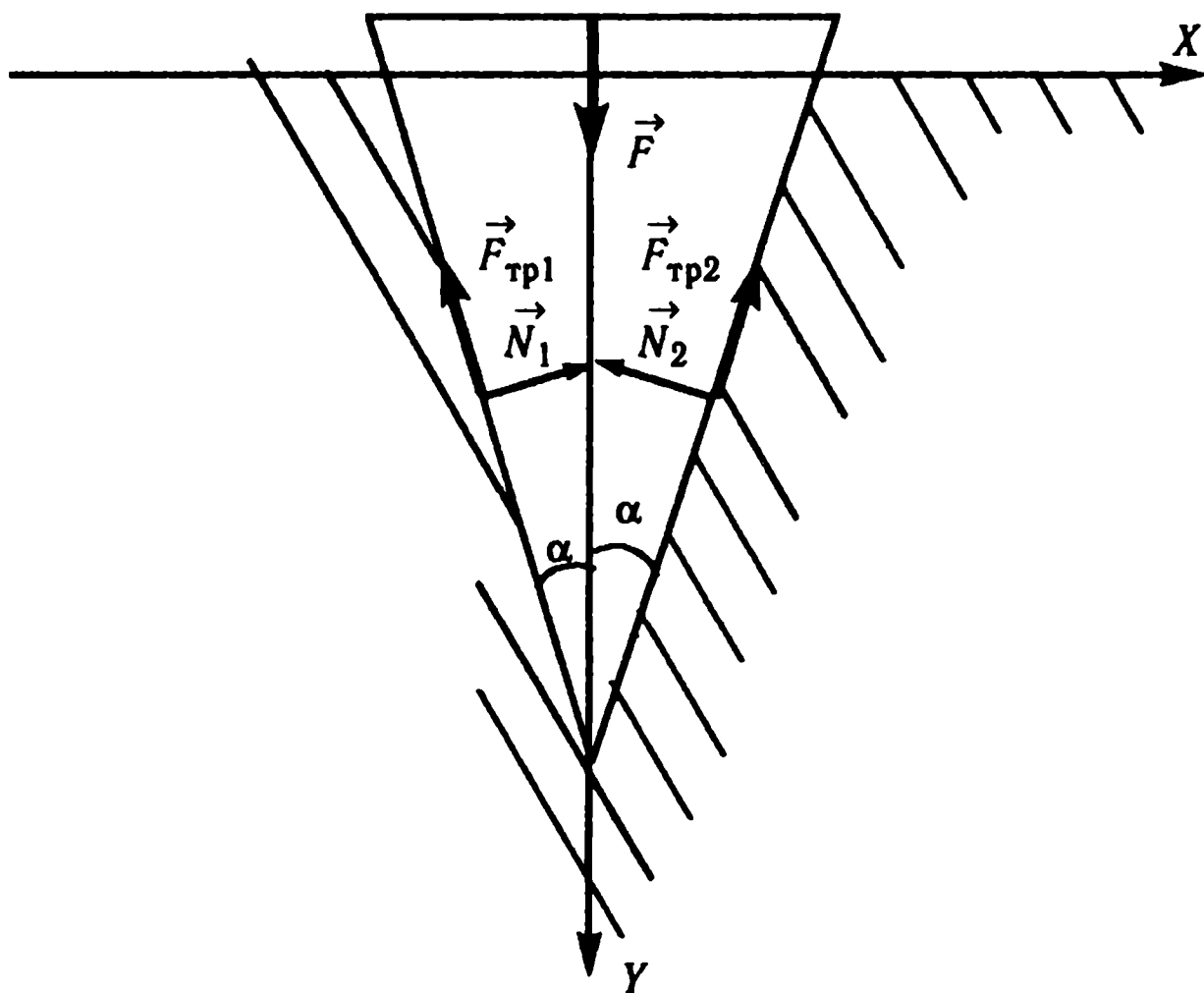


Рис. 5.12

Обозначим $\frac{N}{F} = n$. Тогда с учетом равенства $F_{\text{тр}} = kN$ получим

$$Nn - 2Nk \cos \alpha - 2N \sin \alpha = 0.$$

После сокращения на N получим

$$\frac{1}{n} = 2(k \cos \alpha + \sin \alpha) = \frac{2}{\cos \alpha} k \operatorname{tg} \alpha.$$

При $\alpha = 10^\circ$ $\sin \alpha = 0,17$, $\cos \alpha = 0,96$, $k = 0,25$, $n = 1,6$.

Задача 24.19. Стальной клин (колун), применяемый для колки дров, имеет угол между гранями 12° . Какая сила действует со стороны каждой грани, если при забивании колуна на его тупой конец действует сила 1000 Н ? Коэффициент трения между сталью и деревом взять равным $0,25$.

Задача 24.20. Клин забивают в бревно. Каков должен быть коэффициент трения, чтобы клин не выскальзывал из бревна? Угол клина равен 30° .

Р е ш е н и е

На клин в щели при отсутствии силы \vec{F} будут действовать силы $\vec{F}_{\text{тр}1}$, $\vec{F}_{\text{тр}2}$, \vec{N}_1 , \vec{N}_2 . Силы $\vec{F}_{\text{тр}1}$ и $\vec{F}_{\text{тр}2}$ будут направлены в стороны, противоположные показанным на рисунке 5.12. Второй закон Ньютона при этом имеет вид

$$ma = 2N \sin \alpha - 2kN \cos \alpha.$$

Тогда получаем, что:

а) при $\operatorname{tg} \alpha > k$ — движение с ускорением;

б) при $\operatorname{tg} \alpha = k$ — покой на грани движения;

в) при $\operatorname{tg} \alpha < k$ — полный покой.

Выражение $\operatorname{tg} \alpha \leq k$, таким образом, является условием равновесия клина. При $\alpha = 15^\circ$, $k \approx 0,26$.

Задача 24.21. Почему дровосеку легче расколоть большое бревно клином (колуном), чем топором?

Р е ш е н и е

Часто при колке дров колуном приходится долго выжидать, пока лезвие, застрявшее в дереве. Из условия равновесия системы клин—тело, имеющего вид $\operatorname{tg} \alpha \leq k$, видно, что, чем меньше угол клина, тем надежнее силы трения удерживают клин «в плену». Поэтому специально предназначенные для колки дров колуны имеют в сечении значительно больший угол, чем топоры.

**Безопасность
работы на
приставной
лестнице**

К «экологии» человека относится еще один вопрос — безопасность работы на приставной лестнице.

Задача 24.22. Лестница стоит у гладкой ровной стены (рис. 5.13). При каких условиях человек на этой лестнице застрахован от падения?

Р е ш е н и е

Введем обозначения: l — длина всей лестницы; x — расстояние, на которое поднялся человек. Будем считать,

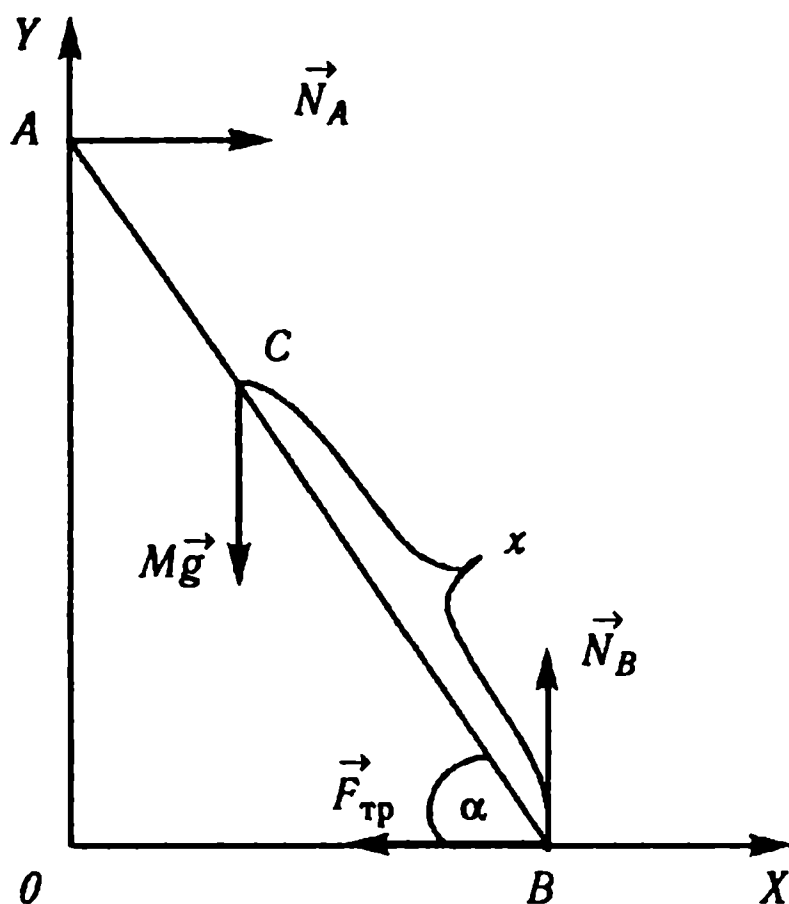


Рис. 5.13

что все трение сосредоточено в точке B и характеризуется коэффициентом трения k . Весом лестницы пренебрежем.

Запишем второй закон Ньютона:

$$0 = M\vec{g} + \vec{N}_A + \vec{N}_B + \vec{F}_{\text{тр}},$$

где $M\vec{g}$ — сила тяжести, действующая на человека; \vec{N}_A, \vec{N}_B — реакции опоры, действующие на лестницу в точках A и B .

В проекциях на оси X и Y это уравнение будет иметь вид

$$N_A = F_{\text{тр}}; N_B = Mg.$$

Уравнение моментов сил относительно точки B выглядит так:

$$N_A l \sin \alpha - Mg x \cos \alpha = 0,$$

или

$$N_A = Mg \varepsilon \operatorname{ctg} \alpha$$

(здесь $\varepsilon = \frac{x}{l}$ — относительная высота подъема человека по лестнице).

Окончательно имеем

$$kMg = Mg \varepsilon \operatorname{ctg} \alpha,$$

откуда

$$k = \varepsilon \operatorname{ctg} \alpha.$$

Из полученного выражения видно, что лестница не будет падать, если $F_{\text{тр}}$ будет не меньше равнодействующей других сил, действующих на лестницу, т.е. $k \operatorname{ctg} \alpha > 1$.

Другими словами, соскальзывание лестницы будет полностью исключено при условии $k \operatorname{ctg} \alpha > 1$.

Задача 24.23. Лестница длиной 2,5 м и массой 16 кг прислонена к гладкой вертикальной стене, а другим концом упирается в землю. Лестница составляет угол 20° со стеной, проскальзывание по поверхности отсутствует. Вычислите силу, действующую со стороны поверхности земли на основание лестницы. Каким должен быть коэффициент трения между основанием лестницы и поверхностью земли, чтобы лестница не соскальзывала, когда на лестнице на уровне $3/4$ ее длины стоит человек массой 75 кг?

Задача 24.24. До какой высоты может подняться человек по лестнице (см. предыдущую задачу), прежде чем она начнет проскальзывать по поверхности земли, если коэффициент трения между лестницей и землей равен 0,4?

Задача 24.25. У гладкой стены стоит лестница. Коэффициент трения 0,5. Центр тяжести лестницы находится в ее середине. Определите угол, который лестница может образовывать с горизонтом, не падая. Предположим, что лестница поставлена в таком положении, что малейшее уменьшение

угла должно привести к ее падению. Упадет ли лестница, если человек встанет на ее нижнюю ступеньку? на ее верхнюю ступеньку?

В результате решения задачи получим, что положение, при котором малейшее уменьшение угла должно привести к падению лестницы, соответствует значению $k \operatorname{tg} \alpha = \varepsilon_0$. С учетом условия задачи это означает, что $\varepsilon_0 = 0,5$, или $x = 0,5l$, т.е. человек должен подняться на половину высоты лестницы. При $\varepsilon > 0,5$ (человек перешел за середину лестницы) условия равновесия нарушатся — лестница упадет.

Задача 24.26. Как подстраховать человека, взбирающегося по лестнице?

Р е ш е н и е

Поскольку в предыдущей задаче мы получили, что, чем меньше ε , тем устойчивее положение лестницы, страхующему достаточно встать на нижнюю ступеньку, чтобы гарантировать безопасность вдоль всей лестницы.

Глава 6 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

§ 25. Температура

Диапазон температур в известном человеку мире очень велик: от абсолютного нуля до 10^{10} К — температуры в недрах наиболее горячих звезд Вселенной (см. диаграмму «Температура» на рис. 6.1).

Температура и жизнь Диапазон температур, относящихся к области активной жизни, составляет очень узкую часть всего известного человеку набора температур. Верхний предел диапазона определяется сравнительно легко: с повышением температуры в результате испарения усиливается потеря воды, без которой не могут протекать основные биохимические процессы и обмен веществ в клетках. При температуре выше 40—50 °С нарушается деятельность ферментов, начинается разрушение белковых комплексов, возникают физико-химические явления, известные под названием денатурализация и коагуляция. Встречаются, однако, низшие организмы, которые приспособились к жизни в горячих источниках с температурой 70—90 °С. Нагревание до температуры кипения воды выдерживают лишь споры и другие покоящиеся формы, почти не содержащие воды.

Границы жизни при низких температурах менее определены, их изучение представляет большие трудности. Действительно, область активной жизни, связанная с процессами в водной среде, должна лежать выше 0 °С (точки замерзания воды). Однако опыты показывают, что, даже длительно пребывая при температурах около абсолютного нуля, живая система может сохранить жизнеспособность, т.е. не будет необратимо разрушена, а после повышения температуры начнет нормально функционировать. На Земле существует немало животных, которые при наступлении неблагоприятных условий, связанных с сезонными изменениями климата, впа-

Температура

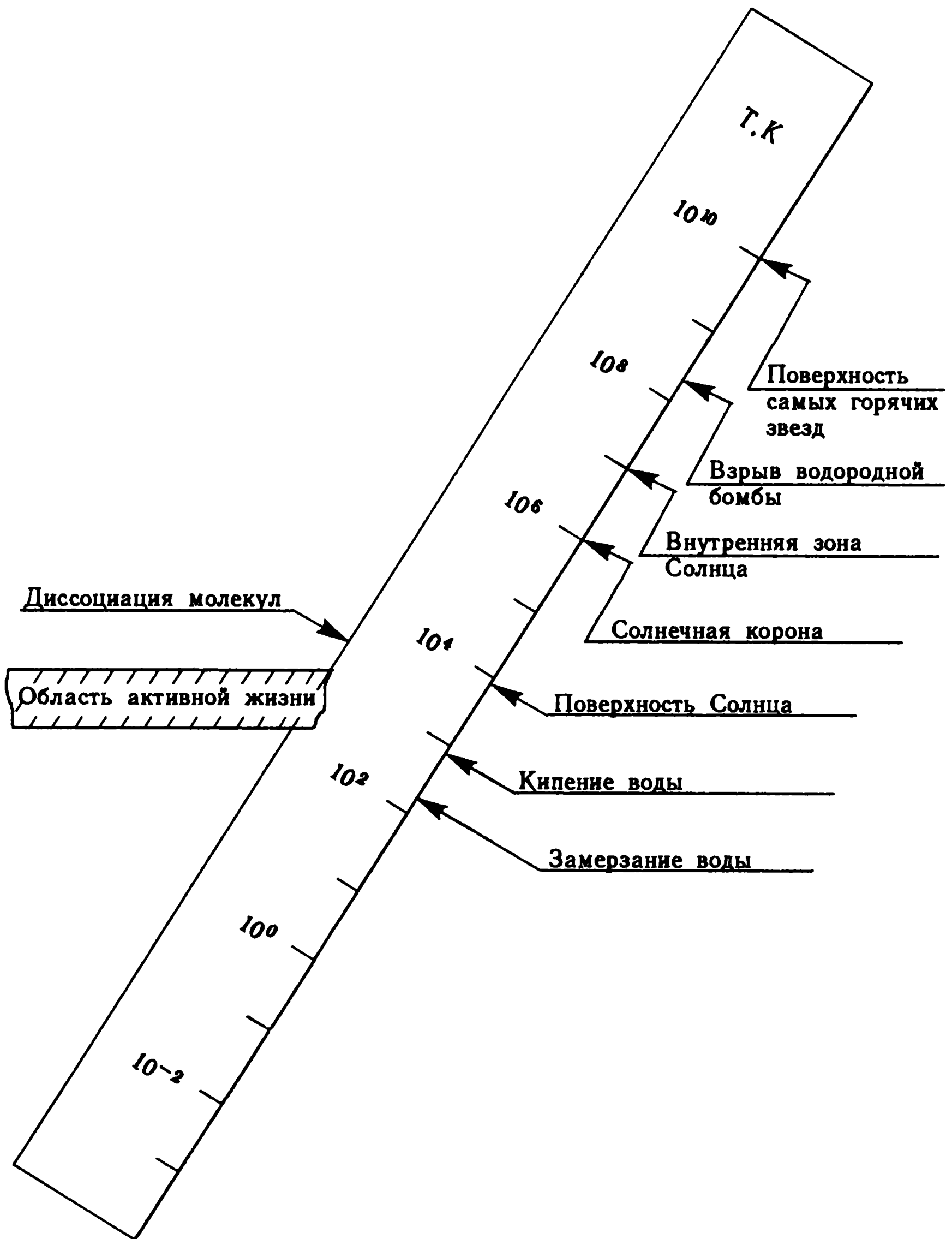


Рис. 6.1

дают в спячку. У них происходит перерыв в активной деятельности, обмен веществ снижается до минимума, клетки тела становятся устойчивыми к холоду и организм приобретает способность переносить очень низкие температуры, а иногда и замерзание.

Способность живых систем при неблагоприятных обстоятельствах переходить в состояние покоя и анабиоза чрезвычайно расширяет границы жизни и возможность к ее распространению во Вселенной. Например, некоторые ученые считают, что споры — зародыши жизни — способны переносить очень резкие перепады температур и вообще жесткие условия межзвездного пространства, характеризующиеся температурой на несколько кельвин выше абсолютного нуля, отсутствием воздуха и питательной среды. По их мнению, споры могут вместе с метеоритным веществом под действием светового давления (см. гл. 12) путешествовать в космосе и «прорасти», попадая на планеты с благоприятными для жизни условиями. Тем не менее температурные интервалы, при которых наблюдаются размножение, развитие, эволюция организмов, значительно уже. Только наиболее высокоорганизованные животные приобрели в процессе эволюции на Земле высокую температуру тела и совершенную терморегуляцию, вследствие чего стали независимыми от низких температур (см. гл. 7). Для всех остальных организмов температура немного ниже 0 °С является барьером активной жизни.

Таким образом, температурный диапазон — это наиболее важный параметр среды обитания живых существ. В нашем случае живое существо — человек, среда обитания — поверхность планеты Земля.

Температура на поверхности планеты, очевидно, зависит от близости светила, излучаемой им энергии, наклона орбиты планеты, ее эксцентриситета, наличия атмосферы и ее химического состава, наличия океанов и т.д. и т.п. По-видимому, необходимый набор параметров, приводящий к нужному температурному режиму на поверхности планеты, пригодной для жизни, довольно редкое в планетологии явление. И даже на Земле, которая обладала всеми необходимыми с астрономической точки зрения свойствами, он сложился далеко не сразу: наша планета достаточно долго (23 млрд. лет) «созревала», чтобы стать наконец «колыбелью жизни».

Температура и человек

Поверхность Земли характеризуется большим разнообразием климатических зон, разброс экстремальных температур которых составляет почти 150°C . (На Земле зарегистрирована самая низкая температура $-88,3^{\circ}\text{C}$ в Антарктиде на станции «Восток» в 1960 г. и самая высокая $+58^{\circ}\text{C}$ (в тени) в Триполи (Северная Африка) в 1933 г.) Если рассмотреть поверхность планеты с точки зрения отбора мест, в которых люди предпочитают жить, то окажется, что средние годовые температуры регионов, где, по существу, обитает все население мира, заключены между 0 и 30°C (рис. 6.2: 1 — процент площади Земли, имеющей данные значения средних годовых температур; 2 — процент населения, проживающего в областях с данной среднегодовой температурой). Конечно, столь узкий диапазон температур диктуется не только желанием людей жить с удобствами, но также и тем обстоятельством, что эти температуры лучше всего переносят растения и животные, необходимые человеку в качестве источников пищи и поставщиков кислорода через фотосинтез.

Задача 25.1. Почему комфортные условия жизни человека требуют температур порядка $0-30^{\circ}\text{C}$?

Такой температурный интервал обусловлен, по-видимому, тем, что при таких температурах человеку легче всего под-

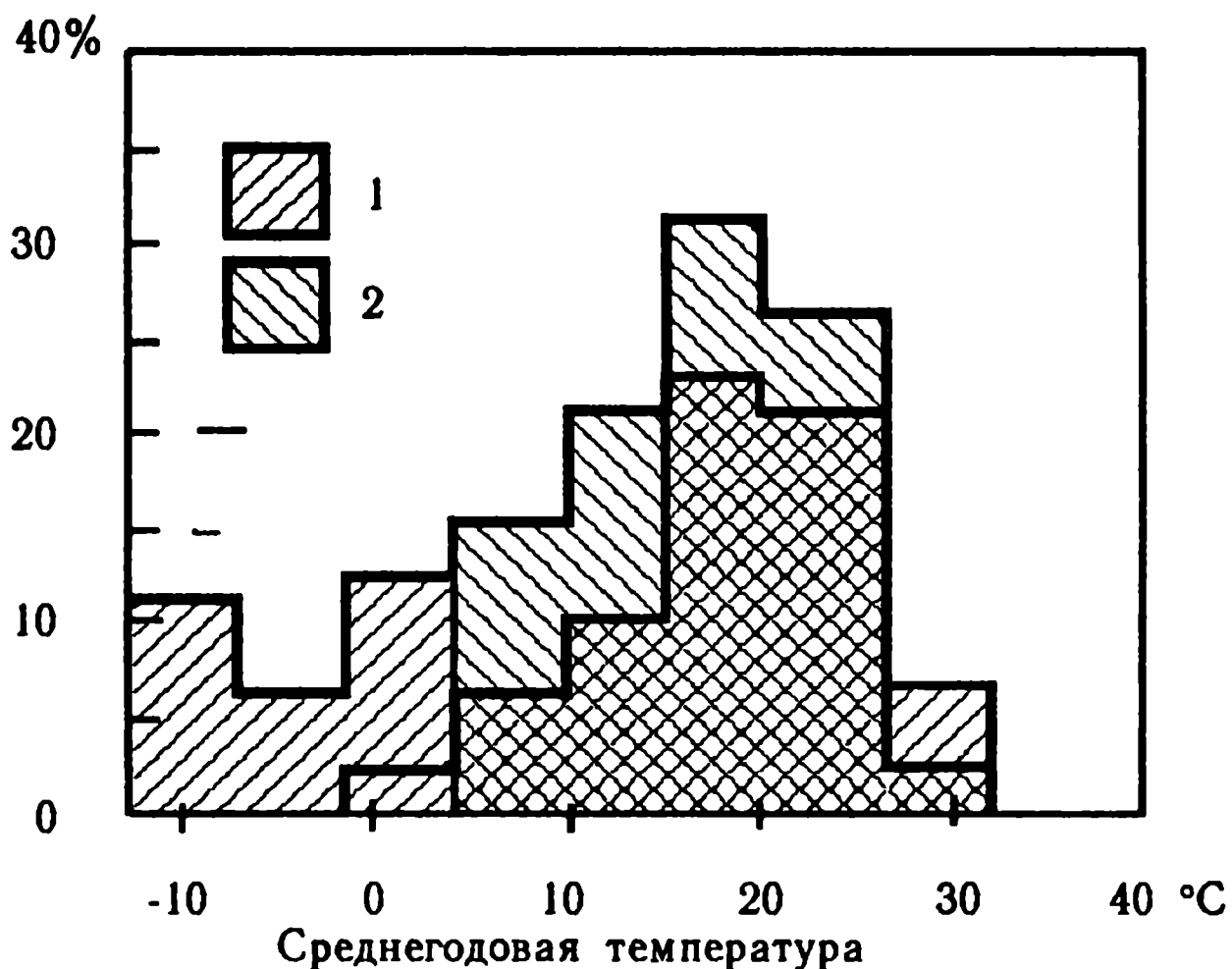


Рис. 6.2

держивать постоянную температуру своего тела. Тонкая регулировка температуры тела у всех высших животных необходима для поддержания на должном уровне скорости химических реакций и обеспечения благоприятных условий для функционирования различных органов.

Задача 25.2. Почему все млекопитающие имеют примерно одинаковую температуру тела?

Это определяется общностью химического состава и процессов, протекающих в их клетках.

Средняя температура тела человека равна примерно 37 °С. Это нормальная температура здорового человека. Даже небольшие отклонения от этой температуры свидетельствуют о серьезных, часто опасных для здоровья и жизни человека процессах в организме. В таблице 6.1 приведены критические для человеческого организма температуры.

Таблица 6.1

Критические для человеческого организма температуры

Температура, °С	Характеристика*
36,3—37	Нормальная температура для 90% людей
Выше 42	Критическая температура, сопровождающаяся потерей сознания
Выше 43—44	Смертельная температура
Ниже 34	Температура, приводящая к замедлению процессов в мозге
Ниже 30	Критическая температура, сопровождающаяся потерей сознания
Ниже 27—24	Смертельная температура, возникает фибрилляция сердца, прекращается кровообращение

* В таблице приведены средние значения температуры тела человека (в подмышечной впадине) при нормальном давлении воздуха и относительной влажности 30—70%, являющихся комфортными для большинства людей.

Различные участки тела человека имеют разную температуру. На рисунке 6.3 указаны средние значения температуры на поверхности различных участков тела здорового человека при нормальных условиях [62, 788].

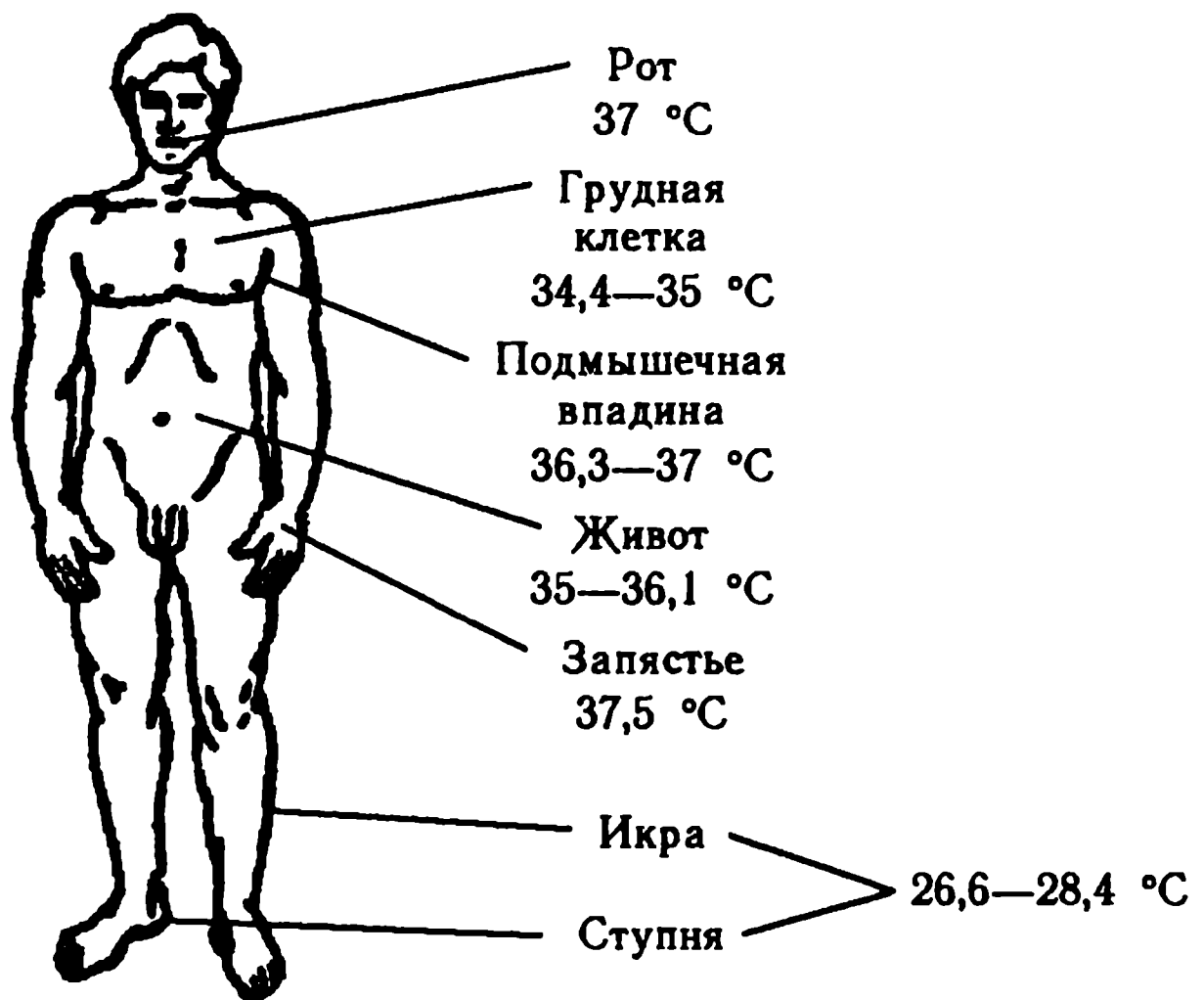


Рис. 6.3

Задача 25.3. Средняя температура тела человека равна примерно 37 °С. Чему равна эта температура по шкале Кельвина?

Задача 25.4. Типичные температуры внутри Земли и Солнца приблизительно составляют $4 \cdot 10^5$ °С и $1,5 \cdot 10^7$ °С, соответственно. Каковы эти температуры в кельвинах?

Задача 25.5. Определите значение kT при комнатной температуре.

Задача 25.6. Оцените температуру вакуума.

Изучение раздела «Молекулярная физика» открывает прекрасную возможность для работы над таблицей-справочником «Параметры окружающей человека среды». В нее должны войти полученные при решении задач и выполнении лабораторных работ данные о физических параметрах окружающего мира: ускорении свободного падения, массе Земли, температуре на ее поверхности, атмосферном давлении, составе атмосферы и т.д.

Эти данные могут быть использованы при решении и составлении задач.

Работа над таблицей будет способствовать осознанию школьниками факта обусловленности свойств организма человека физическими условиями окружающей среды. А это, в свою очередь, создаст условия для формирования у них научного представления о месте и роли человека в окру-

жающем мире, без чего нельзя, на наш взгляд, пытаться решить задачу воспитания гуманистического мировоззрения учащихся. Кроме того, работа над таблицей послужит отправной точкой экологического воспитания школьников средствами физики: ведь, чтобы выжить, человечеству необходимо поддерживать неизменными физические параметры окружающей его среды.

Возможная форма таблицы предложена ниже.

Таблица 6.2

Физические параметры окружающей человека среды

Характеристика среды	Значение параметра
Ускорение свободного падения	$g = 9,8 \text{ м/с}^2$
...	...

§ 26. Давление воздуха

Давление Давление как физическое понятие и как физическая величина рассматривается на предшествующей ступени изучения физики. В начале изучения молекулярной физики эти понятия можно актуализировать с помощью следующих задач.

Задача 26.1. Вычислите давление, которое оказывает на землю человек массой 60 кг, подошвы которого занимают площадь 500 мм².

Задача 26.2. Какое давление производит человек, стоящий на одной ноге?

Задача 26.3. Как зависит оказываемое животным давление на поверхность Земли от его размеров?

Р е ш е н и е

Это давление пропорционально размерам животного. Действительно,

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} \sim \frac{L^3}{L^2} \sim L.$$

Отсюда следует, что крупному животному труднее передвигаться по мягкому грунту, снегу, легче увязнуть в болоте и т.д. [40, 72].

Атмосфера

Наличие пригодной для дыхания атмосферы — одно из условий возникновения на планете жизни. Единственная из известных нам населенных живыми существами планет — Земля имеет атмосферу, характеризующуюся следующими параметрами [52, 244]:

Толщина	10—14 км	
Состав:		
азот	75,51% по массе	($3,865 \cdot 10^{15}$ т)
кислород	23,15% по массе	($4,67 \cdot 10^{11}$ т)
углекислый газ	0,046%	
водород	$0,3 \cdot 10^{-5}\%$	
метан	$9 \cdot 10^{-5}\%$	
озон	$6 \cdot 10^{-5}\%$	
Число молекул в 1 м^3 *	$2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$	
Давление	10^5 Па	
Плотность	$1,3 \text{ кг/м}^3$	
Скорость $\begin{cases} \text{O}_2 \\ \text{N}_2 \end{cases}$	$4,8 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ $5,1 \cdot 10^2 \text{ м/с}$	
Средняя длина свободного пробега	$8 \cdot 10^{-8} \text{ м}$	
Частота соударений молекул	$6 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$	
Характеристическое расстояние между молекулами	$3,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$	
Средняя масса молекул	$4,8 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$	

* Данные для уровня моря.

Задача 26.4. Оцените общий объем атмосферы Земли.

Самое интересное в вопросе о составе атмосферы Земли — то, что она имеет вторичный, так называемый биогенный характер, т.е. сильно отличается от той, которая была у Земли вскоре после ее образования. Традиционная теория атмосфер позволяет утверждать, что первичная атмосфера Земли представляла собой восстановительную смесь таких газов, как метан, аммиак, пары воды и молекулярный водород. (Восстановительная значит такая, в которой есть большое число свободных атомов и молекул водорода, готовых вступить в реакции с другими молекулами.) Более поздняя точка зрения на состав первичной атмосферы Земли несколько иная. Она исходит из предположения о том, что «внутренние» планеты должны иметь гораздо меньшее количество водорода в составе своих атмосфер, в результате чего земная атмосфера была слабовосстановительной по своим свойствам, состоящей из CO , CO_2 , N_2 , H_2O и уже небольшого количества H_2 . В пользу этого мнения говорят данные геологических исследований Земли: состав древнейших пород, возраст ко-

торых исчисляется цифрой 3,8 млрд. лет, свидетельствует, скорее, о ее слабовосстановительном характере [18, 191].

Следующий этап эволюции атмосферы Земли состоял в том, что свободный водород покинул ее вследствие диссипации (см. § 19). К серьезным изменениям атмосферы привело выделение газов из коры планеты, разогретой радиоактивными элементами, содержащимися в недрах планеты. Благодаря выделению летучих элементов, которое в значительно ослабленной форме сопровождает и теперь вулканическую деятельность, в атмосфере в большом количестве образовались водяной пар, углекислый газ, азот. Считается, что практически вся вода современных океанов выделилась из пород, слагающих ныне кору и верхнюю мантию Земли. Затем в атмосфере Земли вследствие диссоциации молекул водяного пара начал образовываться озон. Слой озона, способный сильно поглощать ультрафиолетовое излучение Солнца, как экраном, прикрыл поверхность Земли от этих опасных лучей.

С этим моментом связывают появление на поверхности планеты первых живых организмов, деятельность которых в течение последующих миллиардов лет привела к существенному обогащению атмосферы Земли кислородом. Ископаемые останки показывают, что некоторые горные породы, образовавшиеся и погребенные под поверхностью Земли более 2,5 млрд. лет назад, недоокислены. Это означает, что они формировались в условиях недостатка кислорода, чего нельзя сказать о более поздних породах, имеющих возраст менее 2,5 млрд. лет. По-видимому, этими первыми организмами были сине-зеленые водоросли, в то время как основные современные поставщики кислорода в атмосферу — деревья, цветы и травы — появились не более 600 млн. лет назад.

Как и раньше, в наше время основным поставщиком кислорода в атмосферу планеты является фотосинтез растений: в год биосфера производит до $4,67 \cdot 10^{11}$ т O_2 . Мощным регулятором поступления кислорода в атмосферу является океан: 5% от общего производства кислорода в год составляет результат жизнедеятельности планктона.

Существенны для дыхания человека и животных только кислород и небольшое количество водяного пара, однако не следует думать, что остальные газы, составляющие атмосферу Земли, — простые разбавители. Эволюционное развитие человека в атмосфере, содержащей почти 70% примесей, предполагает определенное влияние на развитие живых организмов и других газов. Например, азот и углекислый газ необходимы для жизни растений. Они включены в круговорот веществ, который происходит в живой природе. По-видимому, некоторую

роль играют и имеющиеся в атмосфере инертные газы. В частности, известно, что один вид легочных заболеваний человека (коллапс слизистых путей легочных альвеол) встречался бы гораздо чаще, чем это происходит теперь, если бы не содержащиеся в атмосфере инертные газы.

Необходимое для нормального метаболизма парциальное давление кислорода в атмосфере находится между двумя крайними значениями: нижним пределом около 60 мм рт. ст., ниже которого наступает гипоксия (кислородное голодание), и верхним пределом около 400 мм рт. ст., выше которого возникает кислородное отравление. К нижнему пределу приближается парциальное давление O_2 в горняцком поселке Ауканкильча в Чилийских Андах. Несмотря на столь малое содержание кислорода во вдыхаемом его жителями воздухе, они прекрасно себя чувствуют, ведут довольно деятельную жизнь, обрабатывая землю и работая в шахте. Верхний предел парциального давления O_2 достигается при терапевтическом использовании кислорода в лечебных учреждениях. При нормальных условиях на уровне моря, где барометрическое давление составляет 760 мм рт. ст., парциальное давление кислорода, необходимое для дыхания человека, составляет 149 мм рт. ст.

Для углекислого газа парциальное давление должно быть ограничено значениями 0,05 мм рт. ст. и 7 мм рт. ст. Больше количество CO_2 приводит к отравлению организма животных и человека, меньше — недостаточно для поддержания нормальной жизни растений. При нормальных условиях парциальное давление CO_2 равно 0,21 мм рт. ст.

Находящийся в воздухе азот в процессе грозовой деятельности атмосферы превращается в оксид азота $NO_2(IV)$, в результате чего ежегодно растениям поставляется до 100 млн. т азота. Каково минимально необходимое количество азота в атмосфере, неизвестно, но оно, вероятно, невелико. Большое количество азота вредно для человека: при парциальном давлении 2330 мм рт. ст. человек испытывает азотный наркоз.

Атмосфера и человек

Давление атмосферы — важный параметр окружающей человека среды. Определим его значение.

Задача 26.5. Какое давление оказывает столб атмосферы на земных обитателей?

Задача 26.6. Почему давление атмосферы составляет 10^5 Па? Что стало бы с человеком, если бы атмосфера оказывала большее давление? меньшее давление?

Для ответа на этот вопрос следует привлечь материал из § 19 об атмосферах планет.

Задача 26.7. С какой силой атмосфера давит на человека?

Р е ш е н и е

На тело человека, площадь поверхности которого при массе 60 кг и росте 1,6 м примерно равна $1,6 \text{ м}^2$, действует обусловленная атмосферным давлением сила

$$F = pS = 160\,000 \text{ Н.}$$

Человек привык к этой постоянно действующей силе и в нормальном, здоровом состоянии ее не ощущает. Выдерживать атмосферное давление организму помогает уравновешивающее его давление жидкостей, заполняющих сосуды тела. Перенесение организма на другой уровень вызывает расстройство его функций из-за деформации стенок сосудов, рассчитанных на определенное давление снаружи и изнутри. Другой причиной расстройства функций организма человека является уменьшение количества O_2 в воздухе.

Определенное значение атмосферного давления важно и для физиологии дыхания человека. Если бы барометрическое давление стало больше $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$, в воздухе, проходящем при дыхании через носоглотку человека, возникал бы сильный турбулентный поток и работа органов дыхания становилась бы утомительной. Давления, меньшие $8,4 \cdot 10^4 \text{ Па}$, опасны из-за возможности газового вздутия тела человека, обусловленного образованием в крови пузырьков газа [34, 37].

Задача 26.8. Оцените толщину стенок артерии, которая должна выдерживать давление крови (при гипертонии), составляющее 350 мм рт. ст.

Действующее на человека давление атмосферы зависит от высоты над уровнем моря, так как с ростом высоты давление атмосферы убывает по экспоненциальному закону:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right),$$

где p_0 — давление на уровне моря; m — масса молекулы воздуха; g — ускорение свободного падения; h — высота; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Задача 26.9. На какой высоте над уровнем моря атмосферное давление составляет всего $0,1p_0$ (p_0 — давление на уровне моря)?

Задача 26.10. Какую часть от давления, оказываемого на человека земной атмосферой на уровне моря, составляет давление на вершине Гималаев?

Задача 26.11. Известно, что плотность атмосферы убывает с высотой. Оцените толщину атмосферы, которой могла бы обладать Земля, если бы ее плотность была одинаковой по всей высоте и равнялась плотности на уровне моря.

Р е ш е н и е

Средняя кинетическая энергия молекулы газа пропорциональна его температуре: $\frac{mv_0^2}{2} = kT$.

Высота, на которую поднимется тело, брошенное со скоростью v_0 с поверхности Земли, равна $h = \frac{v_0^2}{2g}$.

Тогда при $T = 300$ К, $\mu = 0,029$ кг/моль для h будем иметь

$$h = \frac{kT}{mg} = \frac{RT}{\mu g}; h = 8 \text{ км.}$$

Мы получили толщину нижней части атмосферы — тропосферы, содержащей основную массу воздуха. До такой толщины сжалась бы атмосфера Земли, став однородной, подобно океану.

Полезную информацию с точки зрения условий выживания человека при изменении давления с высотой дает таблица 6.3.

Таблица 6.3

Зоны переносимости человеком высоты над уровнем моря

Высота, км	Зона и ее характеристика
Более 8 (Джомолунгма)	Смертельная зона: человек может находиться на этой высоте без дыхательного аппарата лишь короткое время — 3 мин. На высоте 16 км — 9 с, после чего наступает смерть
6—8	Критическая зона: серьезные функциональные расстройства жизнедеятельности организма
4—5 (Эльбрус, Ключевская сопка)	Зона неполной компенсации: ухудшение общего самочувствия
2—4	Зона полной компенсации: некоторые нарушения в деятельности сердечно-сосудистой системы, органов чувств и др., которые благодаря мобилизации резервных сил организма быстро исчезают
1,5—2 (Ай-Петри)	Безопасная, или индифферентная, зона, в которой не наблюдается каких-либо существенных изменений физиологических функций организма

Задача 26.12. Вычислите давление атмосферного воздуха на высотах, приведенных в таблице 6.3.

Задача 26.13. Как определить давление окружающего воздуха?

Одним из возможных ответов на этот вопрос является способ, предложенный в лабораторной работе «Определение атмосферного давления» (см. Приложение).

Лабораторная работа «Определение атмосферного давления» в сочетании с работами «Определение влажности воздуха», «Определение плотности атмосферного воздуха», «Определение вязкости воздуха», «Определение эффективного диаметра и средней длины свободного пробега молекул воздуха» может составить цикл лабораторных работ, объединенных темой «Изучаем атмосферу». Предварить их выполнение можно следующими задачами.

Задача 26.14. Сколько молекул воздуха содержится в классе при комнатной температуре?

Задача 26.15. Чему равна средняя квадратичная скорость молекул кислорода при комнатной температуре?

Задача 26.16. Оцените число молекул азота, ударяющихся о поверхность площадью 1 м^2 в 1 с .

Задача 26.17. Азот находится при комнатной температуре. Определите среднее время между двумя последовательными столкновениями его молекул.

Задача 26.18. Чему равна средняя длина свободного пробега молекулы кислорода при комнатной температуре?

Задача 26.19. Чему равны при комнатной температуре коэффициенты диффузии, теплопроводности и внутреннего трения азота?

Влажность Параметрами, характеризующими среду, комфортную для человека, являются: стандарт азотно-кислородного состава воздуха, температура $18\text{—}25 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность $60\text{—}90\%$, атмосферное давление $101\,330 \text{ Па}$, постоянный спектральный состав излучения видимой части спектра электромагнитных волн. Именно эту среду стараются воспроизвести кондиционированием.

Почему влажность воздуха входит в набор параметров, характеризующих комфортную для человека среду?

Всем известны неприятные последствия повышенной влажности при высоких температурах, когда одежда прилипает к телу, сердце работает с перегрузкой, так как тратится много энергии на испарение, и т.д. Таковы условия в джунглях: относительная влажность 100% при температуре воздуха $33 \text{ }^\circ\text{C}$. Еще хуже человек чувствует себя при условиях, сочетающих высокую температуру с низкой влажностью. Так,

в пустыне относительная влажность составляет всего 2% при 42 °С.

Воздух, необходимый для дыхания, должен быть влажным. Слишком сухой воздух неблагоприятен для деятельности легких: от сухости страдает функция ресничек мерцательного эпителия, которая состоит в вымывании из дыхательных путей оседающих твердых частиц, тем или иным путем попавших туда вместе с воздухом. При этом скорость движения слизи, сообщенная ей колебательным движением ресничек, оказывается зависящей от влажности вдыхаемого воздуха: низкая влажность может затруднить нормальный ход этого процесса. Длительное пребывание в условиях пониженной влажности приводит к обезвоживанию слизистых оболочек носа, рта и горла и может послужить причиной даже гибели организма.

Задача 26.20. Как определить влажность воздуха в домашних условиях, не имея под рукой гигрометра?

Одним из вариантов ответа на этот вопрос может служить лабораторная работа «Определение влажности воздуха» (см. Приложение).

Дыхание Дыхание — один из жизненно важных процессов в организме человека. Механизм дыхания человека обеспечивается в основном диффузией. Перенос кислорода из окружающей среды к клеткам, где он вступает в химические реакции окисления, включает ряд стадий: 1) вентиляцию легких (диффузию кислорода в альвеолы); 2) диффузию кислорода из альвеол в кровь легочных капилляров; 3) перенос его кровью к капиллярам тканей; 4) диффузию из капилляров в ткани.

Дыхание осуществляется и через кожу, но через нее абсорбируется лишь 2% кислорода.

Важной характеристикой процесса дыхания человека является объем его легких. Известно, что при спокойном дыхании во время каждого дыхательного движения человек вдыхает и выдыхает некоторое количество воздуха, составляющее 300—500 мл и называемое дыхательным объемом $V_{\text{дых}}$. При усиленном вдохе в легкие помимо дыхательного объема можно ввести еще некоторое количество воздуха — так называемый резервный объем вдоха $V_{\text{р.вд}}$. Он составляет 1500—2000 мл. Аналогично, объем воздуха, который человек может выдохнуть после спокойного выдоха — резервный объем выдоха $V_{\text{р.выд}}$ — составляет 1000—1500 мл. Сумма

ОЕЛ	ЖЕЛ	$V_{р.вд}$
		$V_{дых}$
		$V_{р.выд}$
	$V_{о,о}$	$V_{о,о}$

а)



б)

Рис. 6.4

перечисленных объемов: дыхательного, резервного вдоха и резервного выдоха, — называется жизненной емкостью легких:

$$\text{ЖЕЛ} = V_{дых} + V_{р.вд} + V_{р.выд}.$$

Интересно, что даже после максимального выдоха в легких человека и животных остается некоторый объем воздуха, который всегда их заполняет — остаточный объем $V_{о,о}$. Тогда

$$\text{ЖЕЛ} + V_{о,о} = \text{ОЕЛ},$$

где ОЕЛ — общая емкость легких.

Соотношение между всеми характеризующими процесс дыхания человека объемами показано на рисунке 6.4, а. На рисунке 6.4, б изображен процесс изменения объема легких человека при дыхании.

Жизненная емкость легких в среднем у взрослого человека составляет 3000—4500 мл. Она возрастает у спортсменов, особенно у гребцов и пловцов, и может достигать 8 л. С возрастом жизненная емкость легких уменьшается вследствие снижения эластичности легких и подвижности грудной клетки.

Физику процесса дыхания человека можно проиллюстрировать следующими задачами.

Задача 26.21. Сколько молекул вы вдохнули, если при одном вдохе получили 1,0 л воздуха?

Задача 26.22. Парциальное давление углекислого газа в легких приблизительно равно 35 мм рт. ст., что несколько выше давления окружающего воздуха. Каково процентное содержание углекислого газа в легких?

Задача 26.23. Оцените разрежение, создаваемое человеком при выдохе.

Задача 26.24. Предположим, что человек может понизить давление в легких на 80 мм рт. ст. ниже атмосферного. На какую высоту ему удастся втянуть воду по соломинке?

Задача 26.25. Во фляжке вместимостью 0,5 л находится вода. Турист пьет из нее воду, плотно прижав губы к горлышку так, чтобы во фляжку не попадал наружный воздух. Сколько воды удастся выпить туристу, если он может понизить давление оставшегося во фляжке воздуха до 80 кПа?

Задача 26.26. Оцените скорость, с какой можно выдувать воздух ртом через трубочку.

Легочной вентиляцией называется количество воздуха, проходящего за 1 мин через легкие человека. Она определяет интенсивность обмена газов в альвеолах, поступление кислорода к мышцам и органам тела, а также удаление из них углекислого газа. Легочная вентиляция зависит от пола, возраста, физического развития и нагрузки. В покое у женщин она составляет 3—5 л/мин, а у мужчин — 6—8 л/мин. Легочная вентиляция значительно увеличивается при физической работе. Так, при средней физической нагрузке она может увеличиваться до 40—60 л/мин, а при максимальной нагрузке — до 120—140 л/мин.

Легочная вентиляция (ЛВ) характеризуется глубиной и частотой дыхания, следовательно, ее можно определить как произведение дыхательного объема $V_{\text{дых}}$ на число дыхательных движений в 1 мин N : $ЛВ = NV_{\text{дых}}$.

Задача 26.27. Оцените энергетическую эффективность процесса дыхания. Примите частоту дыхательных движений равной 11, коэффициент усвоения кислорода — 22%. Энергетический выход реакции 21 кДж на каждый литр потребленного кислорода.

Р е ш е н и е

В состоянии покоя за один вдох в легкие человека поступает примерно 500 мл O_2 . Воздух содержит примерно 20% кислорода. Тогда на каждый вдох приходится 0,1 л O_2 . Скорость выделения энергии

$$\frac{W}{t} = \frac{0,1 \cdot 0,22 \cdot 11 \cdot 21 \cdot 10^3}{60} \text{ Вт} = 80 \text{ Вт.}$$

Получили величину, близкую к приведенной в таблице 7.1.

Дыхательный объем легких человека, в свою очередь, можно определить несколькими способами. Во-первых, по площади поверхности тела, поскольку эти два параметра связаны соотношением $V-S$; во-вторых, методом спирометрии, когда измеряется непосредственно объем воздуха, который человек выдыхает в специальный сосуд, заполненный водой.

Оба эти способа применяются при выполнении лабораторной работы «Определение дыхательного объема легких человека» (см. Приложение).

Задача 29.28. Покажите, что объем легких прямо пропорционален площади поверхности тела человека.

§ 27. Вода. Давление в жидкости

Вода и жизнь Еще несколько лет назад вопрос о возможных формах существования жизни во Вселенной проходил по ведомству научной фантастики. При этом у авторов сложились две, можно сказать, взаимоисключающие тенденции. Одни, опираясь на исходное положение о тождественности путей развития материи во Вселенной, населяли далекие миры обитателями, ничем не отличающимися от жителей Земли. Отступления допускались лишь в степени, близкой к вариациям летней и осенней моды этого сезона. Зато другая группа фантастов населяла страницы своих произведений такими созданиями, что читатели, обладающие достаточно развитым воображением, старались не читать эти сочинения на ночь.

Каковы же взгляды науки на проблему форм, которые может принимать жизнь, и разумная жизнь в частности?

Ознакомимся прежде всего с особенностями нашей, земной, формы жизни. Жизнь на нашей планете определяется химическими свойствами углерода — «жизненного элемента» (см. гл. 13) и воды. Рассмотрим подробнее роль воды для жизни на Земле.

Известно, что каждый земной живой организм с достаточно высокой степенью справедливости и строгости может рассматриваться как водный раствор. Вода составляет значительную часть каждого организма: 40% в сухих растениях, 70% в теле человека и животных. В морских животных — медузах — ее содержание равно 95%. У десятидневного человеческого эмбриона содержание воды достигает 95%, у новорожденного — приблизительно 72%, а у взрослого человека — в среднем 60%. Практически все химические процессы, обеспечивающие жизнедеятельность живых организмов, — это процессы в водных растворах. Вода обеспечивает жидкую среду с молекулами питательных веществ в ней, она сохраняет химическое равновесие в живых клетках, помогает регулировать температуру в них. В настоящее время ученые с большой степенью достоверности утверждают, что жизнь на Земле возникла в водной среде.

Естественна постановка следующего вопроса: следует ли считать наличие воды необходимым и достаточным условием возникновения, развития и существования живого вещества? Ведь химические процессы могут протекать и не в растворах. Вода в конце концов лишь одна из внушительного числа жидкостей, которые могут заполнять моря и океаны далеких планет.

Сейчас уже не подлежит сомнению несколько наиболее общих положений, предъявляемых к химии живых существ и установленных совместными исследованиями физиков, химиков и биологов. Перечислим их.

1. О каких бы формах жизни ни шла речь, живое вещество должно быть совокупностью сложных молекул: ведь только сложная молекула способна сохранять информацию — память о взаимодействии с внешней средой. И только сложная молекула способна при этом самопроизвольно переходить в состояние с меньшей энтропией. Но сложные молекулы могут образовываться только из простых в результате ряда последовательных реакций.

2. Сколько-нибудь сложные реакции, приводящие к образованию сложных соединений, могут протекать только в растворах, или жидкой фазе. Реакции между твердыми фазами, во-первых, весьма немногочисленны по сравнению с жидкофазными и, во-вторых, протекают в сотни, тысячи раз медленнее, чем жидкофазные.

3. Сколько-нибудь сложные соединения принципиально не могут существовать в газообразном состоянии. Причина этого состоит в том, что, чем сложнее молекула органического соединения, тем меньшая энергия приходится в среднем на одну химическую связь. С другой стороны, чем сложнее молекула, тем большую энергию ей надо сообщить, чтобы перевести в газовую форму. И для этих соединений очень низок температурный предел, за которым попытка перевода сложного органического соединения в пар приводит к разрушению его молекул.

4. Для того чтобы реакция могла протекать в жидкой фазе, нужен подходящий растворитель [74, 69]. Чтобы стать «жизненным», этот растворитель должен обладать следующими свойствами: амфотерностью (т.е. число кислот в нем должно быть соизмеримо с числом оснований); растворять как органические, так и неорганические соединения; иметь большую диэлектрическую проницаемость и низкую электрохимическую устойчивость (для обеспечения электрохимического механизма передачи раздражений в живых организмах).

По мнению химиков, подобным набором характеристик обладает лишь вода.

По мнению физиков, кроме рекордных химических свойств, вода обладает уникальными физическими свойствами. Вода

кипит и замерзает при температуре, намного более высокой, чем та, какую можно было ожидать исходя из закономерностей изменения свойств в ряду соединений элементов IV группы таблицы Менделеева с водородом. Вода характеризуется высокой теплоемкостью, теплотами испарения и замерзания, поверхностным натяжением, уже упомянутой диэлектрической проницаемостью и т.д.

Ученые отмечают, что, кроме воды, на роль растворителя в других мирах могли бы претендовать аммиак (NH_3), который по многим свойствам сходен с водой, плавиковая кислота (HF) и синильная кислота (HCN). Однако два последних соединения — маловероятные кандидаты на эту роль, поскольку фтор относится к редким во Вселенной элементам. Соединение HCN термодинамически неустойчивое, хотя его в космическом пространстве много и оно сыграло определенную роль в синтезе первых органических молекул на Земле. Аммиак при некоторых весьма специальных условиях мог бы сыграть роль воды. Сравнительные свойства воды и других жидкостей, претендующих на роль «растворителей для жизни», приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4

Химические и физические свойства некоторых жидкостей

Свойства	Вода	Спирт	Аммиак
Диэлектрическая проницаемость	81	26	
Поверхностное натяжение, мН/м	72,8	22	
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	4,19	2,47	5,15
Коэффициент линейного расширения температурный, 10^{-6} K^{-1}	51 (лед в интервале температур от -20 до 0°C)		
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	0	-114	-78
Удельная теплота плавления, кДж/кг	330	105	
Температура кипения, $^\circ\text{C}$	100	78	-33
Удельная теплота парообразования, кДж/кг	2450	850	1322
Диапазон температур жидкой фазы, $^\circ\text{C}$	100	182	45

Можно попытаться прокомментировать свойства воды с точки зрения ее пригодности для обеспечения жизнеспособ-

ности живых существ. Действительно, предел температур, при которых вода находится в жидкой фазе, достаточно широк, чтобы изменения температуры на планете не приводили к ее испарению или затвердеванию. Он наилучшим образом подходит к условиям на поверхности нашей планеты, обусловленным, в свою очередь, ее положением в Солнечной системе. Слишком близкое расположение планеты к светилу означало бы существование слишком высоких температур на ее поверхности, исключающих присутствие воды в жидкой фазе. И наоборот, на более удаленных от Солнца планетах возможно существование воды лишь в виде льда. Далее, вода растворяет множество веществ: в 2,5 раза сильнее, чем спирт и аммиак, вместе взятые. По кислотности вода сравнима со слабым раствором серной кислоты, а большое содержание растворенной в природной воде извести делает ее практически щелочью. Высокая теплоемкость воды помогает ей регулировать температуру организмов, уменьшая влияние на них внезапных изменений температуры окружающей среды. Это свойство воды проявляется и в регулировании климата на планете: области вблизи океана имеют значительно более мягкий климат, чем области, расположенные на той же широте, но далеко от водных бассейнов. Высокая теплота парообразования воды означает, что испарение небольшого количества воды достаточно для отвода тепла, выделяющегося внутри клетки в процессах жизнедеятельности. Поверхностное натяжение воды в два раза выше, чем у аммиака, и в три раза выше, чем у спирта,— оно превосходит поверхностное натяжение всех известных жидкостей. Это свойство, несомненно, играло важную роль в образовании агрегатов разнообразных органических соединений перед появлением клеток, поскольку благодаря поверхностному натяжению некоторые соединения притягивались друг к другу, притом что сохранялись границы между водными растворами различных органических молекул. Вода, наконец, обладает совершенно специфическим свойством, которого нет ни у одной другой жидкости. Вода расширяется при замерзании, поэтому лед плавает на поверхности жидкой воды. Если бы лед тонул, водоемы зимой промерзали бы до дна и большинство живущих в них организмов погибали бы. Именно такой тип замерзания имел бы место в прудах из аммиака и метилового спирта. И еще одно преимущество воды: вода сама защищает себя от ультрафиолетового излучения. Часть молекул воды под действием этого излучения диссоциирует, выделяя кислород и водород в атмосферу, где часть атомов кислорода объединяется в молекулы озона, которые и поглощают способное

разрушать живые клетки коротковолновое излучение. Под действием этих же лучей сами океаны медленно, молекула за молекулой диссоциировали бы и исчезли наконец. Именно такое будущее ожидало бы океаны из аммиака, так как ультрафиолетовое излучение очень распространено во Вселенной, а диссоциация аммиака под его воздействием не приводит к созданию защитного слоя [18, 240].

С точки зрения методики использования этого материала при изучении физики можно отметить следующее. Тема представляет прекрасное поле деятельности для реализации межпредметных связей с курсом химии, при этом в рассказ о химических свойствах воды можно включить материал о физических свойствах воды и ее роли для жизни на Земле. Можно придумать и провести на предложенном материале урок «Изучаем воду». Можно предложить учащимся разработать одноименный проект. Целесообразно связать изучение этой темы с выполнением цикла лабораторных работ «Свойства воды», целью которого могут стать получение данных об основных физических характеристиках воды: теплоемкости, поверхностном натяжении, теплотах плавления и парообразования, диэлектрической проницаемости и т.п. Объединенные общей идеей изучения важного для жизни человека вещества эти лабораторные работы будут выполнены детьми более заинтересованно и осмысленно. Обсуждение их результатов позволит перейти к рассмотрению крайне важных проблем экологии природы и экологии человека.

А теперь коротко обсудим возможности существования других, неземных форм жизни. Мнения ученых по этому поводу чрезвычайно расходятся. Появляются предположения о существовании неких «плазменных образований», жизни, обусловленной «лептонным взаимодействием». Будем исходить из возможностей, не противоречащих данным современной физической науки, и при этом сошлемся на мнение известных популяризаторов науки Д.Голдсмита и Т.Оуэна — авторов замечательной книги «Поиски жизни во Вселенной»: «Мы можем вообразить по крайней мере два других типа жизни, кроме химической: жизнь, основанную на элементарных частицах, точнее, на сверхтяжелых ядрах, между которыми осуществляются сильные взаимодействия (такая жизнь может продолжаться значительно меньше одной триллионной доли секунды). И гравитационную жизнь, основанную на взаимодействии гигантских объектов, настолько удаленных друг от друга, что гравитационные силы пре-

восходят электромагнитные, сильные и слабые взаимодействия.

Гравитационная жизнь едва ли возникнет за 15 или 20 млрд. лет после начала расширения Вселенной, поскольку такой промежуток времени не позволяет гравитационным силам создать более сложные структуры, чем галактики, скопления галактик и звезды.

Жизнь на нейтронных звездах могла бы существовать, так как высокие температуры и плотности на поверхностях позволяют всем типам ядер распадаться и образовываться за ничтожные доли секунды. Однако мы столкнулись бы с большими трудностями при попытке установить контакт с любой из этих форм жизни, поскольку характерное время для них составляет около 10^{-21} с, а наиболее предпочтительные для связи длины волн соответствуют жестким гамма-лучам.

Даже если ограничиться химической жизнью, не следует искать лишь на поверхностях планет. Межзвездные облака пыли и газа могли бы приобрести чрезвычайно сложную структуру и разум даже без участия процесса воспроизведения. Такие «черные облака» могли бы использовать внутренние электрические токи аналогично тому, как они используются в наших телах для передачи сообщений от центрального мозга и к нему. Но здесь вновь характерное время, необходимое для достижения соответствующей сложности, может оказаться слишком большим из-за относительно больших расстояний между отдельными молекулами» [18, 254].

Кроме того что вода играет важную роль в процессах, обуславливающих жизнедеятельность земных организмов, от нее в немалой степени зависит и экология человека.

Биологические потребности человека в воде 10 т на 1 г живой ткани в год. Для того чтобы растения смогли дать урожай в 20 т сырой массы или 5 т сухой массы, их корни должны выкачать из почвы, а листья испарить около 2 тыс. т воды.

Объем воды, содержащейся в биомассе, в 5 раз превосходит объем воды во всех реках Земли, а общее количество воды нашей планеты каждые 2 млн. лет проходит через живые организмы биосферы.

Задача 27.1. Сколько водных циклов осуществилось в биосфере за время ее существования?

Огромное количество воды требует промышленность. Так, для производства 1 т сахара необходимо 9 т воды, 1 т азотных удобрений — 600 т, 1 т бумаги — 1000 т [52, 249].

Считают, что вся вода на Земле была выделена в ходе вулканических извержений на протяжении геологических эпох. При этом воды выделилось так много, что она смогла сохраниться как в жидком, так и в твердом состоянии.

Сейчас около $3/4$ (71%) поверхности Земли покрыто морями и океанами. В них сосредоточено 97% мировых запасов воды. В абсолютных цифрах это составляет 1368 км^3 . Остальные 3% приходятся на долю пресной воды, $3/4$ которой сосредоточено в полярных шапках. Чтобы оценить, как велики запасы воды на Земле, решим следующую задачу.

Задача 27.2. Предположим, что удалось «скрыть» все горы и вообще всю сушу, поднимающуюся над поверхностью моря. Объем скрытой горной породы оказался бы равным 76 млн. км^3 . Как он соотносился бы с объемом воды Мирового океана?

Наличие на Земле больших открытых водоемов имеет определяющее значение для существования жизни. Они обуславливают выпадение осадков, образование грунтовых вод, необходимых для пополнения запасов пресной воды, увлажняют воздушную атмосферу, необходимую для дыхания людей и животных, способствуют смягчению климата за счет аккумуляции энергии Солнца.

На планете, лишенной воды в жидкой фазе, была бы невозможна человеческая форма жизни.

Однако, несмотря на то что воды на Земле очень много и что все живое обязано ей своим происхождением, для человека вода — враждебная среда, так как механизм его дыхания связан с воздушной атмосферой.

Ниже мы обсудим вопрос о том, является ли это обстоятельство преимуществом или недостатком. А сейчас рассмотрим немного задач, дающих повод обсудить с учащимися проблему безопасности на воде.

Задача 27.3. Почему человек плавает?

Задача 27.4. Какая выталкивающая сила действует на плывущего человека? От чего зависит ее значение?

Задача 27.5. Определите массу пробкового жилета, способного удержать человека массой 60 кг в воде так, чтобы голова и плечи (составляющие $1/8$ объема его тела) не были погружены в воду. Плотность человека примите равной 1007 кг/м^3 .

Задача 27.6. Имеется несколько бревен, каждое объемом $0,8 \text{ м}^3$. Сколько бревен необходимо соединить в плот, чтобы он выдержал 10 человек? Плотность дерева примите равной 500 кг/м^3 .

Целесообразно также решить ряд задач, посвященных «плаванию» в воздухе с помощью воздушных шаров и аэростатов.

Задача 27.7. Человек выполняет упражнение вис на перекладине. Чему равна выталкивающая сила, действующая на него со стороны воздуха?

Задача 27.8. В романе об известном агенте 007 Джеймсе Бонде американский писатель Я.Флеминг описал ситуацию, в которой его герой, чтобы спастись, использовал аэростат с гелием. Каким должен быть минимальный размер аэростата?

Давление воды Гидростатическое давление — давление в глубине жидкости—воды более сильно, чем в воздухе, что определяется большей плотностью воды по сравнению с воздухом. Вычислено, что давление в глубине воды возрастает на $101,315 \text{ кПа}$ через каждые 10 м . Для человека проблема давления воды стала актуальной в связи с освоением им глубин Мирового океана.

Задача 27.9. Во сколько раз давление в воде на глубине 10 м под уровнем воды больше, чем давление в воздухе на высоте 10 м над уровнем воды?

Задача 27.10. На какую глубину нужно нырнуть, чтобы попасть в область, где давление будет вдвое больше, чем у поверхности?

Освоение океанов Земли — перспективное направление развития нашей цивилизации. Огромные богатства, неосвоенные ресурсы и пространства океана издавна привлекают внимание человека. Однако человек не приспособлен к жизни в воде и главной проблемой для него является дыхание в воде.

Водная среда неблагоприятна для существования организмов с высокой интенсивностью окислительных процессов. Какой бы степени совершенства ни достиг орган водного дыхания, он не сможет обеспечить развитие высших форм жизни, которым свойственна постоянная температура тела за счет интенсивного обмена веществ. (Вспомните морских млекопитающих.)

Почему? Вот простое объяснение. В воде на каждый 1 м^3 приходится 10 см^3 кислорода, а в воздухе — 210 см^3 . Человек при усиленной мышечной работе потребляет до $6 \text{ л } \text{O}_2$ в 1 мин . Для этого через его легкие должно пройти около 120 л воздуха. Чтобы получить такое же количество

кислорода из воды, требуется пропустить через дыхательную систему до 2000 л воды. Энергетические затраты на эту работу не окупили бы результат.

А как ощущает человек давление воды? Само по себе давление воды не причиняет человеку никакого вреда (по крайней мере, на тех глубинах, которые ему доступны без снаряжения), так как полностью уравнивается гидростатическим давлением жидкости в тканях организма человека. Больше всего испытывают давление полости, заполненные воздухом: легкие, внутреннее ухо и т.д. Уже на глубинах, больших 1,5 м, разность между давлением воды, сжимающей грудную клетку, и давлением воздуха внутри ее так возрастает, что мы уже не можем увеличивать объем грудной клетки при вдохе.

Задача 27.11. Оцените глубину, на которой давление воды на грудную клетку ныряльщика уравнивается давлением воздуха в ней.

Задача 27.12. Существует ли предельная глубина, до которой ныряльщик может дышать через трубку воздухом с поверхности?

Задача 27.13. Аквалангист, находясь на глубине 12 м от поверхности, вдохнул воздух и заполнил весь объем легких, равный 5,5 л. До какого объема расширятся его легкие, если он быстро всплывет на поверхность? Благоразумно ли поступать таким образом?

Даже при нырянии на глубину 1 м чувствуется боль в барабанных перепонках из-за перепада давлений по разные стороны от мембраны. Особенно опасны резкие изменения окружающего давления, происходящие при быстром подъеме из воды или спуске под воду. При этом могут произойти механические травмы ушей и легких. Баротравма легких (так называется одно из этих повреждений) — грозное заболевание водолазов. Водолазы и ныряльщики учатся приспосабливаться к изменению наружного давления. Они выравнивают давление во внутреннем ухе по отношению к внешнему давлению, пропуская воздух через евстахиеву трубу, идущую от гортани к внутреннему уху.

Задача 27.14. Объясните, что происходит при так называемом продувании, которое рекомендуется делать спортсмену-подводнику, прежде чем надеть маску для ныряния.

Р е ш е н и е

Эта процедура осуществляется следующим образом. Зажмите нос двумя пальцами и сглотните слюну. При этом вы почувствуете, что у вас заложило уши. Это значит, что воздух через раскрытую евстахиеву трубу попал в ухо.

Через 1—2 мин ощущение заложенности пройдет: давление по обе стороны барабанной перепонки выравнялось.

Задача 27.15. Когда вы едете на машине в гору или спускаетесь с горы, то иногда ощущаете щелчки в ушах. Это происходит в тот момент, когда давление под барабанной перепонкой уравнивается наружным давлением. Если бы этого не происходило, то какая сила действовала бы на барабанную перепонку площадью $0,5 \text{ см}^2$ при подъеме (спуске) на 1000 м?

На глубинах, больших чем 1,5 м, необходимо дышать только воздухом, сжатым до давления, равного давлению воды на этой глубине. Для этих целей аквалангисты берут с собой баллоны со сжатым воздухом. Погружение на разные глубины требует разного давления воздуха. Так, на глубине 10 м давление должно быть равно 100 кПа, а на глубине 40 м — 500 кПа. Поэтому аквалангисты все время должны следить за глубиной погружения и регулировать давление вдыхаемого воздуха.

Однако в сжатом воздухе увеличивается концентрация газов, его составляющих. Так, при давлении, соответствующем глубине 40 м, давление кислорода в сжатом воздухе составляет 5 атм, т.е. в 5 раз превышает его концентрацию в атмосфере и может вызвать кислородное отравление. На глубинах свыше 40—50 м обычный сжатый воздух непригоден для дыхания: он превращается в опасный наркотик, вызывающий глубинное опьянение, похожее на алкогольное. Человек при этом теряет над собой контроль и может погибнуть. Как полагают, «заслуга» в этом принадлежит азоту.

Для дыхания под водой сейчас применяются специальные смеси газов, так называемые газовые коктейли. В них иное, чем в атмосферном воздухе, относительное и абсолютное содержание газов. Например, содержание азота в них понижено, так как он, кроме вероятности отравления, имеет большую плотность и при больших давлениях затрудняет процесс дыхания. Чаще всего его заменяют гелием, который не имеет этих недостатков.

Но самое страшное подстерегает ныряльщика или водолаза при возвращении с глубины. Повышение давления вдыхаемой воздушной смеси увеличивает количество газов, растворенных в жидкостях организма. При слишком быстром подъеме человека с глубины газ, которым были насыщены кровь и мягкие ткани тела, начинает из них выделяться. Пузырьки газа попадают в кровь, вызывая закупорку кровеносных сосудов. Так проявляет себя бич водолазов — кессонная болезнь.

Но кессонную болезнь можно предотвратить, если не торопиться с подъемом. При этом давление снижается постепенно и пузырьки не образуются. Процесс постепенного снижения давления, предпринимаемый с целью предотвращения кессонной болезни, называется декомпрессией.

Задача 27.16. Болеют ли кессонной болезнью морские млекопитающие?

Р е ш е н и е

Не болеют, так как ныряют с пустыми легкими и перестают дышать под водой. Их ткани, таким образом, не накапливают газы, пока животные погружены в воду.

Представление о том, как можно осуществить процесс декомпрессии, можно получить, рассмотрев следующую задачу.

Задача 27.17. Морская декомпрессионная камера для ныряльщика представляет собой перевернутый цилиндр, открытый снизу. Когда она полностью погружена вблизи поверхности воды, объем заключенного в камере воздуха равен $8,2 \text{ м}^3$, а температура равна 25°C . Какова должна быть минимальная масса цилиндра, чтобы он всплывал? Предположите, что реальная масса цилиндра равна его минимальной массе. Цилиндр опустили на глубину 50 м, где температура равна 12°C . Каким будет напряжение удерживающего цилиндр кабеля? (Воздух в цилиндр не добавлялся и не выходил из него.) Считайте, что воздух (в действительности специальная газовая смесь для ныряльщиков) ведет себя как идеальный газ, что его массой можно пренебречь, а морская вода имеет постоянную плотность $1,025 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Таким образом, пребывание на глубине под водой — это пребывание в чуждой, грозящей гибелью среде. Достойны уважения люди, пытающиеся сделать ее более доступной для человека. Освоение глубин моря идет достаточно успешно. О достигнутых людьми глубинах можно судить по диаграмме (рис. 6.5).

Задача 27.18. Рекордной глубиной погружения человека под воду без акваланга является 105 м. Какое давление испытывает человек на такой глубине?

Задача 27.19. Манометр, установленный на батискафе, показывает, что давление жидкости составляет 98 МПа. На какой глубине находится батискаф?

Глубина погружения без акваланга, равная 105 м, — уникальное достижение мирового рекордсмена француза Ж.Майоля. Это достижение тем более заслуживает восхищения, что глубоководное ныряние связано с таким риском для жизни, что сейчас существует запрещение на регистрацию рекордов в этом виде человеческой деятельности. Всемирная конфе-

Глубины погружения человека

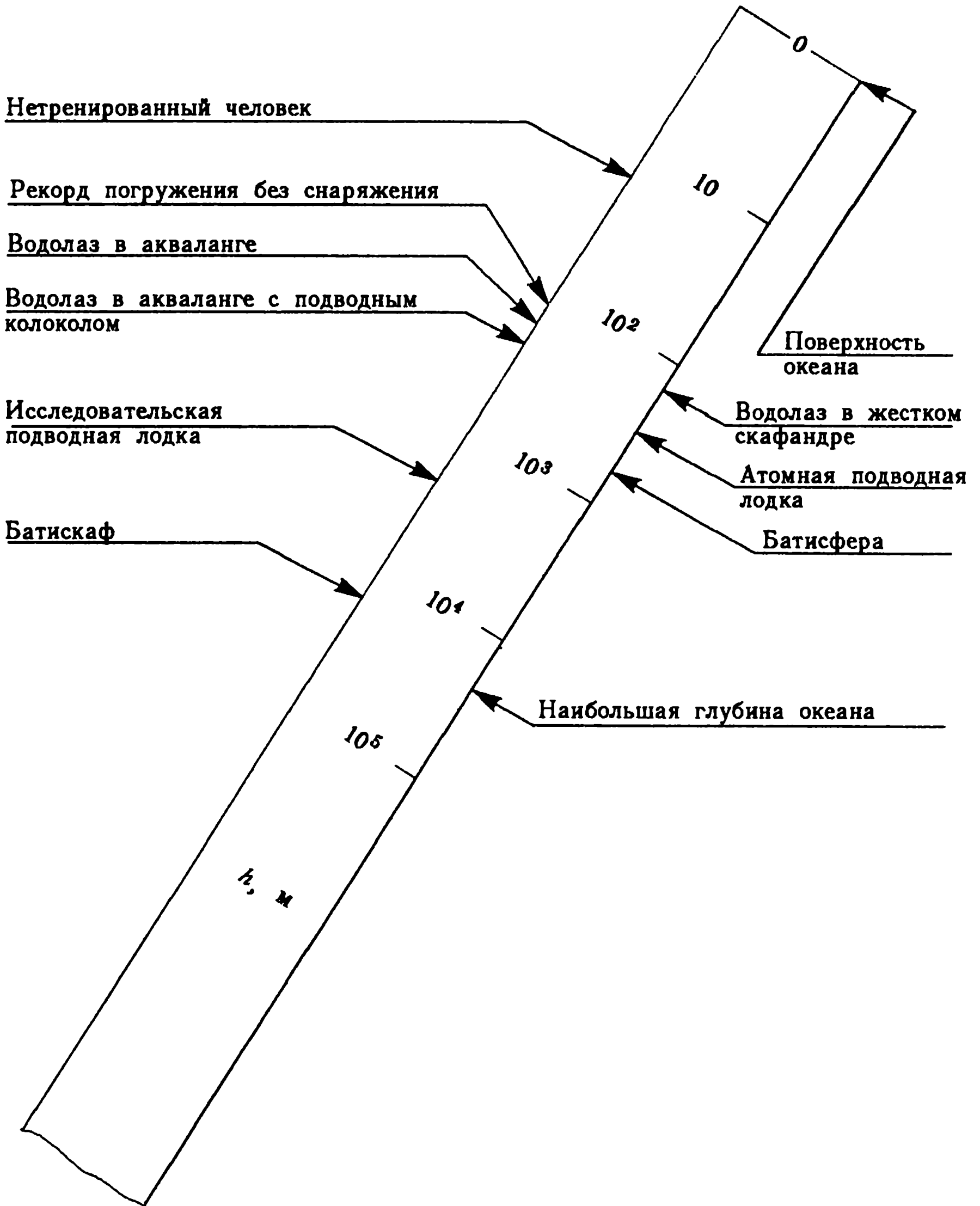


Рис. 6.5

дерация подводной деятельности разрешает глубоководное погружение лишь специально подготовленным людям под строгим медицинским контролем и только в исключительных случаях как медицинские эксперименты. Рекорд Майоля был поставлен именно в таких условиях. Ему предшествовали длительная и тщательная подготовка, специальные тренировки с применением дыхательной гимнастики йогов. Каждое погружение спортсмена обслуживала большая группа поддержки, включавшая врачей и пловцов-ныряльщиков. Их работа была связана с обслуживанием сложной медицинской техники, улавливающей малейшие изменения самочувствия ныряльщика, а также специального снаряжения.

Задача 27.20. Один из элементов снаряжения Ж.Майоля — зажим для носа, так называемая третья рука. Какова функция этого устройства?

Упомянем и о некоторых других ныряльщиках-профессионалах. Это знаменитые японские морские девы «ама», которые уже свыше 2000 лет ныряют на глубину от 15 до 24 м; ловцы жемчуга с островов Тихого океана, опускающиеся на глубину до 42—45 м; греческие охотники за губками, уходящие за своей добычей в бездну на 55—60 м.

Для обычных, нетренированных людей врачи считают предельной глубину погружения около 20 м. За этим барьером происходит растяжение правых полостей сердца и отек легких, вызывающий потерю сознания и гибель человека.

Давление крови Кровь — особая жидкость, обладающая специфическими свойствами, определяющими ее роль в жизни живых существ. Она представляет собой высококонцентрированную суспензию красных и белых кровяных клеток и тромбоцитов. Примерно 45% объема крови занимают красные кровяные тельца — эритроциты. Их необычными гидродинамическими свойствами определяются свойства крови как жидкости. Оказывается, будь эритроциты более твердыми и недеформируемыми, кровь имела бы вязкость, в 500 раз превышающую вязкость воды, и по консистенции напоминала бы мед. Однако вязкость крови превышает вязкость воды всего лишь втрое из-за того, что эритроциты могут деформироваться и как угодно ориентироваться в направлении течения. Основные физические параметры крови-жидкости приведены в таблице 6.5.

Основные физические параметры крови

Параметр	Значение параметра
Плотность, кг/м^3	$1,05 \cdot 10^3$
Вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}^*$	$4 \cdot 10^{-3}$
Вязкость плазмы крови, $\text{Па} \cdot \text{с}^*$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент диффузии гемоглобина в воде, $\text{м}^2/\text{с}^*$	$6,9 \cdot 10^{-11}$
Поверхностное натяжение, Н/м^*	0,058
Поверхностное натяжение плазмы крови, Н/м^*	0,073
Температура замерзания (плавления), $^{\circ}\text{C}$	$-0,56 \dots -0,58$
Удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$3,0 \cdot 10^3$

* Все параметры даны для температуры 37°C .

Течение крови в сосудах кровеносной системы человека можно описать с помощью модельных представлений установившегося движения жидкости в цилиндрической трубке. Тогда такое течение крови будет ламинарным и для него будет справедлив закон Пуассона.

Характеристики течения крови в кровеносной системе таковы. Быстрее всего кровь движется в аорте — артериальном сосуде, непосредственно выходящем из сердца. Здесь ее скорость равна $0,5 \text{ м/с}$, поперечный градиент скорости 100 с^{-1} , число Рейнольдса Re равно $1000—6000$. В капиллярах движение крови самое медленное: скорость составляет примерно $5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$, градиент — 400 с^{-1} . Чтобы средний расход крови был одинаков, общее сечение капиллярной сети, должно быть на три порядка больше сечения аорты.

Задача 27.21. Средняя скорость крови в аорте ($r = 1 \text{ см}$) в фазе расслабления равна примерно 30 см/с . Является ли течение крови ламинарным или турбулентным?

Задача 27.22. Радиус аорты равен примерно 1 см . Кровь движется в аорте со скоростью около 30 см/с . Вычислите скорость тока крови в капиллярах, если известно, что суммарная площадь сечения капилляров составляет около $0,2 \text{ см}^2$. (Хотя каждый капилляр имеет диаметр всего $8 \cdot 10^{-4} \text{ см}$, количество их исчисляется буквально миллиардами.)

Можно сделать простые, но интересные оценки основных параметров организма человека исходя из представлений о гидростатических свойствах крови.

Задача 27.23. На сколько отличается давление крови на уровне макушки и у подошв ног человека ростом 1,6 м, стоящего прямо?

Задача 27.24. Оцените размер тела человека исходя из предположения, что независимо от позы и перегрузки, испытываемой человеком, давление в кровеносных сосудах должно оставаться неизменным, чтобы человек чувствовал себя комфортно.

Р е ш е н и е

Из равенства $\Delta p = \Delta p'$, где $\Delta p = \rho g h$ — разность давлений, обусловленная перепадом высот между ступнями ног человека и его головой; $\Delta p' = \rho g' h'$ — разность давлений, обусловленная перепадом высот кровеносных сосудов лежащего человека, следует

$$\rho g h = \rho g' h',$$

откуда $h = \frac{g' h'}{g}$.

Если $g' = 10g$, а $h' = 0,2$ м, то $h = \frac{10g \cdot 0,2 \text{ м}}{g} = 2$ м.

Получили характерный размер человека — его рост.

При каждом сокращении сердца в артерию выбрасывается определенное количество крови, которое называется систолическим или ударным объемом крови. Систолическое давление обеспечивает передвижение крови по всему сосудистому руслу. Для этого оно должно превышать гидростатическое давление крови в теле человека.

Задача 27.25. Вычислите гидростатическое давление крови в теле человека. Примите, что перепад высот между положением сердца и наиболее удаленными от него частями тела человека (голова, ноги) составляет примерно 1 м.

Задача 27.26. Почему при измерении артериального давления манжета, связанная с манометром, надевается на руку примерно на уровне сердца? Можно ли для измерения давления в сердце использовать артерию в ноге?

Задача 27.27. Мы знаем о единице давления 1 мм рт. ст. В гидротехнике давление принято выражать в метрах водяного столба. Очевидно, говоря о давлении крови, можно пользоваться понятием «высота кровяного столба». Нормальное давление атмосферы составляет 760 мм рт. ст. Скольким миллиметрам водяного и кровяного столба оно соответствует?

Кровяное давление зависит главным образом от систолического объема крови и диаметра сосудов. В разных местах кровеносной системы кровяное давление разное: оно тем выше, чем уже просвет сосуда. Кроме того, по мере удаления от сердца давление крови в сосудах также уменьшается. Самое большое давление в аорте, несколько меньше в круп-

ных артериях. В венозных сосудах еще меньше. В полых венах оно иногда становится даже ниже атмосферного. Давление в артериях зависит, кроме того, от фазы сердечного цикла: оно наибольшее во время систолы (сокращения сердечной мышцы) и называется систолическим или верхним давлением p_v . Во время диастолы (расслабления сердца) давление крови наименьшее. Оно называется диастолическим или нижним p_n . В состоянии покоя у здорового взрослого человека отношение давлений составляет 120/70 (120 мм рт. ст. — верхнее давление, 70 мм рт. ст. — нижнее). Разница между ними ($p_v - p_n = p_n$) называется пульсовым давлением. Оно является важным показателем функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

Задача 27.28. Во сколько раз систолическое давление, обеспечивающее ток крови по сосудам кровеносной системы, больше, чем гидростатическое давление крови в теле человека?

Задача 27.29. Рост новорожденного ребенка составляет примерно 0,5 м. Каким должно быть его верхнее (систолическое) давление, чтобы обеспечить нормальное кровоснабжение органов тела?

Систолический объем крови, от которого зависит кровяное давление, в свою очередь, зависит от степени сокращения сердца: чем сильнее сокращение, тем больше объем выбрасываемой крови. Поэтому давление в артериях тем выше, чем сильнее сокращается сердце.

Задача 27.30. Левый желудочек сердца, сокращаясь, прогоняет кровь по системе кровообращения. Считая площадь внутренней поверхности желудочка равной 85 см^2 , а максимальное давление крови 120 мм рт. ст., рассчитайте полную силу, развиваемую мышцами желудочка в момент, когда давление максимально.

Сосуды кровеносной системы имеют свой предел прочности. Выражение для вычисления напряжения сосудов на разрыв установил Лаплас [40, 73]:

$$\sigma = \frac{R}{b} p,$$

где R — радиус сосуда; b — толщина стенки сосуда; p — давление внутри сосуда.

Задача 27.31. Оцените предельный размер животного исходя из прочности кровеносных сосудов.

Р е ш е н и е

Для гидростатического давления формула Лапласа имеет вид

$$\sigma = \frac{R}{b} \rho g h$$

Поскольку радиус сосуда R и толщина его стенки b прямо пропорциональны линейным размерам животного, то отношение $\frac{R}{b}$ является постоянной величиной и от размеров животного не зависит.

Тогда можно утверждать, что механическое напряжение стенок сосудов прямо пропорционально линейным размерам L животного: $\sigma \sim h \sim L$. Разрыв сосудов у человека наступает при давлении крови свыше 250 мм рт. ст. Обычно это случается у больных гипертонической болезнью, состояние сосудов которых неудовлетворительно. Примем поэтому, что для здоровых сосудов разрушающее давление равно 350 мм рт. ст.

Оценим предельный перепад высот, при котором кровеносное давление создаст предельное разрывное напряжение в стенках сосудов кровеносной системы животного:

$$h = \frac{\sigma}{\rho g} = \frac{350 \cdot 133}{10 \cdot 1050} \text{ м} = 3,5 \text{ м},$$

что соответствует росту примерно 7 м.

И действительно, на Земле не существует более высоких животных.

У детей и подростков артериальное давление несколько ниже, чем у взрослых людей. Характерные величины, определяющие работу системы кровообращения в зависимости от пола, возраста и нагрузки, приведены в таблице 6.6

Таблица 6.6

Характерные параметры работы сердечно-сосудистой системы подростков

Параметр	Юноши	Девушки
Верхнее давление, мм рт. ст.	110	108
Нижнее давление, мм рт. ст.	62	62
Ударный объем крови, мл	64	59
Минутный объем крови, л/мин	4,5	3,9

Интересно определить свое собственное кровяное давление, ударный и минутный объемы крови. Можно посвятить этому лабораторную работу (см. Приложение).

Глава 7

ТЕРМОДИНАМИКА

§ 28. Первое начало термодинамики

Тепловые процессы в теле человека Изучение термодинамики может быть осуществлено в интересующем нас смысле по трем направлениям. Одно из них связано с тепловыми процессами в теле человека. К ним относится метаболизм — обмен веществами с окружающей человека средой, а также обмен с нею энергией, на чем основана способность человека как теплокровного существа поддерживать постоянной температуру своего тела.

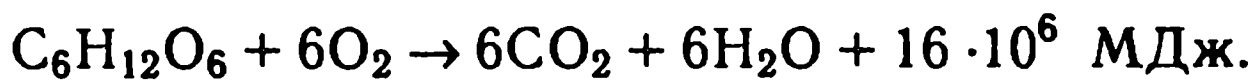
Источником энергии, за счет которой существует человек, является Солнце: оно поддерживает в необходимых для выживания человека пределах температуру поверхности планеты; аккумулярованную энергию Солнца в виде полезных ископаемых человек использует для поддержания локального теплового баланса, транспорта, приготовления пищи и т.д.

Задача 28.1. Рассмотрите процессы, благодаря которым внутренняя энергия вашего тела увеличивается. Проследите весь путь переноса энергии и покажите, что ее источником является Солнце.

Задача 28.2. Как можно применить первое начало термодинамики к объяснению обмена веществ (метаболизма) человека? Почему внутренняя энергия человека не уменьшается во время совершения им работы до катастрофического уровня?

Задача 28.3. Сердце, работая, как насос, сообщает крови кинетическую энергию. Что происходит с этой кинетической энергией затем?

Энергия, за счет которой поддерживаются обменные функции организма человека, выделяется в ходе химической реакции окисления содержащихся в пище углеводов, жиров и белков. Углеводы, например, соединяясь с кислородом, образуют воду и углекислый газ с высвобождением энергии [4, 110]. Вот как идет реакция окисления глюкозы ($C_6H_{12}O_6$):



Проводя аналогию между двигателем, способным производить работу, и человеческим организмом, следует отметить, что роль горючего, содержащего энергию в аккумулированной и готовой к употреблению форме, играет пища. Разные виды пищи, как и разные виды топлива, содержат различные количества энергии. Специальные таблицы для расчета калорийности пищевых продуктов позволяют определять их «энергоемкость» и составлять разнообразные диеты (способы питания) для компенсации энергозатрат организма.

Так, например, 1 г углеводов соответствует 20 000 Дж энергии. Почти вдвое больше энергии бывает запасено в 1 г жира животных.

В среднем на каждый литр потребляемого организмом кислорода, необходимого для окисления любых видов пищи, выделяется 20,2 МДж энергии. То, как энергия продуктов питания используется организмом, зависит от его активности. Некоторые типичные ситуации представлены в таблице 7.1

Таблица 7.1

Скорость метаболизма при некоторых видах деятельности человека

Вид деятельности	Скорость метаболизма, Вт
Сон, отдых	80
Низкая активность (прогулка, работа по дому)	290
Средняя активность (медленная езда на велосипеде, медленное плавание)	520
Высокая активность (игра в баскетбол, рубка леса, бег с препятствиями)	700
Предельная нагрузка (нагрузка, которую человек может выдержать в течение 1 мин)	810
(нагрузка, которую человек может выдержать в течение 10 с)	1400

Задача 28.4. Сколько энергии должен потреблять человек с пищей в сутки для поддержания своей жизни?

Р е ш е н и е

Выделяемая человеческим организмом в течение суток энергия составляет среднее между 80 Дж в состоянии сна и 150 Дж в состоянии бодрствования (см. табл. 7.1). Сле-

довательно, в сутки для поддержания жизнедеятельности человек с пищей в среднем должен получать примерно 10 МДж.

Задача 28.5. Сколько хлеба должен съесть в день человек, чтобы обеспечить свои энергетические потребности? Если предположить, что человек может существовать за счет бензина, то сколько его понадобится для обеспечения жизни человека в течение одного дня? Если бы человек мог существовать за счет электроэнергии, сколько ее понадобилось бы в день? Что обошлось бы дороже: содержание человека за счет питания его хлебом, бензином или электроэнергией?

Задача 28.6. Человек голодает одну неделю. Средняя скорость обмена веществ составляет 100 Вт в сутки. Оцените потерю массы человеком.

Задача 28.7. На сколько хватит 450 г жира для поддержания умеренной нагрузки (500 Вт)? Иными словами, сколько времени должен выполнять физические упражнения человек с избыточным весом, чтобы избавиться от 450 г жира?

В результате расчета определим, что «сбросить» 450 г жира можно, выполняя физические упражнения в течение 10 ч. Однако при этом появляется сильный аппетит. Другой способ уменьшения избыточного веса состоит в полном отказе от пищи. Тогда для поддержания жизни человеку придется расходовать ежедневно около 300 г своего жирового запаса.

Задача 28.8. При отрицательной калористической диете используется ледяная вода. Когда вы пьете эту воду, ваш организм должен выделять энергию, чтобы нагреть ее до температуры тела (37 °С). Сколько ледяной воды нужно выпивать каждый день, чтобы скомпенсировать поступление с пищей $8,38 \cdot 10^6$ Дж? Выразите ответ в литрах. Примите к сведению, что, вместо того чтобы пить ледяную воду, можно просто посидеть в ней и добиться такого же эффекта.

Человек как тепловой двигатель Аналогию между организмом человека и двигателем можно продолжить. Действительно, каждый двигатель характеризуется коэффициентом полезного действия, т.е. отношением полезной работы (мощности) к затраченной работе (мощности).

Однако в отличие от искусственных двигателей скорость совершения работы живым существом не поддается регулированию. Ее значение определяется скоростью протекания химической реакции окисления, характер которой устанавливается в процессе естественного отбора применительно к условиям на поверхности планеты. Условия сгорания углеводородного топлива в клетках мышц человека таковы, что только 25% выделяемой при этом энергии переходит в механическую работу, а остальные 75% превращаются в бесполезную теплоту. Таким образом, коэффициент полезного

действия человеческого организма сравнительно мал и составляет 10—25% в зависимости от видов деятельности.

Задача 28.9. Ежедневно с потребляемой пищей работник физического труда получает примерно 17 МДж. В течение дня он выполняет работу 10 Дж. Какая доля полученной с пищей энергии превращается в полезную работу?

Задача 28.10. Работа человека заключается в том, что он ежедневно в течение 8 ч поднимает 20-килограммовые ящики с уровня земли на платформу, возвышающуюся над землей на 1,5 м. Оцените производительность человека как тепловой машины. Продолжительность подъема одного ящика 10 с.

Задача 28.11. Хороший пловец затрачивает $1,2 \cdot 10^5$ Дж энергии за полминуты. Три четверти этой энергии превращается во внутреннюю, а остальное — в механическую работу рук и ног пловца. Оцените среднюю силу, препятствующую перемещению пловца, если он за 30 с проплывает 50 м.

Задача 28.12. Альпинист совершает восхождение к вершине горы, поднимаясь в час на 500 м. Какой потенциальной энергией будет обладать альпинист после 5-часового восхождения? Приняв КПД человеческого организма равным 25%, определите химическую энергию, затраченную во время восхождения. Сколько энергии должен получить альпинист с пищей перед началом восхождения, если для обеспечения нормальной жизнедеятельности он нуждается в 9 МДж?

Задача 28.13. Альпинист массой 70 кг взбирается на вершину горы высотой 3120 м от базового лагеря, находящегося на высоте 1850 м. Восхождение продолжается 4 ч. Вычислите: а) работу, совершаемую альпинистом против сил трения; б) среднюю мощность, развиваемую альпинистом; в) требуемую скорость потребления энергии, считая, что КПД человеческого организма составляет 15%; г) количество сахара, которое следует взять с собой альпинисту, чтобы обеспечить необходимый для подъема запас энергии; д) сколько остановок для принятия пищи должен сделать альпинист.

**Теплообмен
организма
человека с
окружающей
средой**

Почти вся высококачественная энергия, поступающая с пищей в организм, в соответствии со вторым началом термодинамики (см. § 29) отработав в теле человека и превратившись в низкокачественную энергию, должна затем быть удалена из организма.

Природа знает несколько способов отдачи энергии: конвекция, излучение, теплопередача и испарение. Все они нашли применение в организации процесса теплообмена организма человека с окружающей средой. Каким образом это происходит, показывает таблица 7.2.

Теплоотдача организма человека

Потери энергии	Доля энергии в общем балансе, %
На дыхание и испарение воды	13
На работу внутренних органов и систем	1,87
На нагрев выдыхаемого воздуха	1,55
На испарение воды с поверхности кожи	20,67
На нагрев окружающего пространства	30,15
На излучение	43,75

Как видно из таблицы 7.2, организм человека теряет энергию главным образом через кожу.

Задача 28.14. Как зависят теплотери животного от его линейных размеров?

Р е ш е н и е

Легко показать, что потеря энергии телом пропорциональна площади его поверхности, которая, в свою очередь, пропорциональна его линейным размерам, т.е. $Q \sim L^2$. При этом мы считаем, что температура, свойства кожи и другие характеристики остаются постоянными. Поглощенная пища должна восполнить как эти потери, так и ту энергию, которую мы расходует при движении. Поэтому необходимое количество пищи должно быть пропорциональным S , т.е. L^2 , а не L^3 , как можно было бы подумать. Следовательно, крупные животные могут экономнее расходовать пищу. И наоборот, мелкие животные должны почти непрерывно есть, чтобы восполнить потери энергии. Совсем маленькие животные не смогли бы даже запасти и переварить необходимое им количество пищи.

Так же можно оценить эффективность газообмена животных. Очевидно, что обеспечение кислородом каждой единицы массы тела определяется отношением площади внутренней поверхности легких к массе животного, т.е. $\frac{S}{m} \sim \frac{L^2}{L^3} \sim \frac{1}{L}$. Получили, что эффективность обеспечения организма кислородом обратно пропорциональна размерам животного.

Наблюдения показывают, что размеры тела теплокровных животных могут быть обусловлены климатом. Это один из

способов приспособления к климату. Ведь, чем крупнее животное, тем меньше отношение площади поверхности к заключенному в нем объему, так как с увеличением размеров L площадь S возрастает пропорционально L^2 , а объем V — пропорционально L^3 . Поэтому, чем крупнее животное, тем меньше расходуется энергии для поддержания необходимой температуры тела. А небольшие животные съедают в сутки количество пищи, превышающее их массу, чтобы тем самым компенсировать потери энергии со сравнительно большой поверхности их тела.

Средняя масса людей, постоянно живущих в тех или иных климатических зонах, тем меньше, чем выше температура окружающей среды. По данным исследователей, у жителей Финляндии средняя масса 69,3 кг, у монголов и жителей Северного Китая — 63,9 кг, у испанцев — 59,4 кг, у берберов в Алжире — 55,8 кг, у вьетнамцев — всего 50,4 кг. Наименьший рост и массу имеют жители экваториальных областей. Так, мужчина бушмен из пустыни Калахари весит в среднем 400 Н.

Задача 28.15. В холодный день часть внутренней энергии человека тратится на нагревание выдыхаемого воздуха. Пусть созданы условия для дыхания при минимальной активности (11 вдохов в 1 мин и 0,5 л на вдох). Вычислите потери энергии, связанные с дыханием, если температура окружающей среды равна 20 °С.

Задача 28.16. В классе объемом 100 м³ занимаются одновременно 25 человек. Если класс не обеспечен вентиляцией, а занятия идут непрерывно в течение 4 ч, оцените, насколько повысится температура воздуха в классе за счет энергии, выделяемой людьми.

Теперь рассмотрим, как природа регулирует постоянство температуры тела человека и других теплокровных животных.

Задача 28.17. Почему при одних условиях человеку холодно, а при других жарко? Не могут ли эти ощущения свидетельствовать о различии температур окружающей его среды?

Задача 28.18. Как поддержать температуру тела неизменной?

Одним из способов регулирования температуры тела у человека является теплообмен за счет теплопередачи. У этой проблемы есть два аспекта. Первый аспект состоит в необходимости отвода энергии из внутренних частей к поверхности тела человека и затем в окружающую среду. Этот аспект можно проиллюстрировать следующими задачами.

Задача 28.19. Оцените скорость, с которой энергия из внутренней части тела человека отводится к его поверхности. Считайте, что толщина ткани равна 4 см, температура кожи 34 °С, а внутренних органов 37 °С, площадь поверхности кожи равна 1,5 м². Коэффициент теплопередачи ткани тела

человека равен $0,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Сравните полученный результат со значением $840 \text{ кДж}/\text{ч}$ (с такой скоростью должен выделять энергию человек, совершающий нетяжелую работу).

Отсюда становится ясной необходимость конвективного охлаждения кожи за счет циркуляции крови по капиллярам.

Задача 28.20. На какое расстояние будет перемещаться тепловой поток от подкожных капилляров к поверхности тела за счет теплопередачи, если разность температур составляет $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$? Считайте, что через всю поверхность тела площадью $1,5 \text{ м}^2$ ежедневно выделяется количество теплоты, равное 840 кДж . Коэффициент теплопередачи ткани тела человека равен $0,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Актуальна для живых организмов и обратная задача: часто условия в окружающей среде складываются так, что организмы страдают от перегрева. Борьба с перегревом осуществляется в основном путем увеличения испарения.

Потоотделение — важный фактор терморегуляции организма человека, поскольку благодаря испарению пота кожа охлаждается. Различные участки поверхности тела человека по-разному обеспечены потовыми железами. Во время напряженной работы и при некоторых видах заболеваний потоотделение усиливается. Его активность претерпевает также возрастные изменения. Например, при нормальных условиях (температура $18\text{—}20 \text{ }^\circ\text{C}$, влажность $65\text{—}75\%$) с поверхности стопы взрослого человека за 1 ч выделяется $1,5\text{—}3 \text{ г}$ влаги, при физической нагрузке — $8\text{—}12 \text{ г}$ [23,417]. В сутки количество влаги, испарившейся с поверхности тела человека, достигает 500 мл .

Задача 28.21. Во время физических упражнений, продолжающихся 30 мин , человек выделяет количество теплоты, равное 750 кДж , за счет испарения пота с кожных покровов. Сколько воды он при этом теряет?

Задача 28.22. Существует оценка, показывающая, что на испарение капли воды на коже требуется такое же количество теплоты, как для нагревания двух других капель до кипения. Проверьте, так ли это.

Задача 28.23. Человек выполняет работу (скорость метаболизма $840 \text{ кДж}/\text{ч}$) в комнате с температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Он одет только в шорты, и площадь поверхности открытой кожи у него составляет $1,5 \text{ м}^2$. Определите энергию, излучаемую человеком за час. Сколько жидкости этот человек должен испарить в час, чтобы поддержать тепловой баланс? (Теплота испарения воды при нормальной температуре тела равна $1218 \text{ кДж}/\text{кг}$.)

Второй аспект проблемы состоит в необходимости уменьшения потерь энергии организмом человека.

Уменьшить потери энергии организмом можно путем создания специальной теплоизолирующей прослойки между ним и окружающей его более холодной средой. У животных с этой целью используются покровы из шерсти, пуха, жировой

ткани — материалов, характеризующихся низкой теплопроводностью. У человека эту функцию выполняет одежда. Теплоизолирующие защитные свойства одежды обусловлены действием воздушной прослойки. В отсутствие одежды наше тело нагревалось бы воздухом, соприкасающимся с кожей, и вскоре было бы достигнуто достаточно комфортное состояние, поскольку воздух — хороший теплоизолятор. Однако достаточно легкого дуновения ветерка или движения человека, чтобы воздух пришел в движение и теплые его слои сменились холодными (конвекция). В результате увеличились бы потери энергии телом. Одежда согревает нас потому, что она удерживает нагретый нами воздух и не дает ему легко уходить от тела.

Задача 28.24. Как уберечься от холода?

Задача 28.25. Альпинист носит теплую одежду толщиной 2,5 см; общая площадь поверхности $1,8 \text{ м}^2$. Температура на внешней поверхности одежды равна $0 \text{ }^\circ\text{C}$, а на внутренней (соприкасающейся с кожей) $34 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите мощность теплового потока за счет теплопередачи через одежду альпиниста, если: а) одежда сухая, а ее коэффициент теплопередачи соответствует пуху ($0,025 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); б) одежда мокрая и коэффициент теплопередачи соответствует воде ($0,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Учтите, что при этом одежда уплотнилась до толщины 0,5 см.

Следующим этапом борьбы человека за выживание после изобретения одежды было создание жилища как средства защиты сначала от неблагоприятных условий среды — дождя и снега, а затем и холода. Воздух в помещении служит теплоизолирующей прослойкой между телом человека и более холодной окружающей средой. Стены, крыша и пол жилища служат для предохранения этого слоя воздуха от участия в конвективном переносе энергии из помещения на улицу. Поскольку эту оболочку трудно сделать совершенно теплонепроницаемой или хотя бы герметичной, часть энергии будет просачиваться из помещения наружу. Чтобы компенсировать эти потери, недостаточно использовать то количество теплоты, которое выделяется за счет жизнедеятельности людей, и поэтому приходится предназначенные для жизни людей помещения отапливать. (Мы опускаем при этом соображения по поводу необходимости смены отработанного в процессе жизнедеятельности воздуха, что, впрочем, еще более увеличивает энергозатраты.)

Задача 28.26. Почему мы топим зимой?

Задача 28.27. Основным источником тепловых потерь в доме являются окна. Тепловые потери через окна обусловлены следующими процессами:

1) вентиляцией вблизи негерметичных краев; 2) утечкой через раму (особенно если она из металла); 3) утечкой через поверхность стекла; 4) излучением. Каков механизм утечки в первых трех случаях? Какие из механизмов утечки будут ослаблены, если завесить окна тяжелыми шторами?

Задача 28.28. Вычислите тепловой поток в единицу времени через стеклянное окно площадью 3 м^2 , если температура внутренней и внешней поверхностей окна равна соответственно $15 \text{ }^\circ\text{C}$ и $14 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 28.29. В доме имеются хорошо теплоизолированные стены толщиной 22 см (предположите, что их теплопроводность равна теплопроводности воздуха) и площадью 350 м^2 , деревянная крыша толщиной $5,5 \text{ см}$ и площадью 280 м^2 и окна без ставней толщиной $0,65 \text{ см}$ и общей площадью 28 м^2 . Вычислите скорость, с которой энергия должна сообщаться дому для поддержания в нем температуры $30 \text{ }^\circ\text{C}$, если температура вне дома $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ и потери энергии происходят лишь из-за теплопередачи. Если в начальный момент времени температура в доме была равна $10 \text{ }^\circ\text{C}$, то какое приблизительно количество теплоты необходимо сообщить, чтобы поднять температуру в доме до $20 \text{ }^\circ\text{C}$ за 30 мин ?

Задача 28.30. Окно с двойным остеклением состоит из рамы, в которую вставлены два стекла, разделенные воздушной прослойкой. Получите формулу для скорости теплового потока благодаря теплопередачи через различные материалы.

§ 29. Второе начало термодинамики

Закон сохранения энергии хорошо известен: энергия не возникает и не исчезает, а может лишь переходить от одной физической системы к другой. И во всех процессах энергия изолированной системы сохраняется. Для тепловых процессов закон сохранения энергии носит название первого начала термодинамики и как таковой допускает следующую формулировку: «Невозможен вечный двигатель первого рода».

Энтропия и негэнтропия Не все процессы, в которых энергия сохраняется и которые тем самым не запрещены законом ее сохранения, реализуются в действительности. В термодинамике показано, что возможны лишь те процессы, в которых не убывает, а сохраняется или возрастает (в замкнутой или незамкнутой системе соответственно) физическая величина, названная энтропией. (Часто вместо понятия энтропии используют равную ей величину с противоположным знаком — негэнтропию.) Энтропия характеризует качество энергии. Возрастанию энтропии соответствует понижение качества энергии. Это означает, что процессы в природе протекают так, что энергия данного качества сама собой может превратиться только в энергию более низкого качества. Последнее положение пред-

ставляет собой одну из формулировок второго начала термодинамики.

Статистическая физика раскрывает сущность понятия энтропии глубже. Энтропия — это мера беспорядка в системах атомов, электронов, фотонов и других частиц. Чем больше порядка в системе, тем ниже энтропия (и соответственно больше негэнтропия). При этом под беспорядком понимают вероятностные состояния системы. Чем выше вероятность осуществления данного состояния системы, тем больше и ее энтропия S . Больцман показал, что $S = k \lg \omega$, где ω — вероятность состояния системы.

Второе начало термодинамики сформулировано для изолированных термодинамических систем, где все процессы протекают без какого-либо внешнего воздействия, сами по себе. При помощи внешних воздействий можно вызвать в системе разнообразные изменения, в том числе и уменьшение энтропии. Однако исходную систему вместе с источником воздействия можно считать новой, более широкой изолированной системой. В такой системе энтропия может только возрастать (негэнтропия убывать). Отсюда следует, что рост негэнтропии в первичной системе не может превышать ее убыли в источнике воздействия.

Энтропия и живые организмы Понятие энтропии и второе начало термодинамики применимы и к сильнонеравновесным процессам, и к открытым системам, обменивающимся энергией и веществом с окружающей средой. А именно к этой группе систем стали относить живые существа и живую природу в целом.

Процессы, протекающие в неравновесных (диссипативных) системах, обладают рядом особенностей. Главная из них заключается в следующем: такая система способна уменьшать свою собственную энтропию за счет извлечения из окружающей среды высококачественной энергии и вещества и вывода в среду низкокачественной энергии и вещества. При этом происходит рост суммарной энтропии системы организм — среда за счет понижения качества протекающих через систему энергии и вещества, что является определяющим свойством неравновесных систем. Специфика живого организма состоит как раз в том, что он поддерживает себя на достаточно высоком уровне негэнтропии за счет убывания негэнтропии окружающей среды, а условием существования жизни является достаточность негэнтропийных запасов среды обитания. Точнее сказать, жизнь создает актуальную упорядоченность из неактуальной упорядочен-

ности, причем неизбежное возрастание энтропии происходит в неактуальных частях системы. Как представления о диссипативных системах соотносятся с живыми структурами и процессами, протекающими в них, можно понять из следующих примеров.

Жизнь на Земле возникла, существует и развивается за счет негэнтропии солнечного излучения. Актуальной подсистемой является сфера жизни на Земле, неактуальной — космическое пространство, откуда берется солнечное излучение и куда рассеивается излучение с поверхности Земли. Последнее обладает более высокой энтропией, чем излучение, поступающее от Солнца. В конечном счете рост упорядоченности в биосфере Земли с большим избытком оплачен крохотным пока увеличением скорости роста энтропии Вселенной. При этом роль, которую играет уходящее от Земли в мировое пространство излучение — охлаждение и очищение среды обитания от избытка энтропии, — столь же важна, как и роль солнечного излучения, поставляющего энергию [72, 25].

Задача 29.1. Оцените негэнтропийный рацион Земли.

Р е ш е н и е

Энтропия солнечного излучения $S_1 = \frac{\Delta Q}{T_1} = \frac{U_1}{T_1}$.

Энтропия излучения, уходящего от Земли, $S_2 = \frac{U_2}{T_2}$.

Так как в среднем энергия на Земле практически не накапливается, то $U_1 = U_2 = U$ и негэнтропийный рацион Земли за год определяется разностью вычисленных энтропий:

$$\Delta S = -\Delta N = \frac{4}{3} \left(\frac{U_2}{T_2} - \frac{U_1}{T_1} \right) = \frac{4}{3} U \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right).$$

После оценок, выполненных с учетом плотности энергии солнечного излучения и геометрических размеров Земли, получим (при $T_1 = 6000$ К и $T_2 = 300$ К)

$$\Delta S = -\Delta N = 3 \cdot 10^{24} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{6000} \right) \text{ Дж/К} = 4 \cdot 10^{25} \text{ Дж/К}.$$

Поскольку в полученном выражении второй член вносит поправку всего лишь в 5%, им можно пренебречь. Тогда выражение приобретает вид $\Delta S \sim \frac{U}{T_2}$.

Это означает следующее: при заданном количестве и качестве энергии солнечного излучения можно добиться существенного прироста негэнтропии за счет более глубокого

охлаждения уходящего от Земли излучения. Эта возможность должна определять стратегию экономической политики человечества в будущем.

Другой пример. Растительный мир Земли представляет собой диссипативную структуру, существующую благодаря негэнтропии солнечного излучения. Вследствие фотосинтеза рассеиваемое растительным покровом солнечное излучение уходит в мировое пространство с пониженной негэнтропией, имея более низкое качество, чем в случае рассеяния с «голового» земного шара. Действительно, рассеиваемое излучение более длинноволновое. Это означает, что заданное количество энергии будет переноситься бóльшим числом фотонов, что и означает рост энтропии рассеиваемого излучения. Растительный покров ускоряет рост энтропии Вселенной, но увеличивает за счет этого негэнтропийные запасы Земли. В этом проявляется общее свойство жизни как упорядоченной подсистемы: она ускоряет рост энтропии системы в целом, но «создает упорядоченность» локально, [72, 14].

Еще один пример связан с ответом на вопрос: почему мы топим зимой? Неспециалист ответит: чтобы сделать комнату теплее; знаток термодинамики выразится, возможно, таким образом: чтобы подвести недостающую энергию. И правым окажется профан, а не ученый.

Действительно, в соответствии с законами физики энергия единицы массы воздуха в комнате $U = c_v T$. Тогда энергия единицы объема равна $U = c_v \rho T = c_v \rho \frac{p}{R}$, так как

$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{\mu}$. Получается, что количество энергии в комнате не

зависит от температуры и целиком определяется барометрическим давлением, т.е. вся энергия, которая поступает в комнату, уходит через поры в стенах наружу.

Почему же мы все-таки топим? По той же самой причине, по которой жизнь на Земле была бы невозможна без солнечного излучения. При этом дело заключается не в поступающей энергии. Последняя будет вновь излучена вплоть до пренебрежимо малой доли, подобно тому как человек не меняет своей массы, несмотря на принятие пищи. Условия нашего существования требуют известной температуры, и, чтобы ее поддерживать, используется не увеличение энергии, а понижение энтропии [73, 18].

Точно так же и растение, и человек живут за счет энергии, поступающей и выделяющейся этими живыми си-

стемами. Живая ткань растения более высокоструктурно организована, чем поступающие из воздуха и почвы питательные вещества. Поэтому энтропия при ее образовании будет несравненно меньше, чем суммарная энтропия исходных веществ. Энтропия выходящих потоков энергии и вещества также оказывается значительно больше, чем входящих. Растения только потому могут расти, что сбрасывают избыток энтропии в окружающую среду; при этом прирост энтропии в ней намного больше, чем снижение ее в самом растении. Такая же картина наблюдается и с животными, и с человеком.

Задача 29.2. Оцените негэнтропийный баланс растения.

Второе начало термодинамики и способность к самоорганизации

Одним из крупнейших достижений современной термодинамики называют совмещение второго начала термодинамики со способностью к самоорганизации. Оказывается, совсем необязательно использовать

для объяснения возникновения жизни идею творца (то ли бога, то ли высокоразвитую цивилизацию). За счет сильнонерасбалансированных негэнтропийных потоков, действующих в космосе, могут возникать и неизбежно возникают упорядоченные диссипативные структуры. Источником самоорганизации в системе являются флуктуации, запускающие механизм неустойчивости, который и приводит к формированию новой пространственно-временной структуры.

Для возникновения жизни земного типа на уровне химических реакций, характеризующихся разностью энергий порядка электронвольта, необходимо, чтобы первичный источник энергии был на качественно более высоком уровне (ядерные превращения, сопровождающиеся выделением энергии порциями в миллионы электронвольт).

Таким образом, для успешного функционирования любой живой системы необходимо, во-первых, наличие источника отрицательной энтропии (негэнтропии) и, во-вторых, существование способов избавления от отходов жизнедеятельности. С источником негэнтропии — Солнцем — все ясно: его излучения хватит человечеству еще на миллионы лет. Также можно пока не беспокоиться по поводу загрязнения космического пространства излучением — оно уходит и рассеивается очень далеко. Гораздо сложнее дело обстоит с самой Землей: проблема отходов становится поистине глобальной. Многие отходы мы уже умеем утилизировать или же научимся этому в ближайшем будущем. Но здесь имеются

свои принципиальные ограничения. Даже самое «чистое производство» или «полная утилизация» означают просто избавление от своих отходов за счет дополнительного увеличения их суммарного количества (в смысле роста энтропии) на земном шаре.

Чтобы в условиях растущего производства и потребления сохранить пригодную для жизни среду обитания на Земле, имеются два пути. Первый — лучше использовать негэнтропию солнечного излучения, второй — отыскать и ввести в действие новые источники негэнтропии, например негэнтропию, освобождающуюся при превращении атомных ядер. Но даже после отыскания таких возможностей остается проблема теплового загрязнения среды обитания (см. § 21). Да, природа щедро одарила человечество мощными потоками негэнтропии, идущими от Солнца. Наша задача состоит в выборе стратегии наиболее разумного и экономного их использования.

По-видимому, перспективная модель энергоснабжения Земли в будущем могла бы выглядеть следующим образом. Ее должны составлять приемник и преобразователь солнечной энергии (например, в химическую или электрическую), устройство для передачи высококачественной энергии в энергосистему Земли, устройство для принудительного отвода низкокачественной энергии с поверхности Земли в космическое пространство.

Уже разрабатываются проекты организации этой системы, хотя в настоящее время у человечества еще нет достаточных ресурсов для их реализации. При этом наряду с проблемами технологического характера, такими, как, например, повышение КПД солнечных батарей, обсуждаются перспективы создания космических энергосистем, основанных на фотосинтезе.

Последний вопрос, который мы хотели бы обсудить в связи с изучением данной темы,— это вопрос о проблеме контакта с другими цивилизациями. Из всего рассмотренного выше следует, что проблема контакта тесно связана с проблемой среды обитания. Ведь, чем более развита цивилизация, тем мощнее поток использованной ею энергии, уходящий в космос. Именно он и может служить признаком существования высокоразвитой внеземной цивилизации (ВЦ). При этом ей не нужно было бы посылать специальные сигналы для обнаружения своего существования: потоки отработанной энергии и без того прекрасно экспонировали бы ее. Более того, посылка сигнала на большие расстояния (а именно на таких расстояниях, по-видимому, ВЦ находятся

друг от друга) потребовала бы огромного количества энергии, которую лучше потратить дома: на улучшение среды обитания, например. Можно, конечно, воспользоваться более разумной и экономной возможностью посылки сигнала, промодулировав потоки отработанной энергии, и без того уходящие в космос. Именно это излучение, значительно более длинноволновое, чем излучение источников высококачественной энергии, и следует искать на небе как свидетельство существования ВЦ.

Если бы удалось обнаружить внеземные цивилизации, то это означало бы, что наша земная цивилизация имеет хорошие шансы на преодоление трудностей, связанных с загрязнением среды, а также других глобальных кризисов и может еще долго идти по пути прогресса.

Глава 8

ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

§ 30. Электромагнитное взаимодействие. Электрическое поле Земли

Электромагнитное взаимодействие При изучении темы «Электростатика. Постоянный ток» важно обратить внимание учащихся на особую роль, которую играет в процессах, происходящих во Вселенной, электромагнитное взаимодействие — следующее по интенсивности после гравитационного (см. § 10).

Электромагнитное взаимодействие определяет структуру атомов, а следовательно, описывает всю картину явлений в химии и физике (за исключением ядерных процессов). Оно характеризуется безразмерной постоянной электромагнитного взаимодействия α_e .

Задача 30.1. Вычислите безразмерную постоянную электромагнитного взаимодействия.

Р е ш е н и е

Значение этой величины определяется выражением

$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}.$$

Задача 30.2. Найдите отношение силы гравитационного взаимодействия электрона и протона к силе их электростатического взаимодействия.

Электрическое поле Земли Среда обитания человека, представляющая собой поверхность нашей планеты, характеризуется многими параметрами: температурой, освещенностью, обусловленной рассеянным солнечным светом, газовым составом атмосферы и т.п. Одним из важнейших ее параметров является электрическое поле.

Электрическое поле Земли образовано зарядом поверхности и зарядами, сосредоточенными на некоторой высоте в атмосфере Земли. Поверхность земного шара несет отри-

цательный заряд, по модулю равный $6 \cdot 10^5$ Кл. Этот заряд не очень велик. Например, через обычную лампу мощностью 60 Вт, включенную в сеть, такой заряд протекает за 25 сут.

Задача 30.3. Проверьте, так ли это.

Электрическое поле Земли подобно полю сферического конденсатора, одной из обкладок которого является заряженная поверхность планеты. Вследствие огромной кривизны поверхности обкладки поле можно считать однородным (рис. 8.1).

Задача 30.4. Изобразите с помощью линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей электрическое поле Земли.

Задача 30.5. Приняв Землю за однородный заряженный шар с зарядом $6 \cdot 10^5$ Кл, определите напряженность электрического поля Земли вблизи ее поверхности.

Задача 30.6. Чему равна напряженность электрического поля на высоте 10 км от поверхности Земли?

Задача 30.7. Чему равна разность потенциалов между поверхностью Земли и верхними слоями земной атмосферы?

Задача 30.8. Чему равна разность потенциалов между кончиком носа и подошвами ног человека?

Задача 30.9. Разность потенциалов между кончиком носа человека и подошвами его ног составляет примерно 200 В. Почему же человек, несмотря на это, не получает электрического удара?

Р е ш е н и е

Человек не чувствует этой разности потенциалов и его не поражает электрическим током, потому что сам он является хорошим проводником электричества (см. § 32). Как

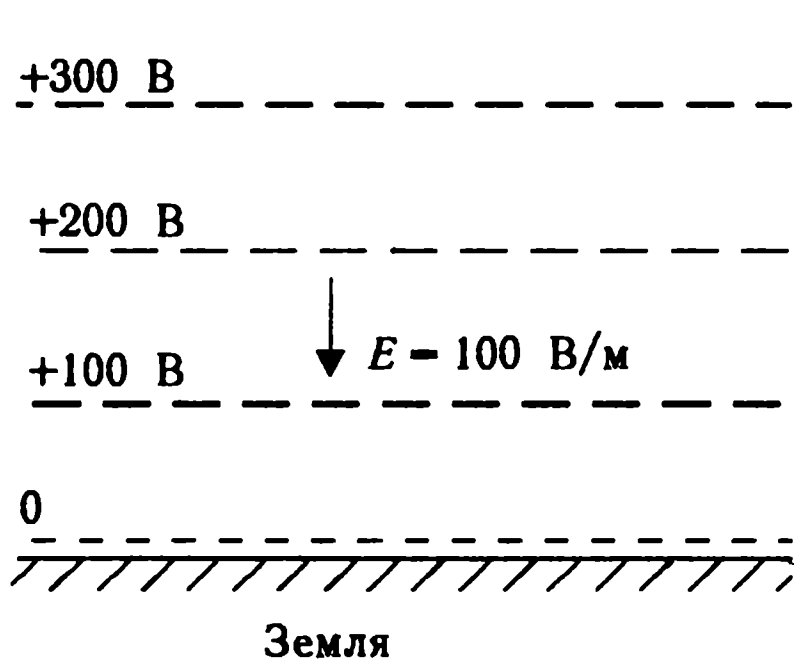


Рис. 8.1

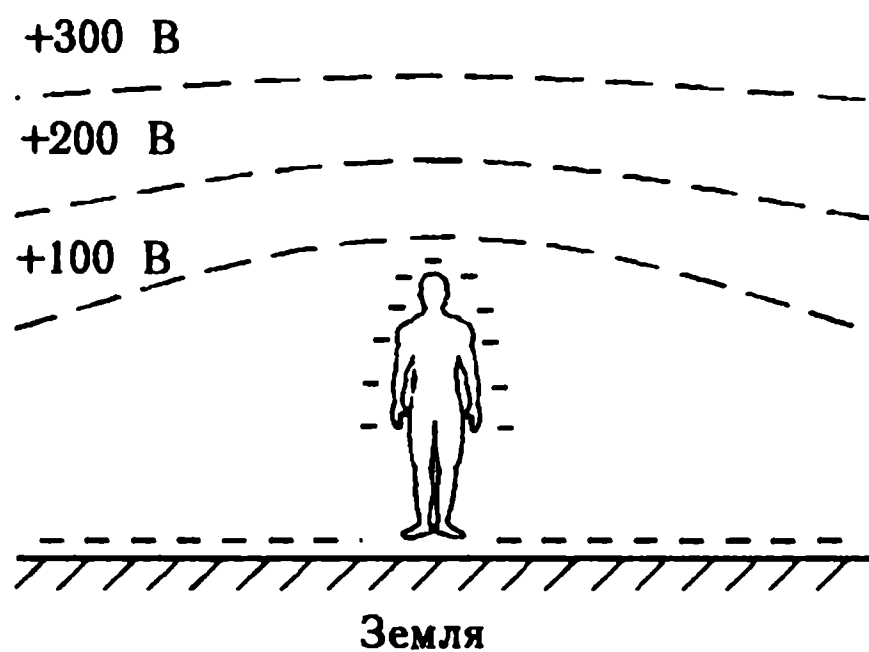


Рис. 8.2

и всякий проводник, тело человека сильно искажает земное электрическое поле (рис. 8.2). Линии напряженности подходят к поверхности тела человека нормально, а эквипотенциальные поверхности огибают его совершенно так же, как они огибают металлический предмет. Все точки тела человека находятся под одним и тем же потенциалом.

Задача 30.10. Изобразите с помощью линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей электрическое поле человека, стоящего на земле.

Электрическое поле Земли достаточно слабое. Но характер проводимости тела человека позволяет ему спокойно переносить без опасности для жизни и гораздо большие разности потенциалов. Для демонстрации этого эффекта можно предложить опыт, описанный в учебнике Дж.Орира «Физика» (см. [4, 254]).

Определению важного параметра среды, окружающей человека, — напряженности электрического поля Земли — можно посвятить специальную лабораторную работу.

Задача 30.11. Напряженность электрического поля вблизи поверхности Земли равна по модулю $E = 130$ В/м и направлена к центру Земли. Чему равен суммарный заряд Земли? Сколько лишних электронов приходится на 1 м² земной поверхности?

Задача 30.12. Какой энергией обладает электрическое поле Земли?

Задача 30.13. Земля облучается космическими частицами высокой энергии, приходящими из пространства вне Солнечной системы, средняя энергия этих частиц составляет несколько миллиардов электронвольт. Интенсивность потока протонов, достигающих земной атмосферы, составляет 1 протон/(см²·с). Оцените время, необходимое для того, чтобы космические протоны повысили потенциал Земли настолько, что они уже не смогут в дальнейшем попадать на поверхность Земли из-за электростатического отталкивания.

Процессы, приводящие к образованию заряда на земной поверхности, очень сложны. В отличие от других космических тел ее поверхности не достигает поток заряженных частиц от Солнца — солнечный ветер (см. гл. 9), так как Земля защищена от его воздействия геомагнитным полем (см. гл. 9) и атмосферой. Отрицательный заряд Земли формируется и поддерживается приблизительно постоянным в результате взаимодействия земной поверхности с приземными слоями атмосферы. Считается, что сток отрицательного заряда с поверхности Земли в атмосферу происходит в основном за счет проводимости приземного слоя воздуха, а в возвращении заряда на поверхность большую роль играют молнии. Их ежесекундно над Землей вспыхивает около сотни, причем каждая молния несет заряд, равный 10 — 50 Кл. Средняя

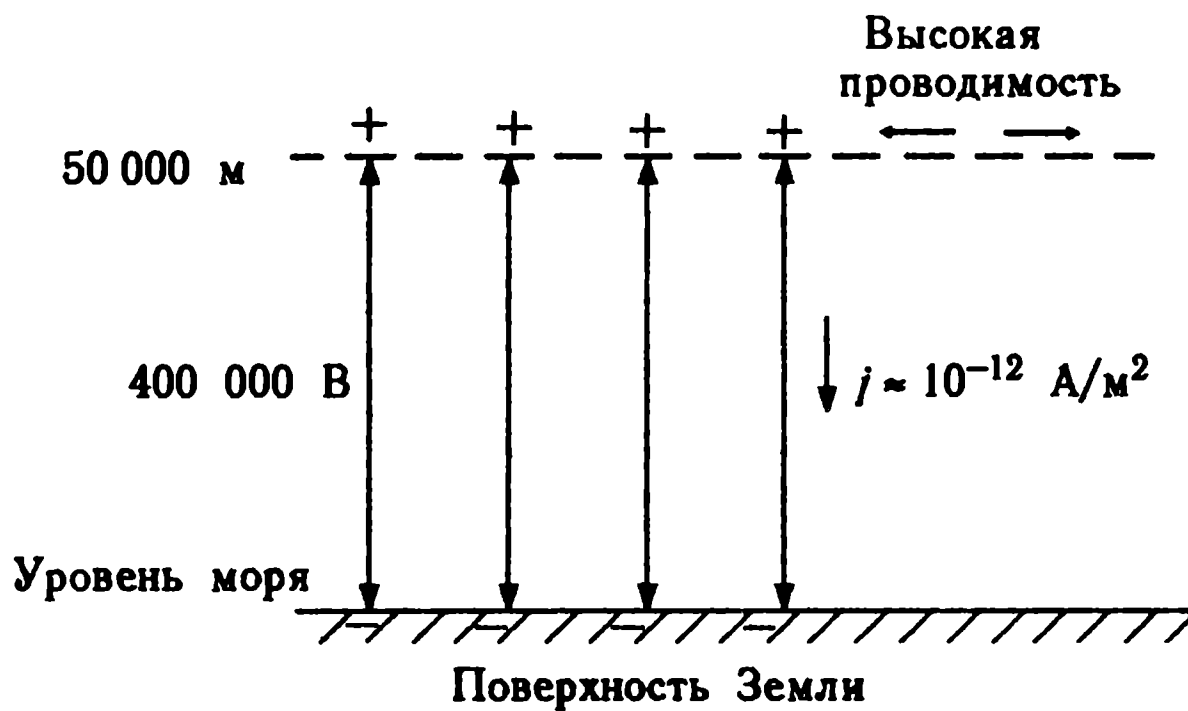


Рис. 8.3

плотность тока проводимости атмосферы составляет 10^{-12} А/м² (рис. 8.3). Общая сила тока достигает 1800 А.

Баланс электрического заряда Земли можно проиллюстрировать следующей таблицей (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Баланс электрического заряда Земли

Причины перемещения заряда	Линейная плотность заряда, Кл/км
Токи проводимости атмосферы	+60
Токи осадков	+20
Разряды молний на Землю	-100
Токи с острия	-40

Задача 30.14. Как быстро Земля потеряла бы свой заряд, если бы он не поддерживался процессами, происходящими в атмосфере?

Задача 30.15. Как электрическое поле Земли влияет на движение положительных и отрицательных зарядов в приземном слое атмосферы?

Задача 30.16. Заряд, переносимый на Землю разрядом молнии при разности потенциалов $3,5 \cdot 10^7$ В, составляет 30 Кл. Сколько при этом выделяется энергии? Какое количество воды при 0 °С можно было бы довести до кипения за счет этой энергии?

Электрическая активность планеты и жизнь Электрическая активность атмосферы довольно спорный фактор среди других, характеризующих условия на планете, пригодной для жизни. Так, например, известный планетолог С. Доул считает, что слишком интенсивная электрическая активность атмосферы планеты могла бы превратить ее в нежилую [34, 41].

Однако, в начале эволюционного процесса на Земле электрическая активность планеты сыграла, по-видимому, положительную роль. Известны результаты опытов по синтезу органических молекул—«кирпичиков жизни» типа аминокислот из набора простейших исходных химических соединений. Суть опыта заключалась в том, что в большом, изолированном от внешней среды сосуде моделировалась атмосфера первичной Земли, представлявшая собой смесь метана, аммиака, водорода, водяного пара. Некоторое количество воды на дне сосуда имитировало водоем на поверхности Земли. Необходимая для химических реакций синтеза энергия черпалась из разных источников. В некоторых вариантах опыта в этой роли использовался электрический разряд, имитирующий электрическую активность древней земной атмосферы. Через некоторое время после начала опыта и включения источника энергии в сосуде образовывались органические молекулы, входящие в состав живых организмов. Схема этого опыта приведена на рисунке 8.4. В разных странах мира различные группы ученых проводили аналогичные опыты, изменяя некоторые детали (например, концентрацию и набор исходных соединений). Результаты опытов во всех случаях получились примерно

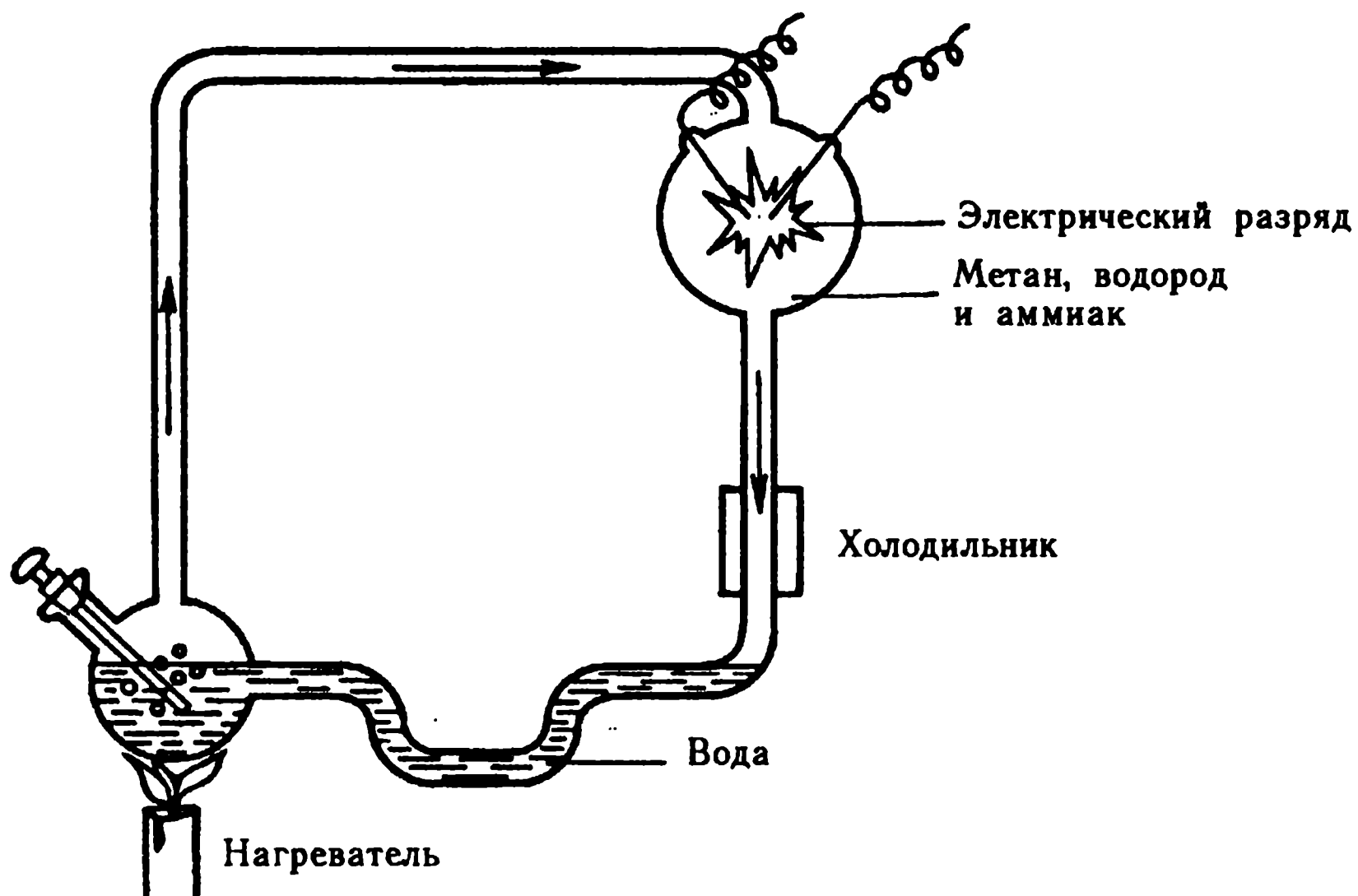


Рис. 8.4

одинаковыми, что подтверждает, по мнению ученых, догадку о возможности самопроизвольного зарождения жизни на поверхности нашей планеты много миллиардов лет назад.

§ 31. Электрические свойства воды и живых клеток

Электрические свойства воды

Трудно переоценить значение воды для живых существ (см. § 27). Оказывается, многие ее важные для жизни свойства обусловлены структурой молекулы воды. Молекула воды представляет собой диполь, а вещество в целом — полярный диэлектрик (рис. 8.5). Это означает, что, хотя в целом молекула воды нейтральна, центры тяжести ее положительного и отрицательного зарядов не совпадают даже в отсутствие внешнего электрического поля. Атом кислорода забирает электроны от атомов водорода, обеспечивая себе большой отрицательный электрический заряд, в то время как два ядра атома водорода образуют положительно заряженные области. С соседними молекулами такая молекула взаимодействует электрически, притягивая к своему положительному концу отрицательный заряд, а к отрицательному — положительный заряд соседки. В результате молекулы тесно связываются друг с другом, образуя кластеры, или супермолекулы, если вещество однородно. Высокая диэлектрическая проницаемость воды 81 означает, что два заряда взаимодействуют в воде с силой, в 81 раз меньшей, чем если бы они взаимодействовали в вакууме. Это же приводит к тому, что вода ослабляет связи

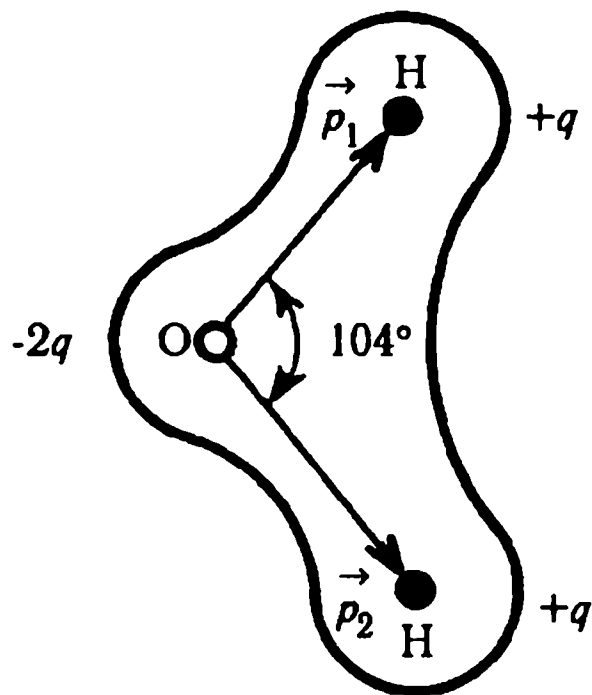


Рис. 8.5

между атомами растворенного вещества, т.е. способствует диссоциации.

Задача 31.1. Электрический дипольный момент молекулы воды равен около $6 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Какова напряженность электрического поля в точке, лежащей на оси диполя на расстоянии $2 \cdot 10^{-10}$ м?

Задача 31.2. Дипольный момент молекулы воды равен $6 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Определите поляризованность насыщенного водяного пара при 100°C и атмосферном давлении.

Электрические свойства живых клеток

Все нормальные функции организма человека обеспечиваются электрическим взаимодействием. Работа мышц, в том числе дыхательных и сердца, контролируется электрическими токами. Информация, полученная разными органами чувств, передается в мозг с помощью электрических сигналов. Однако источники и проводники токов в живых организмах непохожи на те, что используются в технике. Попробуем разобраться, что происходит в живых организмах с «электрической» точки зрения.

В ответ на действие электрического тока на нервы и мышцы в них возникает возбуждение — возникает электрический сигнал, который затем распространяется дальше по волокну. Как и почему это происходит?

Основную роль в возникновении «живого» электричества играют мембраны (оболочки) клеток. Они представляют собой жидкие пленки толщиной 7—15 нм, состоящие из жиропо-

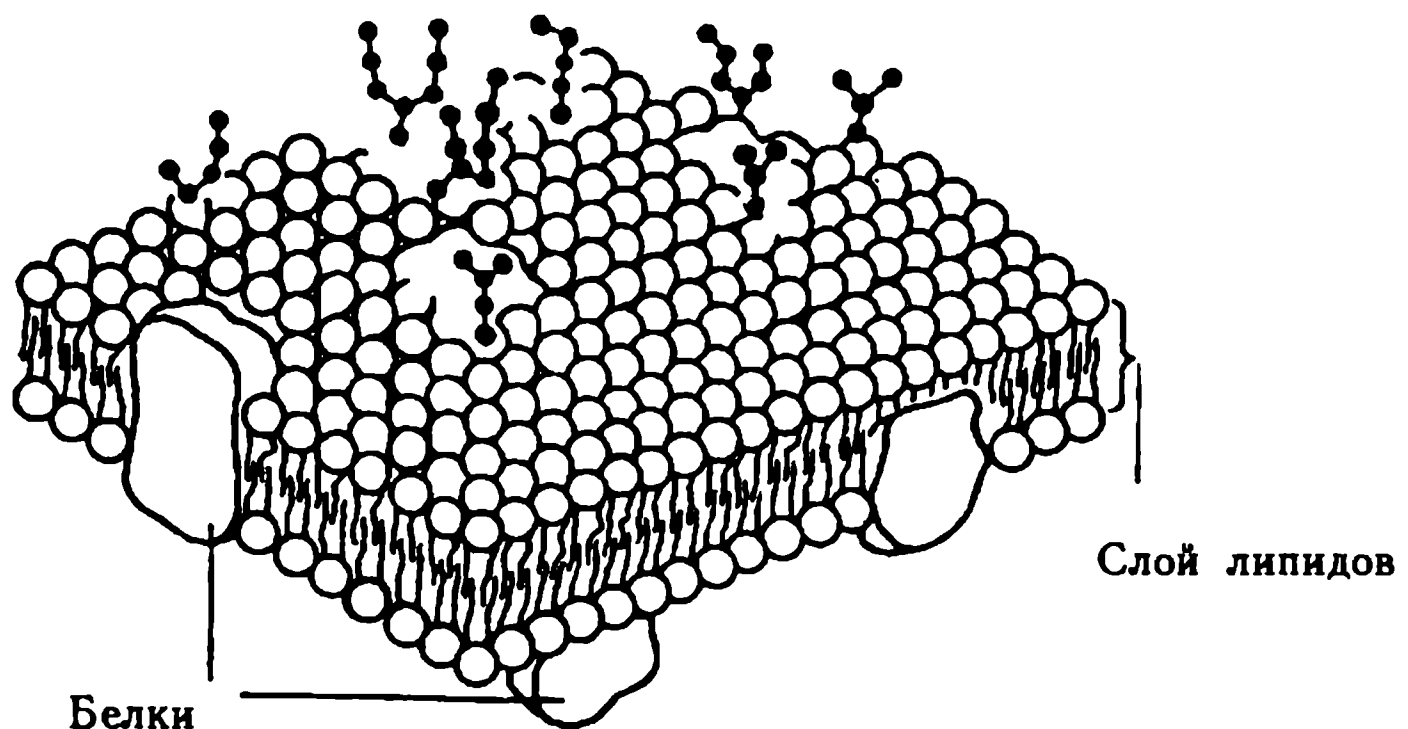


Рис. 8.6

добных веществ — липидов (рис. 8.6). На поверхности мембраны клетки существует двойной слой зарядов, который создает разность потенциалов между внутриклеточным и внеклеточным пространством. С точки зрения электропроводности мембрана ведет себя как параллельно соединенные резистор и конденсатор.

Задача 31.3. Оцените удельную электрическую емкость $\frac{C}{S}$ мембраны клетки, если ее толщина составляет 7,5 нм, а диэлектрическая проницаемость липидов, образующих мембрану, равна 3.

Задача 31.4. Оцените электрическую емкость клетки тела человека, если ее объем равен 10^{-15} м³.

Мембраны обладают избирательной пропускной способностью: они пропускают ионы одного вещества и не пропускают ионы другого. Так, клеточные мембраны могут пропускать ионы калия. Если их много внутри клетки, они начнут выходить из нее наружу, вынося на себе положительный заряд (рис. 8.7, а). Внутри клетки из-за ее избирательной пропускной способности ионы поступать не будут. В результате на клеточной мембране возникнет разность потенциалов: снаружи «+», а внутри «-». Эта разность потенциалов будет тормозить движение новых положительных зарядов наружу и увеличивать их поток внутрь (рис. 8.7, б).

Когда встречные потоки ионов сравняются, установится динамическое равновесие и на мембране будет поддержи-



Рис. 8.7

ваться постоянная разность потенциалов — так называемый потенциал покоя. Его можно вычислить по формуле

$$\varphi = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_{\text{в}}}{c_{\text{н}}},$$

где φ — потенциал на мембране; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; F — постоянная Фарадея; $c_{\text{в}}$ — концентрация ионов в растворе внутри клетки; $c_{\text{н}}$ — концентрация ионов в растворе вне клетки.

Поскольку все параметры, кроме c , известны, формулу можно переписать в виде $\varphi = -61 \log \frac{c_{\text{в}}}{c_{\text{н}}}$ [6, 271], где φ выражено в милливольтгах. Знак «-» для положительных ионов, «+» для отрицательных.

Задача 31.5. Вычислите потенциалы покоя для K, Na, Cl. Примите, что отношения концентраций $\frac{c_{\text{в}}}{c_{\text{н}}}$ равны 30, 0,103, 0,072 соответственно.

Задача 31.6. Вычислите напряженность электрического поля мембраны.

Задача 31.7. Сколько требуется зарядов для поддержания внутри клетки необходимого потенциала?

Оказалось, однако, что вычисленный по предложенной формуле потенциал покоя для калия несколько ниже реально регистрируемого, из-за того что мембрана пропускает немного ионов натрия. Их концентрация много выше вне клетки, чем внутри. Ионы натрия будут двигаться навстречу ионам калия. Поэтому, хотя ионы Na, как и ионы K, заряжены положительно, они создадут потенциал другого знака. В результате потенциал покоя получается немного меньше.

Задача 31.8. Проводимость мембраны для ионов K (g_{K}) примерно в 23 раза выше проводимости ионов Na (g_{Na}). Чему равен потенциал покоя?

Р е ш е н и е

Сила тока, создаваемого ионами K, $I_{\text{K}} = g_{\text{K}} (\varphi - (-80))$.

Сила тока, создаваемого ионами Na, $I_{\text{Na}} = g_{\text{Na}} (\varphi - 40)$.

При $\varphi = \varphi_{\text{пок}}$ их алгебраическая сумма равна 0:

$$23 g_{\text{Na}} (\varphi + 80) + g_{\text{Na}} (\varphi - 40) = 0,$$

откуда $\varphi = -75$ мВ.

Задача 31.9. Чему был бы равен потенциал покоя при одинаковой проводимости мембраны для ионов K и Na?

Электрические сигналы, поступившие в тело человека, распространяются вдоль аксонов — длинных выростов нервных клеток (нейронов). В состоянии покоя положительные и отрицательные заряды распределены вдоль аксонов равномерно. Воздействуя на аксон механическим, химическим или электрическим способом, его можно привести в возбужденное состояние. Эффект действия раздражителя проявляется во внезапном увеличении проницаемости мембраны для ионов Na. Поток ионов Na из межклеточного пространства перекрывает отрицательный потенциал клетки и разрушает локальный положительный потенциал. Этот положительный потенциал, который возникает в доли секунды и вырастает до 40 мВ, называется потенциалом действия. Эффект изменения мембранного потенциала (МП) называется деполяризацией. Возникнув в одной точке, МП индуцирует деполяризацию с обеих сторон возбужденной точки. Возникнувший однажды потенциал действия распространяется по аксону до тех пор, пока не поляризуется весь участок.

Задача 31.10. Почему возникает потенциал действия?

Задача 31.11. 1. При каком соотношении проницаемостей для K и Na при деполяризации на 5 мВ возникает потенциал действия, если потенциал покоя равен -75 мВ? 2. Если мембранный потенциал равен -50 мВ, но проницаемость для K в три раза больше, чем для Na. Возникнет ли потенциал действия?

Р е ш е н и е

1. Пусть $\frac{g_K}{g_{Na}} = x$. Для возникновения потенциала действия нужно, чтобы $|I_K| < |I_{Na}|$, т.е. $|xg_{Na}(-70 + 80)| < |g_{Na}(-70 - 40)|$, откуда $x < 11$. Таким образом, натриевая проницаемость должна стать не в 23, а только в 11 раз меньше калиевой.

2. Сила калиевого тока будет равна $g_K(-50 + 80) = 30 g_K$, а сила натриевого тока равна $g_{Na}(-50 - 40) = -90 g_{Na}$. Если $g_K = 3 g_{Na}$, то калиевый ток будет равен натриевому и это приведет к состоянию неустойчивого равновесия. Если МП чуть превысит это значение, то натриевый ток будет преобладать над калиевым, потенциал еще повысится, ток усилится, — это будет происходить до тех пор, пока инактивация не уменьшит натриевую проницаемость [75, 95].

Задача 32.12. Оцените число ионов натрия, которые входят в обычную клетку за время прохождения потенциала действия. В какой пропорции во время этого процесса возрастает внутриклеточная концентрация ионов натрия?

Скорость распространения потенциала действия вдоль нервных волокон зависит от диаметра и структуры волокна. Она изменяется от 0,5 до 130 м/с. Нервные импульсы распространяются не как обычные электрические сигналы. Это сложный электрохимический процесс, детали которого пока до конца не поняты [6, 274].

Задача 32.13. Оцените скорость передачи сигналов в теле человека.

Р е ш е н и е

Среднее время реакции человека составляет 0,1—0,2 с. Это время складывается из времени передачи информации от какого-либо рецептора в мозг и времени передачи командного импульса мышцам. У человека средняя длина пути, по которому идет сигнал к мозгу и обратно, составляет примерно 2 м.

$$\text{Тогда } v = \frac{l}{t} = \frac{2}{0,1} \text{ м/с} = 20 \text{ м/с.}$$

Этот результат показывает, кстати, почему было трудно бороться за существование гигантским животным нашего мира — динозаврам. Ведь при их размерах сигнал, идущий с такой скоростью, шел бы слишком долго, информация об опасности сильно запаздывала бы.

Ионный насос

Еще одним важным вопросом, требующим объяснения, является проблема ионных насосов. Она состоит в следующем.

Когда мышца сокращается, на это тратится энергия, одним из признаков чего является потребление кислорода. Но, оказывается, энергия расходуется и покоящейся мышцей для поддержания ионных концентраций или потенциалов покоя. Было установлено, что за это ответственны белковые молекулы, встроенные в клеточную мембрану. Именно они

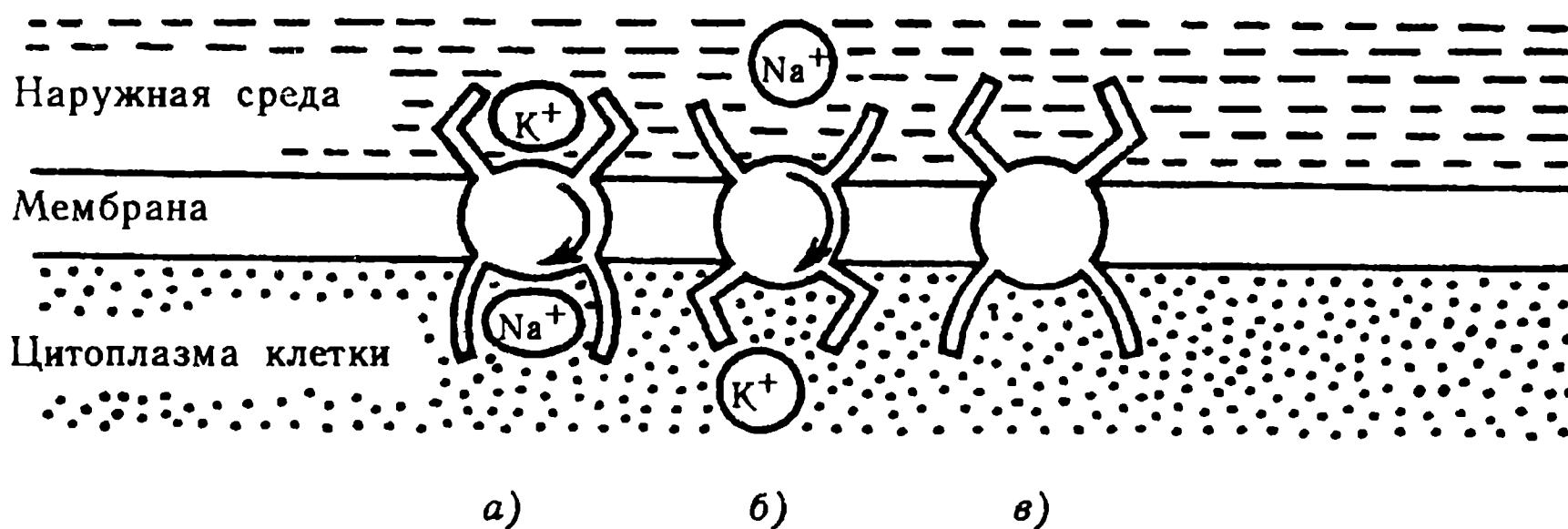


Рис. 8.8

играют роль своеобразных насосов, закачивая ионы калия внутрь клетки и выкачивая ионы натрия наружу. Схематически работа натрий-калиевого насоса показана на рисунке 8.8 (а — активные центры захватили ион калия снаружи и ион натрия внутри клетки; б — белковая молекула, захватившая ионы, повернулась на 180° за счет энергии АТФ и освободила захваченные ионы; в — молекула вернулась в исходное положение).

Ионные насосы обеспечивают самые различные функции организма: снабжение клеток пищей, поддержание белкового состава, поддержание солевого состава внутренней среды организма, регуляцию осмотических процессов.

Рассмотрим, например, работу кишечника человека. Когда пища в кишечнике разрушается пищеварительными ферментами, там возникает очень много молекул, которые могут создавать огромное осмотическое давление. В передние отделы кишечника все время поступает вода в таком количестве, чтобы поддерживать осмотическое давление, равное давлению в плазме крови. Вместе с водой в двенадцатиперстную кишку поступают ионы натрия и хлора. В тонком кишечнике натрий вместе с молекулами сахаров и аминокислот захватывается молекулами-переносчиками. Это создает разность потенциалов на эпителии тонкого кишечника, под действием которой ионы хлора приходят в движение. В результате в кровь возвращаются натрий и хлор, а также сахара и аминокислоты. Вслед за этими веществами по законам осмоса идет всасывание воды. За сутки из кишечника всасывается в кровь примерно 10 л воды — это больше, чем все количество крови в организме. Таким образом, кишечник работает за счет «круговорота воды», а также ионов натрия и хлора.

§ 32. Электрические свойства тела человека. Поражение электрическим током

Электрические свойства тела человека

Электропроводность — один из параметров, характеризующих жизненную деятельность живого существа. Известно, что с возникновением живого организма любого вида начинаются биоэлектрические явления, которые прекращаются при гибели живого существа. Человек при этом не является исключением.

Тело человека представляет собой по своим электрофизическим свойствам соленый раствор (раствор электролита). Разные ткани тела человека характеризуются разной концентрацией раствора электролита и разным его составом, вследствие чего различаются по своим диэлектрическим свойствам (см. табл. 8.2).

Как любой проводник тело человека можно охарактеризовать его электрической емкостью. Приблизительно емкость любого проводника может быть рассчитана как емкость шара, имеющего такую же площадь поверхности.

Задача 32.1. Какова приблизительно емкость тела человека? Примите, что площадь поверхности тела человека равна площади поверхности шара диаметром 1 м.

Поскольку внутриклеточная жидкость содержит ионы и хорошо проводит электрический ток, внутренние ткани тела человека обладают довольно низким сопротивлением. В целом же сравнительно высокое сопротивление тела человека электрическому току определяется в основном сопротивлением поверхностных слоев кожи (эпидермиса). Проводимость кожи в значительной степени зависит от ее состояния и осуществляется через потовые и сальные железы. Внутри тела человека ток разветвляется и проходит преимущественно вдоль протоков тканевых жидкостей (кровеносных сосудов, нервных стволов, лимфатических узлов и т.д.). Значения сопротивлений разных тканей тела человека приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2

**Электрические характеристики тканей
тела человека**

Вид ткани	Удельное сопротивление ρ , Ом · м	Диэлектрическая проницаемость ϵ
Мышцы	1,5	—
Кровь	1,8	85,5
Эпидермис (сухой)	$3,3 \cdot 10^5$	40—50
Кость (без надкостницы)	10^6	6—10

Общее сопротивление тела человека постоянному току (от конца одной руки до конца другой) при сухой неповрежденной коже рук составляет 10^4 — 10^6 Ом. Влажная кожа может уменьшить сопротивление тела до 10^3 Ом и ниже [2*, 285].

Задача 32.2. Почему опасно работать с электрическим током при повышенной влажности воздуха?

Р е ш е н и е

Ток, проходящий при случайном касании рукой через тело человека, $I = \frac{U}{R} = \frac{220}{10^5} \text{ А} = 0,0022 \text{ А}$.

Ток, проходящий через тело человека при касании влажной рукой, $I = \frac{U}{R} = \frac{220}{1000} \text{ А} = 0,22 \text{ А}$.

А такая сила тока может оказаться смертельной.

По отношению к переменному току человеческое тело можно рассматривать как параллельно соединенные резистор и конденсатор. Постоянный ток идет только через резистор, и, если активное сопротивление тела большое, сила тока будет невелика. Переменный ток идет и через резистор, и через конденсатор. Так как резистор и конденсатор включены параллельно, их полное сопротивление меньше чисто активного сопротивления и сила тока при данном напряжении должна быть больше, чем в случае постоянного тока.

Задача 32.3. Чему равно полное сопротивление тела человека при протекании через его тело тока промышленной частоты при напряжении 12 В? Во сколько раз сопротивление человеческого тела переменному току в этом случае будет меньше его сопротивления постоянному току?

Задача 32.4. Ток 70 мА частотой 60 Гц, протекающий через тело человека в течение 1 с, при напряжении 120 В может оказаться смертельным. Каким должно быть полное сопротивление человеческого тела, чтобы ток достиг этого значения?

Сопротивление человеческого тела току различно для разных индивидуумов. Оно также зависит от состояния здоровья человека. Определенно известно, что наличие алкоголя в крови заметно уменьшает сопротивление человеческого тела.

Встречаются люди с уникальными электрическими характеристиками. Например, электрик из болгарского города Габрово Г.Иванов обладает электрическим сопротивлением, в 8 раз более высоким, чем у обычных людей. Он может работать с электрическими цепями, находящимися под напряжением 380 В, без защитных средств и не отключая питания. (Для обычного человека напряжение 380 В смертельно.) [65, 262].

Определению сопротивления тканей тела человека току (постоянному и переменному) может быть посвящена специальная лабораторная работа (см. Приложение).

Поражение электрическим током

Поражение электрическим током опасно для здоровья и даже жизни человека. Тяжесть поражения зависит от силы тока, продолжительности его действия и от того, по какому пути протекает ток в теле человека. Особенно чувствительны к действию тока мозг и сердце, так как возможны нарушения их деятельности.

Большинство людей реагируют на силу тока 10^{-3} А.

Задача 32.5. Электричество можно попробовать «на вкус», коснувшись языком клемм батарейки на 1,5 В. Какой ток будет проходить при этом через вас? Почему это происходит?

Упомянем об одной возможности использовать свойство слюны человека проводить электрический ток. Изготовленные из разных металлов коронки зубов человека могут сыграть роль электродов гальванического элемента, слюна — роль электролита. Такой необычный источник тока может питать микроприемник радиоволн, вмонтированный в дупло зуба. Преимущество такого устройства — оно всегда будет с вами.

Сила тока в несколько миллиампер вызывает болевые ощущения, но редко бывает опасна для здоровья.

Задача 32.6. Приняв сопротивление тела человека равным 36 000 Ом, вычислите силу тока через тело человека, случайно прикоснувшегося руками к осветительным проводам, находящимся под напряжением 220 В.

При силе тока больше 10 мА происходит резкое сокращение мышц, и человек может оказаться не в состоянии освободиться от источника тока (например, неисправного прибора или провода). В этом случае возможна остановка дыхания; сделанное своевременно искусственное дыхание может вернуть человека к жизни.

Если ток свыше 70 мА проходит в области сердца, сердечная мышца начинает беспорядочно сокращаться, нарушается нормальное кровообращение. Это явление называется фибрилляцией сердца; вовремя не прекращенная фибрилляция приводит к смерти. Начавшуюся фибрилляцию очень трудно остановить. Однако иногда значительно бóльшая сила тока (порядка 1 А) к смертельному исходу не приводит. (По-видимому, при поражении сильным током происходит полная остановка сердца; после прекращения действия тока нормальная деятельность сердца возобновляется.)

Задача 32.7. Устройство для фибрилляции при разрядке конденсатора от напряжения 500 В создает в области сердца шок. Сопротивление тела между электродами прибора равно 500 Ом. Какой будет сила тока в начале разрядки конденсатора? Через 6 мс напряжение на конденсаторе

падает до 250 В. Сколько энергии высвобождается при этом? Какова емкость устройства?

При еще большей силе тока (100 мА и более) происходит паралич органов дыхания и наступает мгновенная смерть. Нарушение электропроводимости центральной нервной системы, управляющей основными, жизненно необходимыми функциями человека, происходящее при этом, объясняется следующим образом. При очень низкой энергии связи между электроном и ядром в сложных полимерных органических молекулах ток порядка 10^6 А, проходящий через тело человека при электротравме, выделяет энергию, на несколько порядков превышающую ту, что необходима для разрушения межмолекулярных связей.

Задача 32.8. Оцените силу тока, при которой произойдут необратимые процессы разрушения внутренних электрических цепей организма.

Все рассмотренные выше случаи протекания тока через тело человека осуществлялись по пути рука—рука или нога—рука. Это очень важно, так как любой другой путь для тока чреват более страшными исходами даже при более низких токах и напряжениях. Сейчас уже не подлежит сомнению существование на теле человека областей, наиболее уязвимых к току. К ним относятся тыльная сторона кисти, шея, висок, плечо, спина. При прохождении тока через эти участки тела человека смерть наступает от нарушения мозгового кровообращения.

Одной из опасных разновидностей электротравм является поражение так называемым шаговым напряжением, которое возникает в зоне оборвавшегося провода линий электропе-

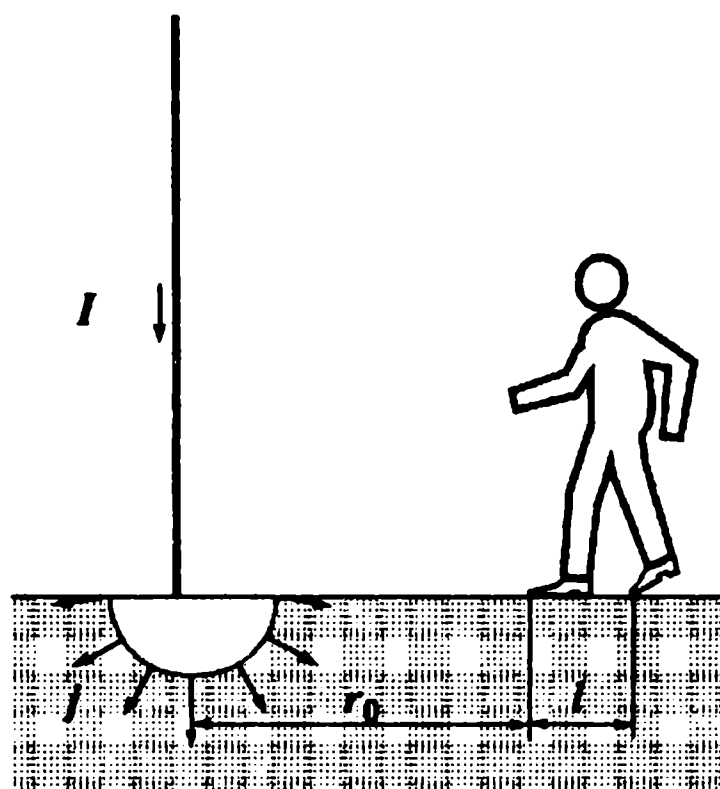


Рис. 8.9

редач высокого напряжения, и может действовать на расстояниях сотен метров от упавшего провода. Шаговое напряжение относительно Земли составляет 50 кВ и более.

Задача 32.9. Провод высоковольтной линии после аварии одним концом упал на землю (рис. 8.9). Найдите напряжение шага, если удельная проводимость составляет 10^{-2} См/м, сила тока равна 1 А, $r_0 = 2$ м, $l = 1$ м.

Считается, что электротравмы со смертельным исходом составляют 10—15% от общего количества травм с тяжким исходом. Общее количество погибших от электрического тока в год в среднем оценивается в 22—25 тыс. человек. Это число, конечно, существенно меньше числа людей, погибающих в автокатастрофах за то же время. Но все же оно велико, и, чтобы предохраниться от поражения электрическим током, надо знать, какую опасность он представляет, а также выполнять в общем-то несложные правила безопасности.

Глава 9 МАГНЕТИЗМ

§ 33. Магнитные поля в природе

Магнитное поле Земли В первом приближении магнитное поле Земли подобно полю гигантского магнитного диполя, расположенного в центральной части земного шара. Ось магнита не совпадает с осью вращения Земли: она наклонена к последней на 11° . Вследствие этого Южный магнитный полюс расположен на севере Канады на острове Элсмир (81° с. ш. и $84,7^\circ$ з. д.), а Северный — на Земле Уилкса в Антарктиде (75° ю. ш. и $120,4^\circ$ в. д.) (рис. 9.1).

Магнитный момент диполя, моделирующего поле Земли, равен $1,5 \cdot 10^{16}$ А·м, ось диполя отстоит от центра Земли на 451 км в направлении Тихого океана.

Линии индукции магнитного поля Земли выходят из Северного магнитного полюса и входят в Южный. Угол между направлением магнитной стрелки и истинным направлением

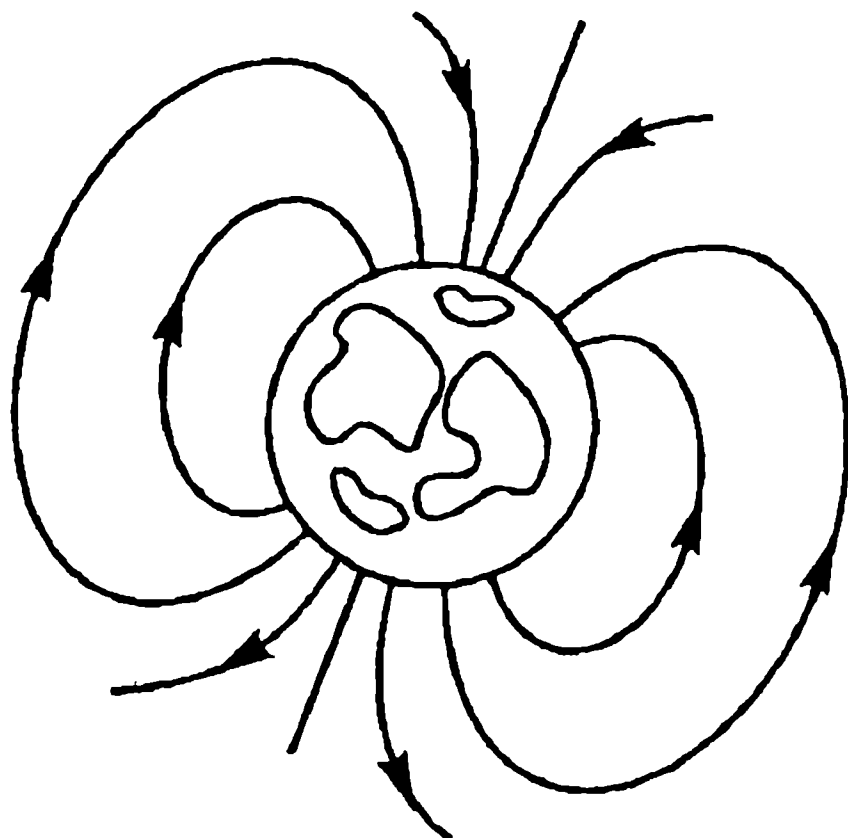


Рис. 9.1

на север называется магнитным склонением. Для Москвы магнитное склонение составляет $6,5^\circ$.

Напряженность магнитного поля Земли сравнительно невелика: на магнитных полюсах она больше и равна $47,7—55,7$ А/м, на магнитном экваторе — $23,9—34,8$ А/м.

Природа земного магнетизма объясняется при помощи динамоэффекта. Из анализа распространения сейсмических волн в недрах Земли следует, что ее ядро состоит из двух частей — зон. Внешняя зона находится в жидком состоянии и обладает электропроводностью. Внутренняя зона является твердой. При вращении Земли вокруг собственной оси жидкий слой внешней зоны позволяет мантии и твердой коре вращаться быстрее внутреннего ядра. В результате электроны в ядре движутся быстрее электронов в мантии и коре. Это движение электронов образует природное динамо, которое создает магнитное поле, аналогичное полю катушки индуктивности.

Задача 33.1. В каком направлении должны двигаться электроны в расплавленных недрах Земли для правильной полярности геомагнитного поля?

Задача 33.2. Магнитное поле Земли представляет собой магнитное поле диполя. Предположим, что оно создается кольцевым током, текущим в плоскости экватора на расстоянии 5000 км от центра Земли. Какова сила этого тока, если вблизи магнитного полюса $B = 10^{-4}$ Тл?

Задача 33.3. Индукция магнитного поля Земли у ее поверхности равна приблизительно $5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Чему равна индукция на высоте $13\,000$ км от поверхности Земли?

Задача 33.4. Чему равна плотность энергии магнитного поля Земли, если магнитная индукция равна 10^{-4} Тл? Сколько магнитной энергии запасено вблизи поверхности Земли в области площадью $S = 1$ км², простирающейся на высоту 10 км? Сравните ее с запасом энергии в 1 л бензина.

Задача 33.5. Считая среднюю магнитную индукцию магнитного поля Земли равной $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, определите энергию поля, которой обладает шаровой слой от поверхности Земли до высоты 10 км.

Магнитное поле Земли непостоянно во времени. Примерно каждые 200 тыс. лет у него меняется направление магнитной индукции на 180° : Северный магнитный полюс становится Южным и наоборот. Кроме того, магнитное поле Земли испытывает кратковременные возмущения — магнитные вариации и магнитные бури. Магнитные вариации — непрерывные изменения во времени магнитного поля Земли, вызванные циклическим изменением солнечной активности, орбитального и вращательного движения Зем-

ли, процессами в ее недрах. Магнитные бури обусловлены воздействием на поле планеты усиленных потоков солнечной плазмы.

До 1958 г. считалось, что магнитное поле Земли имеет вид, представленный на рисунке 9.1: оно распространяется во все окружающее Землю пространство и исчезает на бесконечно большом расстоянии от планеты. Однако полеты спутников и космических ракет показали, что это не так. Оказалось, что геомагнитное поле имеет сложную форму. За ее изменение ответственны несколько факторов: солнечный ветер, токи, циркулирующие в атмосфере Земли, и изменения межпланетного магнитного поля.

Объем пространства, занятого геомагнитным полем, называется магнитосферой планеты. Более близкая к действительности картина линий индукции магнитного поля Земли изображена на рисунке 9.2.

Из рисунка видно, что сторона магнитосферы, обращенная к Солнцу, простирается всего лишь на 6—8 радиусов Земли, поскольку подвергается непрерывному «обжимающему» воздействию солнечного ветра. С противоположной — ночной — стороны магнитосфера простирается примерно на расстояния до 1000 радиусов планеты, где перемешивается с межпланетным магнитным полем. В области магнитных полюсов Земли образуются нейтральные точки, вокруг которых существуют воронкообразные области слабого магнитного поля — полярные каспы.

Магнитное поле Земли, как гигантская ловушка, удерживает в ближайшем от планеты космическом пространстве огромные потоки заряженных частиц, пришедших от Солнца

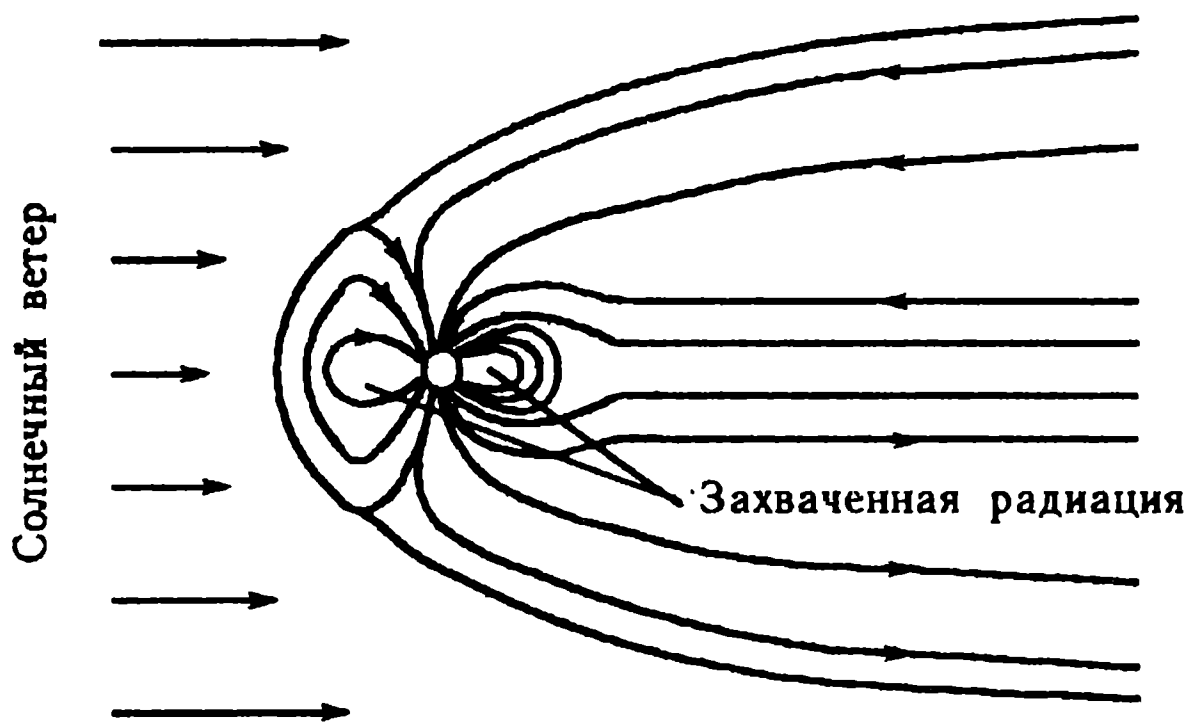


Рис. 9.2

или даже из далекого космоса. Эти частицы могут просачиваться внутрь магнитосферы, образуя так называемые радиационные пояса. Чем больше энергия частиц, тем далее в глубь магнитосферы они проникают. Частицы в магнитосфере участвуют в сложном движении. Во-первых, они вращаются вокруг линий индукции. Если при этом вектор скорости частицы перпендикулярен вектору магнитной индукции, то частица, как бы навиваясь на линию индукции, движется к одному из полюсов. Там она отражается от области сгущения линий индукции — магнитной пробки и начинает двигаться в противоположном направлении (рис. 9.3). Захваченные в такие ловушки частицы могут находиться там очень долго.

Во-вторых, частицы движутся в радиационном поясе — перемещаются или дрейфуют вокруг земного шара (положительно заряженные частицы дрейфуют на восток, а отрицательно заряженные — на запад). В результате в плазме магнитосферы возникает ток, который оказывает влияние на магнитное поле Земли.

Задача 33.6. Почему заряженные частицы, приходящие из космоса, чаще достигают поверхности Земли вблизи полюсов, чем в более низких широтах?

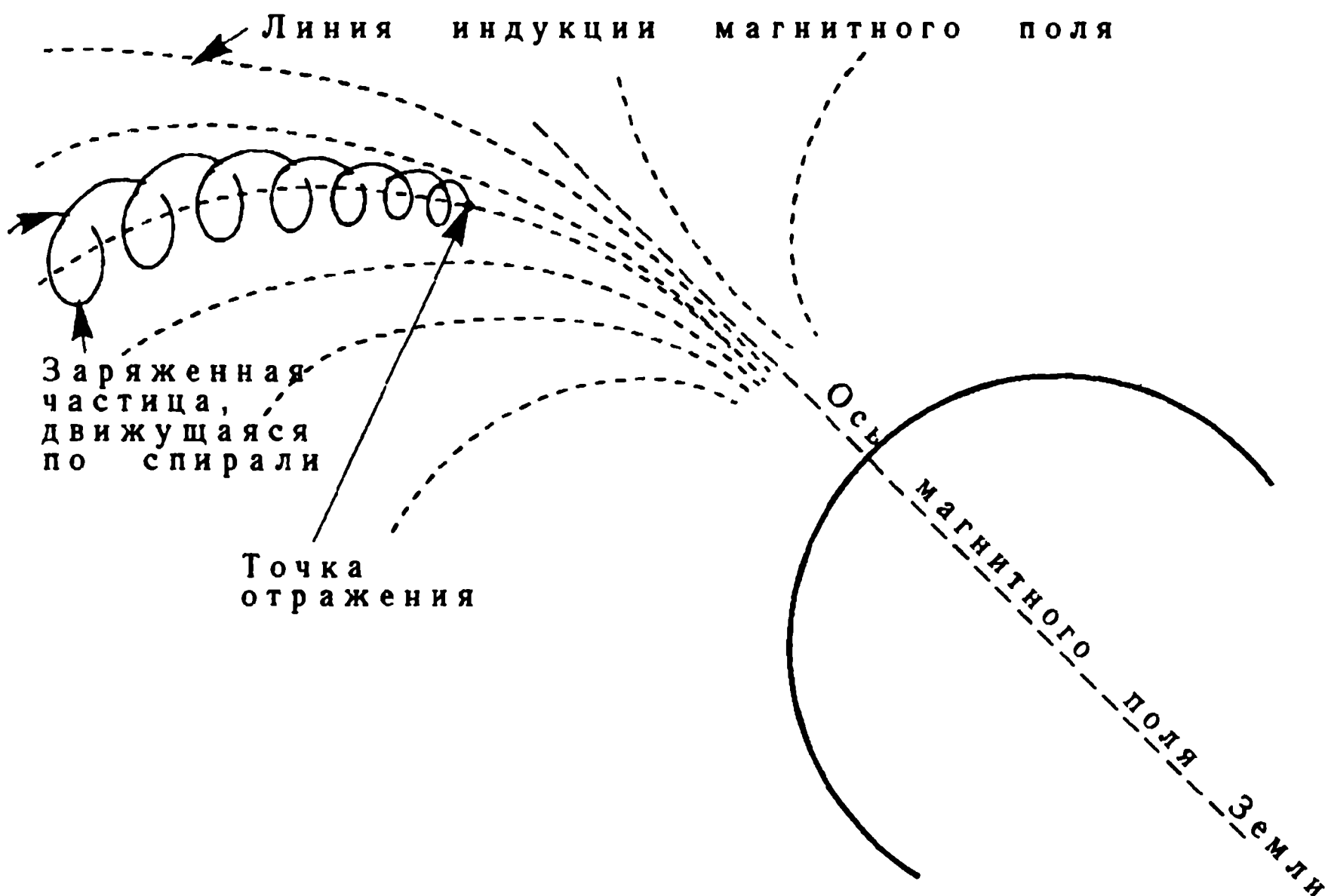


Рис. 9.3

Задача 33.7. Заряженная космическая частица (протон) захвачена магнитным полем Земли и вращается вокруг планеты в плоскости экватора по окружности радиусом 6700 км. Индукция магнитного поля Земли на траектории частицы известна. Найдите энергию этой частицы.

Задача 33.8. На большой высоте в атмосфере Земли двухзарядные ионы гелия с концентрацией $2,3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ движутся на восток со скоростью $2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, а ионы кислорода с концентрацией $8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ — к западу со скоростью $8,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Определите модуль и направление плотности тока \vec{j} .

Измерению магнитного поля Земли можно посвятить специальную лабораторную работу (см. Приложение). Она может быть проведена по традиционному методу с применением тангенс-гальванометра или по инструкции, приведенной в книге О.Ф.Кабардина, С.И.Кабардиной и Н.И.Шефера «Факультативный курс физики. 10 класс».

Задача 33.9. Как можно измерить индукцию магнитного поля Земли?

Задача 33.10. Можно ли обнаружить магнитное поле Земли, переворачивая большую катушку? Какая ЭДС будет индуцироваться при переворачивании рамки из 10 витков размером $1 \times 1 \text{ м}$?

Задача 33.11. Как можно было бы измерить магнитный дипольный момент Земли?

Магнитные поля космических объектов Астрофизические исследования, особенно осуществленные с помощью космических аппаратов, показали, что почти у всех планет Солнечной системы, кроме Венеры и Луны, имеются сильные магнитные поля. Значения индукций магнитных полей планет приведены в таблице 9.1

Таблица 9.1

Магнитные поля космических объектов

Космический объект	Индукция магнитного поля, Тл	Космический объект	Индукция магнитного поля, Тл
Луна	0	Юпитер	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Меркурий	$6 \cdot 10^{-8}$	Сатурн	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Венера	0	Галактика	10^{-10}
Марс	$6 \cdot 10^{-8}$		

С помощью других исследований было установлено наличие магнитных полей у многих звезд. Причем значения магнитных индукций этих полей меняются от 0,1 Тл у красных гигантов и нескольких тесла у так называемых магнитных звезд до нескольких сотен тесла у белых карликов и тысяч тесла у пульсаров. По-видимому, магнетизм не просто распространен в мире звезд, но является неизменным атрибутом почти всех звезд. Магнитные поля звезд образуются во время их аккреции из межзвездного газа. При этом слабое поле межзвездной среды, усиливаясь, может становиться достаточно большим.

Задача 33.12. Откуда у пульсара такое большое магнитное поле?

Р е ш е н и е

Вспомним, что пульсар — звезда, пережившая гравитационный коллапс. В задаче 19.25 было показано, что в результате коллапса радиус звезды может уменьшиться в 10^5 раз. Вследствие «вмороженности» магнитного поля звезды последнее должно измениться следующим образом:

$$r_1^2 B_1 \approx r_2^2 B_2,$$

откуда

$$B_2 = \frac{r_1}{r_2} B_1 = (10^5)^2 B_1; \quad B_2 = 10^{10} B_1.$$

При $B_1 \approx 0,01$ Тл (поле обычной, немагнитной звезды) $B_2 = 10^8$ Тл.

Задача 33.13. Индукция магнитного поля пульсара составляет 10^9 Тл. Чему равна плотность энергии этого магнитного поля.

«Вмороженностью» магнитного поля в идеальную проводящую среду — плазму объясняются многие явления, касающиеся внутреннего строения астрофизических объектов: спиральность рукавов галактик, волокнистая структура облаков межзвездного газа. Магнитному полю отводится решающая роль в процессе образования не только звезд, галактик, но и всей крупномасштабной структуры Вселенной. Его действием объясняют особые виды космических излучений — магнитотормозное и синхротронное.

Задача 33.14. Оцените радиус кривизны траектории, описываемой в галактическом магнитном поле протоном с энергией 100 эВ.

Сейчас известна индукция магнитного поля Галактики. В окрестностях Солнца магнитная индукция по модулю со-

ставляет примерно 0,21 нТл и ориентирована примерно вдоль спиральных рукавов нашей звездной системы.

Задача 33.15. Чему равна плотность энергии магнитного поля Галактики?

Задача 33.16. В межзвездном пространстве нашей Галактики индукция магнитного поля составляет 10^{-10} Тл. Вещество в этом пространстве состоит из атомов водорода (приблизительно 1 атом на 1 см^3), движущихся с тепловыми скоростями (10^5 м/с). Каково соотношение между энергией, запасенной в данном объеме магнитного поля, и кинетической энергией атомов в нем?

Магнитное поле Солнца

В начале нашего века было обнаружено магнитное поле Солнца. Оказалось, что оно невелико и в околополярных областях имеет близкий к дипольному характер. Сильные поля имеются лишь в активных областях на Солнце — так называемых солнечных пятнах. Образование солнечных пятен связывают с выходом внутреннего магнитного поля светила на его поверхность. Индукция магнитного поля в солнечных пятнах и окружающих их факельных полях составляет соответственно десятые и сотые доли тесла. Само название активных областей — пятна обусловлено их более темным цветом, чем остальная поверхность звезды. За это тоже несет ответственность магнитное поле. Поле в области пятна препятствует конвекции, т.е. переносу более горячего вещества из более низких слоев Солнца. В результате в эту область поступает меньше энергии и она меньше нагревается. Схема основных структур магнитного поля Солнца показана на рисунке 9.4.

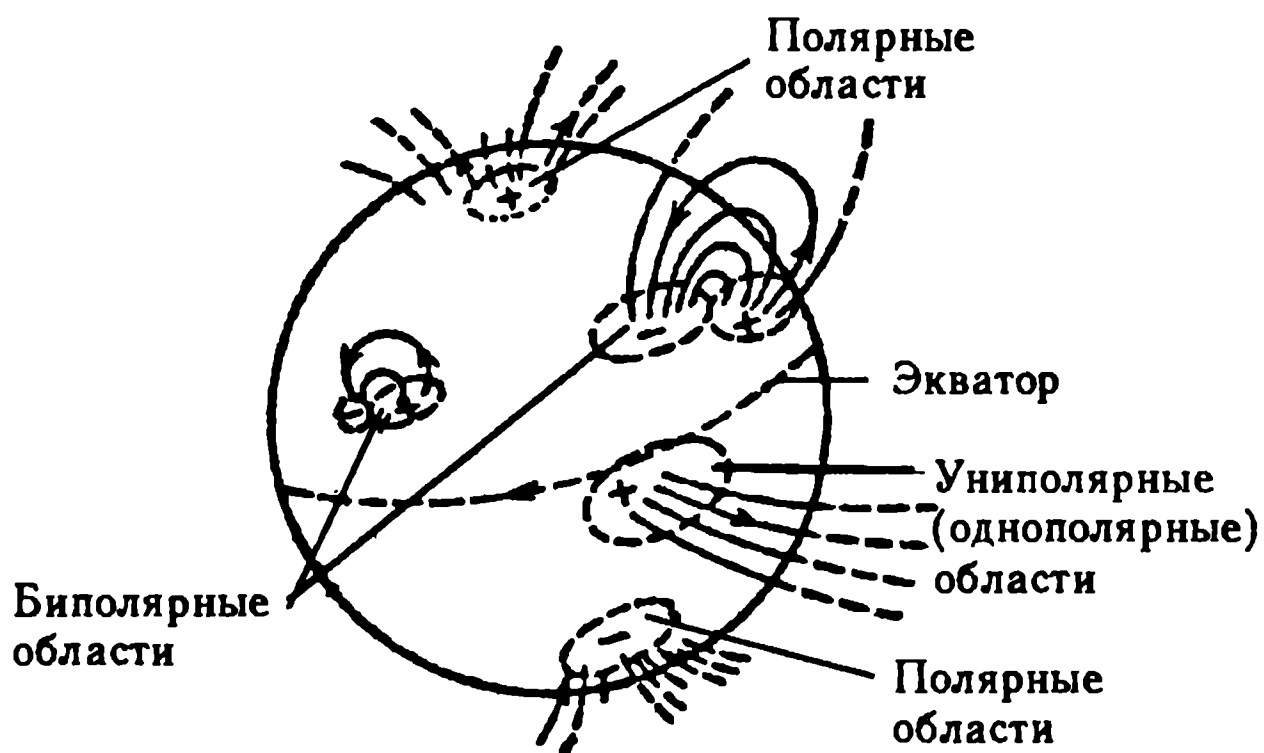


Рис. 9.4

Время существования пятен — несколько недель. Количество пятен, их положение и полярность на диске Солнца изменяются с периодом 11,2 года — периодом солнечной активности.

Экстремальным проявлением активности Солнца являются хромосферные вспышки, возникающие в результате быстрой перестройки магнитных полей, связанной с их перезамыканием в верхней хромосфере или короне Солнца. При этом за короткое время (несколько минут) выделяется от 10^{21} до 10^{25} Дж энергии. Солнечная вспышка проявляется в увеличении свечения в видимом диапазоне. Иногда она сопровождается рентгеновским, гамма- и радиоизлучениями. Многие вспышки порождают потоки быстрых заряженных частиц: электронов (с энергией 1—100 кэВ) и протонов (с энергией в несколько сотен мегаэлектрон-вольт).

Вырвавшиеся за пределы солнечной короны быстрые заряженные частицы создают так называемые корпускулярные потоки. Они распространяются вдоль линий индукции межпланетного магнитного поля и могут достигать магнитосферы Земли, вызывая многочисленные геомагнитные эффекты. Спектр воздействий хромосферной вспышки на Землю приведен на рисунке 9.5.

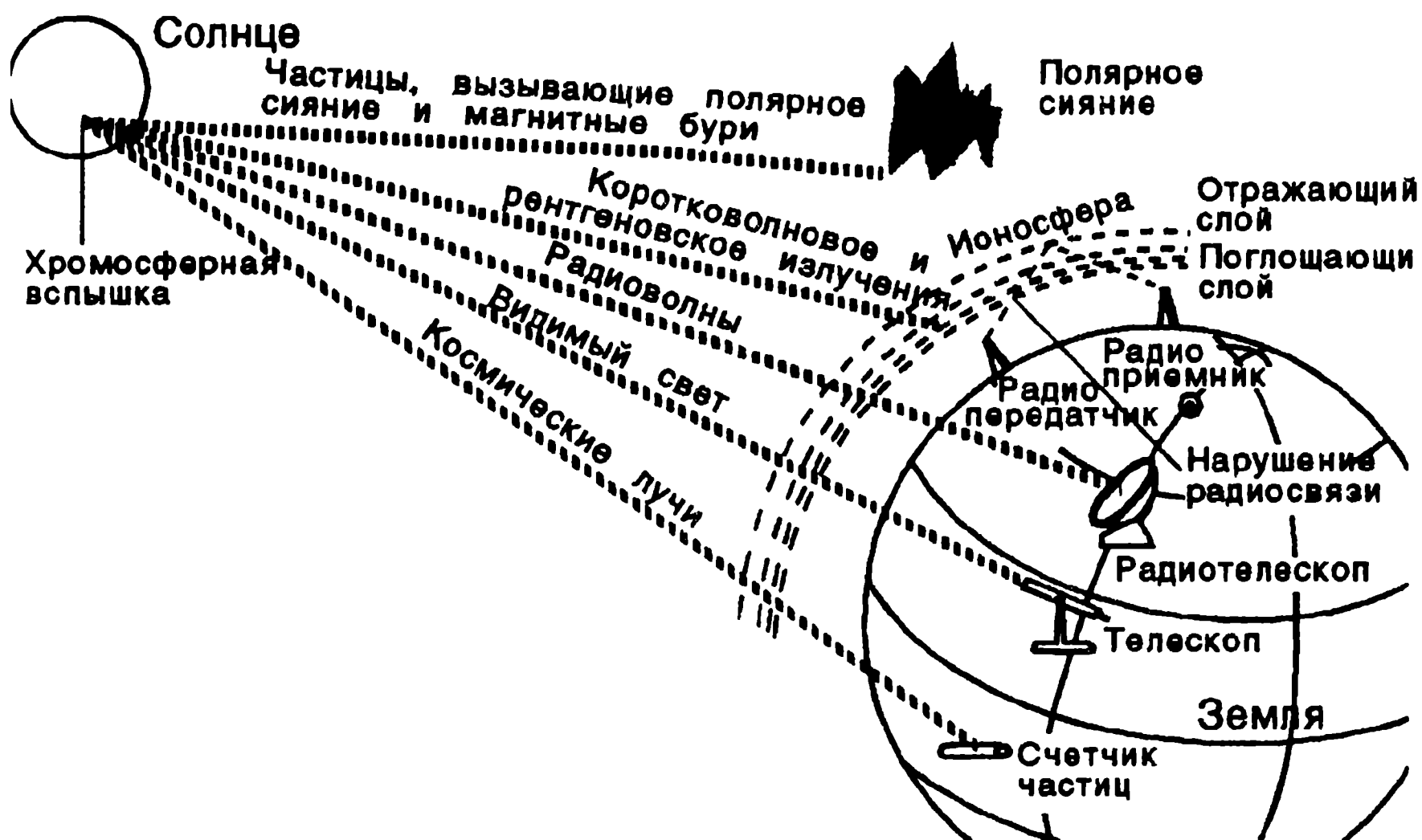


Рис.9.5

Задача 33.17. Оцените объем плазмы с «вмороженным» магнитным полем, послужившим источником протонной вспышки с энергией 10^{23} Дж. Напряженность магнитного поля $H = 2,4 \cdot 10^4$ А/м.

Задача 33.18. Оцените температуру плазмы во вспышке, если концентрация частиц в ней составляет 10^{16} м⁻³.

§ 34. Магнитное поле и живые организмы

Магнитное поле Земли служит барьером, защищающим жизнь на планете от потока космических частиц. Однако это только одна из сторон связи человек — магнитное поле. За долгие века эволюции все живое на Земле привыкло к постоянно действующему фактору — магнитному полю. Но его резкие изменения не проходят для человека бесследно.

Действительно, против воздействия механического разрушения (удара палкой) жизненно важные органы тела в той или иной степени защищены мускулатурой. Сильный ожог также не сразу приводит к тяжелому исходу. Система кровообращения, мускулы, обладающие электропроводностью, в известной степени могут шунтировать опасный ток. Проникающая радиация частично или полностью поглощается в поверхностных частях тела человека. И только магнитное поле действует на весь организм сразу в целом: организм человека «прозрачен» для магнитного поля.

Уже в начале нашего века была установлена связь между магнитными бурями — отголосками солнечных бурь — и здоровьем человека. Первым, кто заметил связь событий, протекающих на Солнце, с тем, что происходит на Земле, был русский ученый А.Л.Чижевский. Многочисленные исследования последних лет с определенностью установили наличие среди людей нескольких групп, по-разному реагирующих своими биопотенциалами на магнитные бури. К первой группе отнесли людей, которые изменением биопотенциала головного мозга реагируют на наступающую бурю за 3—4 дня; ко второй — реагирующих за сутки; к третьей — в момент самой бури; к четвертой — по прошествии 2—3 дней после бури; к пятой (10—15% наблюдаемых) — людей, на состояние биопотенциалов которых магнитная буря не влияет.

Известна статистика вызовов «скорой помощи». Она указывает на тонкую чувствительность сердечно-сосудистой системы человека к изменениям магнитного поля Земли и частотных составляющих перепада атмосферного давления.

Некоторые ученые считают, что для человека важны любые изменения магнитного поля планеты. Так, существует гипотеза американского исследователя Мак Лина, согласно которой увеличение раковых заболеваний связано с ослаблением действия магнитного поля [65, 266].

Сейчас учеными активно обсуждаются две гипотезы, объясняющие механизм воздействия магнитного поля Земли на организм человека. Одна из них связывает возмущение геомагнитного поля, обусловленное солнечными вспышками, с изменением проницаемости биологических мембран. Согласно другой гипотезе среда взаимодействует с электромагнитными полями самих биологических систем и при этом возможен резонанс, резкое усиление эффекта.

Рассмотрим, как объясняет эти процессы физика.

Один из возможных механизмов взаимодействия магнитного поля с клетками живых существ заключается в следующем. Во всяком живом организме имеются атомы с нескомпенсированными магнитными моментами. Так, в организме человека и животных находится большое количество железа (до 4—5 г). Оказалось, что способность таких атомов ориентироваться под действием внешнего магнитного поля связана с тепловым хаотическим движением этих же частиц.

Задача 34.1. Оцените индукцию магнитного поля, способного оказывать ориентирующее воздействие на магнитные моменты атомов вещества.

Р е ш е н и е

Ориентирующее действие магнитного поля на магнитные моменты атомов живых организмов можно оценить, сравнив приобретенную ими магнитную энергию с энергией теплового движения этих атомов. Так как энергия магнитного диполя в магнитном поле пропорциональна величине $\mu_B B$, где $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл — магнетон Бора — величина, характеризующая магнитные моменты атомов, то

$$B = \frac{kT}{\mu_B} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{9,27 \cdot 10^{-24}} \text{ Тл} \approx 450 \text{ Тл.}$$

Это значение превосходит индукцию земного магнитного поля. А это значит, что действие геомагнитного поля на частицы, составляющие живой организм, ничтожно.

Задача 34.2. Оцените значение магнитного момента железобактерии, у которой экспериментально установлена способность ориентироваться в магнитном поле Земли.

Р е ш е н и е

Значение магнитного момента m бактерии можно оценить из соотношения

$$m = \frac{kT}{B} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{5 \cdot 10^{-5}} \text{ Дж/Тл} = 8 \cdot 10^{-17} \text{ Дж/Тл.}$$

Полученный результат хорошо согласуется с опытом: экспериментальное значение магнитного момента железобактерии составляет $m = 1,3 \cdot 10^{-15}$ Дж/Тл.

Несмотря на довольно слабый эффект ориентирующего действия магнитного поля, именно им пытаются объяснить способность некоторых животных (и редких представителей нашего вида) ориентироваться в пространстве. В организмах дельфинов, птиц, рыб, насекомых и бактерий обнаружено сильномагнитное вещество — магнетит. Предполагают, что лежащие между мышечными волокнами частицы магнетита могут под действием магнитного поля Земли слегка поворачиваться. А поскольку мышечные волокна очень чувствительны к давлению и растяжению, можно полагать, что животные могут чувствовать изменение направления индукции магнитного поля Земли [60, 42].

А теперь рассмотрим механизм взаимодействия биотоков живых организмов с сильным статическим магнитным полем. (Влияние переменных полей, сводимое к влиянию теплового действия электромагнитного излучения, будет рассмотрено в § 38.) Известно, что на проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера, способная вызывать механическое перемещение проводника.

Задача 34.3. Оцените амплитуду пульсирующих давлений, возникающих под действием силы Ампера, на токонесущие участки живых систем.

Р е ш е н и е

Воспользуемся формулами

$$\rho = \frac{F}{S}; F = IBl; I = \frac{U}{R}; R = \frac{\rho l}{S}.$$

Амплитуда напряжений биотоков составляет величину порядка 0,1 В, удельное сопротивление $\rho = 1,5$ Ом·м; $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл; $l = 1$ см. Тогда

$$\rho = \frac{IBl}{S} = \frac{UBl}{RS} = \frac{UBl}{\rho l} = \frac{10^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{1,5} \text{ Па} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Па.}$$

Если учесть, что пороговым давлением, еще вызывающим звуковые ощущения в ухе человека, является $\rho = 10^{-5}$ Па,

то давление, обусловленное действием магнитного поля, организм должен чувствовать.

Все перечисленные механизмы взаимодействия магнитного поля Земли с живыми организмами крайне слабы. По-видимому, не лишены смысла догадки исследователей о резонансе биотоков механической системы. Только таким образом можно объяснить экспериментально установленные факты влияния поля на живое вещество.

Изучение воздействия магнитного поля на живые существа далеко еще не закончено. Остаются невыясненными многие вопросы. И главным из них является, по-видимому, следующий: случаен ли факт существования у единственной известной планеты, населенной живыми существами, сильного магнитного поля?

Глава 10

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

§ 35. Маятники

Моделирование процесса колебаний при помощи маятников — тема, традиционно обсуждаемая в курсе физики средней школы. Попробуем придать ей гуманитарную направленность.

Про математический маятник часто говорят, что он — гносеологический (т.е. познавательный) прибор. И это, действительно, так. С помощью модельного представления, которым является математический маятник, была создана вся теория колебаний. С его помощью изучались время и его изменение, сила тяжести как результат действия гравитации и т.п. Измерения, осуществлявшиеся с помощью маятника, основывались на таких его свойствах, как: 1) зависимость периода колебаний от l и g , что позволило определить абсолютное значение ускорения свободного падения; 2) изохронность, т.е. постоянство периода колебаний при малых амплитудах колебаний.

Обычно в школе при изучении колебаний выполняют работу «Математический маятник». Мы предлагаем ее чуть-чуть изменить с целью придания гуманитарной направленности. Наша лабораторная работа называется «Изготовление и проверка свойств секундного математического маятника» (см. Приложение). Мотивация ее проведения такова: мы знаем способ измерения временных интервалов без приборов с помощью пульса (см. § 3). Способ хороший, доступный, но не очень точный. Давайте рассчитаем и изготовим прибор для измерения времени, очень простой в исполнении и всегда доступный для применения, но имеющий гораздо большую точность.

Той же цели — связать изучение физики с человеком — могут послужить следующие задачи. А сочетание лабораторной работы и задач — тема для исследовательского проекта «Создаем и изучаем секундный маятник».

Задача 35.1. Часы с маятником, длина которого 100 см, отстают в течение суток на 1 ч. На сколько нужно укоротить маятник, чтобы он верно отбивал секунды?

Задача 35.2. Как, используя нить, шарик с отверстием и рулетку, оценить скорость равномерного движения пешехода?

Задача 35.3. Как можно измерить площадь стола, используя нить, шарик с отверстием и секундомер?

Задача 35.4. Каково соотношение между высотой горы и глубиной шахты, если период колебаний маятника на вершине горы и на дне шахты одинаков?

Задача 35.5. Каково должно быть различие в длинах секундных маятников на Северном полюсе и на экваторе?

Задача 35.6. На сколько будут отставать часы с секундным маятником за сутки, если их поднять на высоту 200 м над уровнем земли?

Задача 35.7. Как изменится период колебаний секундного маятника, если его перенести с поверхности Земли на поверхность Луны?

Изучению физического маятника можно посвятить лабораторную работу, выполняемую при помощи качелей (см. Приложение), и следующие задачи.

Задача 35.8. Воздушный гимнаст, раскачавшись на трапеции, покидает ее. Изменится ли при этом период колебаний трапеции?

Задача 35.9. Изменится ли период колебаний качелей, если: а) на них вместо одного человека сядут два; б) человек будет сначала качаться сидя, а потом — стоя?

Задача 35.10. Оцените частоту строевого шага (120 шагов в 1 мин).

Задача 35.11. Мальчик сидит на качелях. Какую механическую работу совершил мальчик, раскачав качели до угловой амплитуды 0,2 рад, если 20% энергии он израсходовал на преодоление силы сопротивления? Масса мальчика 40 кг, качели — легкая доска, подвешенная на двух веревках. Расстояние от точки их подвеса до центра масс мальчика 10 м. Можно ли систему мальчик—доска рассматривать как автоколебательную? Являются ли колебания установившимися, если работа мальчика за период превышает (по абсолютному значению) работу силы сопротивления?

§ 36. Биоритмы

Колебания и человек

Колебательные, или периодические, процессы играют важную роль в жизни человека.

Мы живем на поверхности планеты, чье положение относительно других членов Солнечной системы периодически изменяется за счет особого характера движения. Периодически изменяются положения любой точки на поверхности

планеты относительно Солнца вследствие вращения Земли вокруг своей оси. Сезонные изменения на планете, смена дня и ночи, пульсации электрического и магнитного полей Земли, активность Солнца, изменения климата — важнейшие факторы эволюции земной жизни. Периодичность свойственна и процессам в организме человека: вдох-выдох регулирует поступление необходимого для жизнедеятельности людей кислорода, ритмическая работа сердца обеспечивает бесперебойное снабжение тканей организма питанием и т.д. и т.п.

Циклические процессы происходят и в биосфере Земли. Из-за того что вещество биосферы ограничено, оно используется живыми существами и растениями неоднократно. Различают биохимические циклы воды, углерода, азота и других жизненно важных веществ.

Задача 36.1. По оценкам ученых, вода, участвуя в вечном природном круговороте, каждые 2 млн. лет проходит через живые организмы биосферы (см. § 27). Чему равна частота в герцах этого процесса? Сколько раз одни и те же молекулы воды в результате круговорота могли побывать в организмах живых существ?

Следующим по масштабу периодическим процессом является одиннадцатилетний цикл солнечной активности. Солнечная активность — это комплекс изменений физических параметров нашего светила. Она проявляется в появлении на его поверхности пятен, изменений магнитного поля.

Самое мощное проявление активности Солнца — это вспышки, т.е. взрывы, вызванные внезапным сжатием солнечной плазмы. Оказалось, что активность Солнца непосредственно влияет на характер многих происходящих на Земле процессов (так называемые солнечно-земные связи). И их минимумы и максимумы совпадают с периодичностью солнечной активности. Например, периодичность солнечных пятен и параллелизм числа пятен и магнитных возмущений иллюстрирует рисунок 10.1, а зависимость численности заболеваний и смертных исходов от вариаций геомагнитного поля и смертность от заболеваний в периоды магнитных бурь — рисунок 10.2, а,б.

Биосфера Земли, все ее живые организмы приспособились к вращению планеты вокруг своей оси и ее обращению вокруг Солнца. Множество самых разнообразных растений и животных точно следует циркадным (околосуточным) ритмам. Причем, как показывают эксперименты, этот ритм очень устойчив: он сохраняется у организма при попытках его изоляции от окружающей среды, при создании тех или иных помех. У выделенных из организма живых тканей —

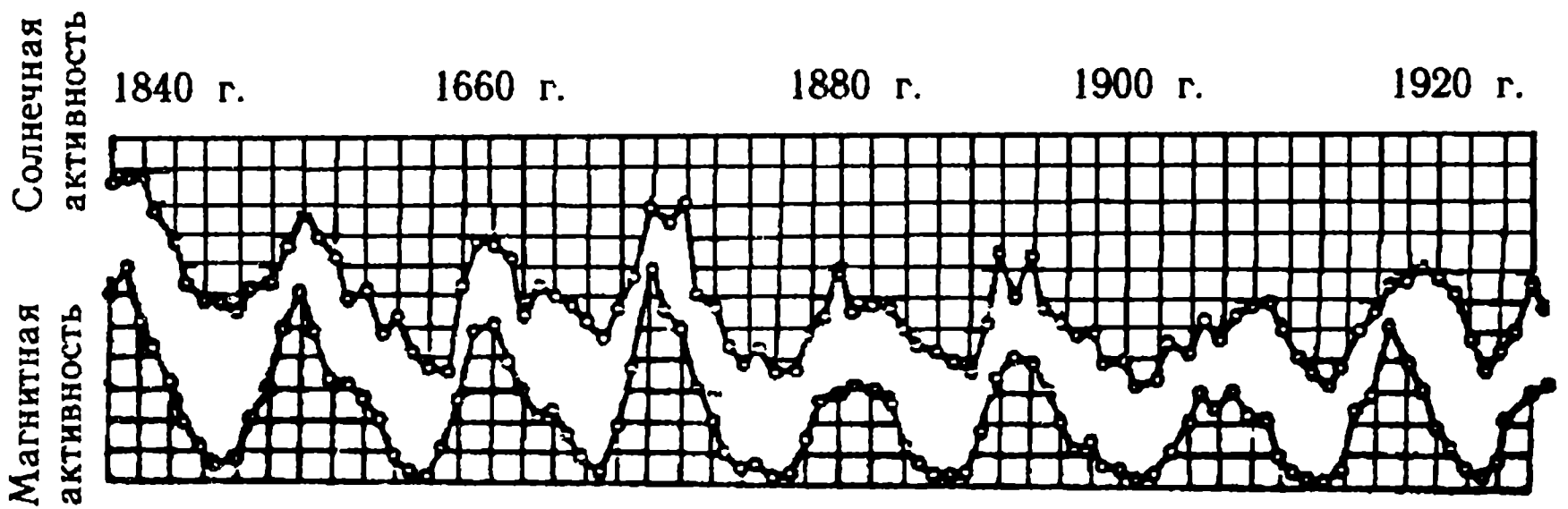


Рис. 10.1

клеток, органов — сохраняется этот ритм. Даже мембраны клеток пропускают ионы в определенном ритме, хотя в силу различия в наследственности околосуточный ритм у разных особей может чуть-чуть различаться: от 23 до 28 ч вместо 24 ч. Генетическими же свойствами определяются фазовые сдвиги колебательных процессов разных организмов.

Кроме циркадного, сейчас обнаружены и другие циклы жизнедеятельности человека: трехлетний цикл у спортсменов, семилетний цикл творческой активности у деятелей науки, искусства, литературы.

Ритмическим изменениям подвержены и другие процессы в организме человека. Например, известно существование биоритмов работы мозга: его электрическая активность может быть оценена импульсами напряжения разной частоты. На-

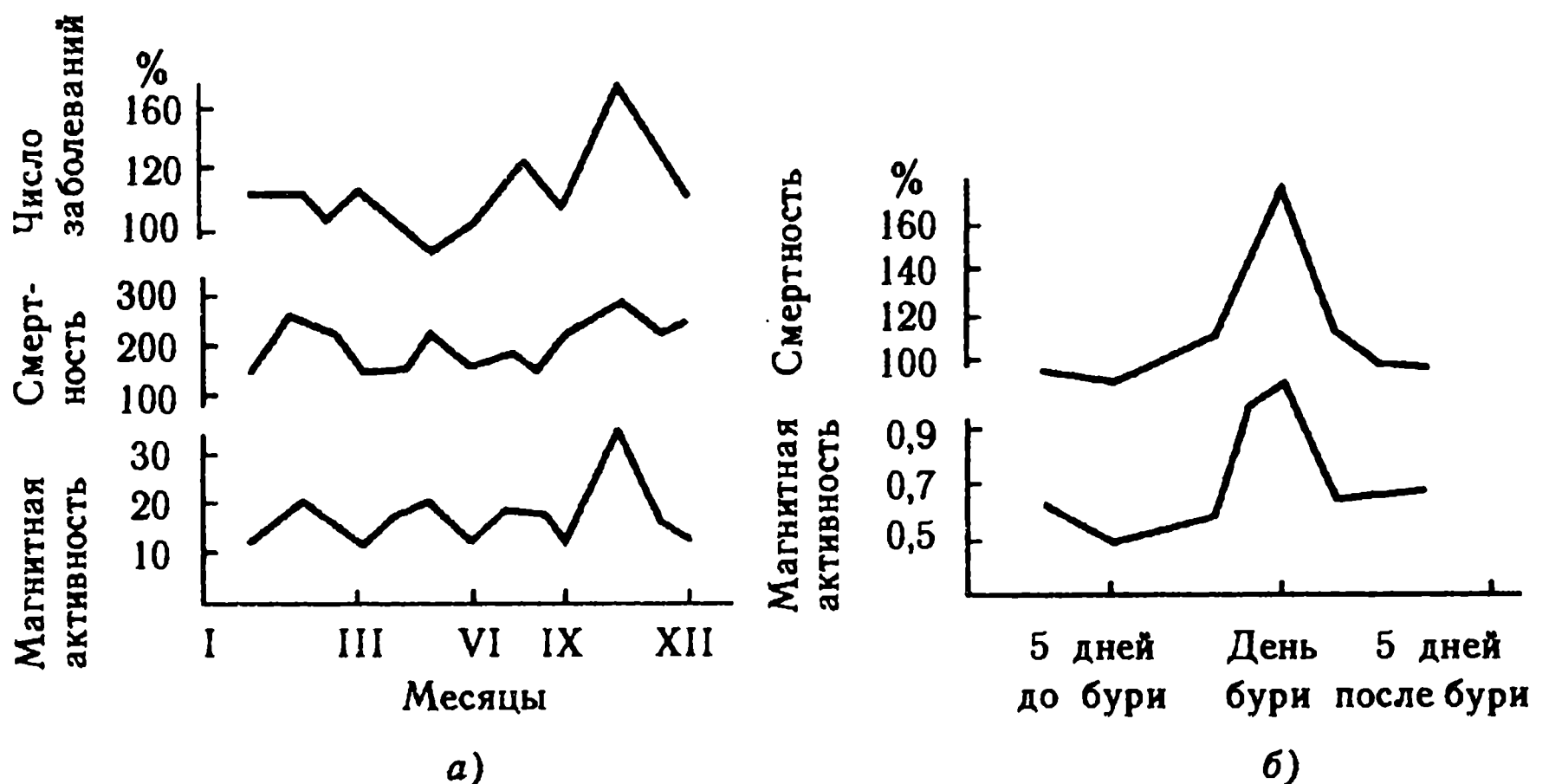


Рис. 10.2

ибо более выраженными являются альфа-, бета-, гамма-, дельта- и тета-ритмы с частотами 8—13, 14—35, 35—55, 0,5—3 и 4—7 Гц соответственно. Амплитуды этих импульсов не превышают 500 мкВ.

Задача 36.2. Чему равны периоды колебаний биоритмов мозга человека?

Происхождение биоритмов Существуют разные мнения о происхождении биоритмов. Одни ученые считают, что организм человека — некая пассивная система, воспринимающая колебательный режим внешней среды. Однако, поскольку попытки заставить людей приспособиться к 16- или 48- часовым суткам успеха не имели, можно сделать вывод, что ритм есть форма движения живой природы. Источником этого движения является борьба жизни и смерти: чтобы организм мог расти и развиваться, клетки должны делиться, а значит, и отмирать. Некоторые ученые рассматривают именно клетку в качестве генератора ритмов: накопление в ней химических веществ идет до определенного уровня, по достижении которого начинается нужная химическая реакция, т.е. происходит как бы «включение» энергетического обмена.

Из ритмов клеток складываются ритмы тканей, ритмы органов, ритмы работы организма в целом. Роль дирижера этой сложной системы играет гипоталамус. Всякое изменение, перестройка организма приводят к рассогласованию характера его ритмов и переносятся организмом болезненно. Именно ритмы являются организатором жизненной деятельности организма человека. Они необходимы, как выяснилось, для предохранения его от перегрузок, перенапряжения. Действительно, чередование подъемов и спадов, напряжения и ослабления защищает организм, предохраняет его от преждевременного износа.

Отметим следующий интересный момент. Единый математический аппарат теории колебаний, т.е. одинаковый способ описания явлений, в сущности, разной физической природы (механических, электромагнитных, гравитационных) давно служил аргументом в пользу единства процессов материального мира. Оказывается, отмеченная общность характера колебаний, описывающих живые системы, может указывать на наличие динамически связанного мироздания. Свидетельством того же служит обнаружение во многих видах колебаний, относящихся к природным объектам, всплесков примерно на одних и тех же выделенных частотах. А это позволяет говорить о наличии некоей когерентности Все-

ленной. (Здесь когерентный значит ведущий себя как единое целое.) Когерентность может быть объяснена либо как проявление дальнего действия сил, либо как реакция на некую вселенскую физическую систему времени [76, 303].

§ 37. Звук

Звук как средство восприятия и передачи информации Звуковые волны играют важную роль в жизни человека и других существ, живущих на поверхности нашей планеты. Чем определяется отдаленное природой звуку предпочтение перед волнами других диапазонов?

Несмотря на гораздо меньшую (на 5 порядков) скорость распространения и способность быстро затухать в воздухе, звук как средство восприятия и особенно передачи информации имеет ряд преимуществ по сравнению со светом. Звук хорошо распространяется в темноте, в тумане, в лесу, в горах, в воде, в земле, способен преодолевать преграды, недоступные свету. Звуковые волны требуют гораздо меньших энергетических затрат на излучение (оценка, подтверждающая это положение, приводится в задаче). Ненаправленность звуковых волн вместе со способностью к дифракции делает их незаменимым средством коммуникации при отсутствии прямой видимости. Быстрое затухание не является при этом недостатком, поскольку дальность распространения оказывается достаточной для целей коммуникации. По сравнению с упругими волнами других диапазонов звук имеет то преимущество, что его длины волн соизмеримы с размерами тела человека и окружающих его предметов. А известно, что «видеть» с помощью волн можно лишь тогда, когда длина волны не превышает размеров исследуемого объекта.

Наша планета характеризуется чрезвычайным разнообразием и изменчивостью акустического ландшафта. Одни звуки возникают в результате взаимодействия различных сил природы (движения воды, воздуха, атмосферного электричества), другие — как своеобразное проявление жизнедеятельности живых существ. Для живых существ звуковая картина мира является одним из важнейших источников информации обо всем, что происходит вокруг. Охотники по треску хрустнувшей ветки издали узнавали о приближении врага или добычи. Аборигены Австралии, прикладывая ухо к земле, получали довольно точную информацию о передвижении в округе людей и животных. А «язык» тамтамов задолго до изобретения радио и телевидения играл роль

средства массовой информации в джунглях Тропической Африки.

В процессе эволюции у животных выработалась способность воспринимать звуки как сигналы о процессах, происходящих в окружающей среде, как средство ориентации и приспособления к ее изменениям, как необходимое условие жизнедеятельности. Слух и артикуляционная деятельность играют в жизнедеятельности человека второстепенную по сравнению со зрением роль. Однако одновременное существование и слухового, и зрительного каналов восприятия у живых существ значительно повышает надежность и точность передачи и приема информации об окружающей среде.

Орган слуха

Функцию улавливания звука принял на себя специальный орган — орган слуха.

Ухо — орган слуха человека — имеет сложное строение (рис. 10.3). Оно состоит из наружного, среднего и внутреннего уха. К наружному уху относятся ушная раковина и слуховой проход 1. Ушная раковина — рупорообразная воронка, выполняющая две функции: улавливания и концентрации звуковых волн и защиты. В последнее время узнали об одном интересном свойстве ушной раковины: согласно представлениям древней китайской медицины ее можно рассматривать

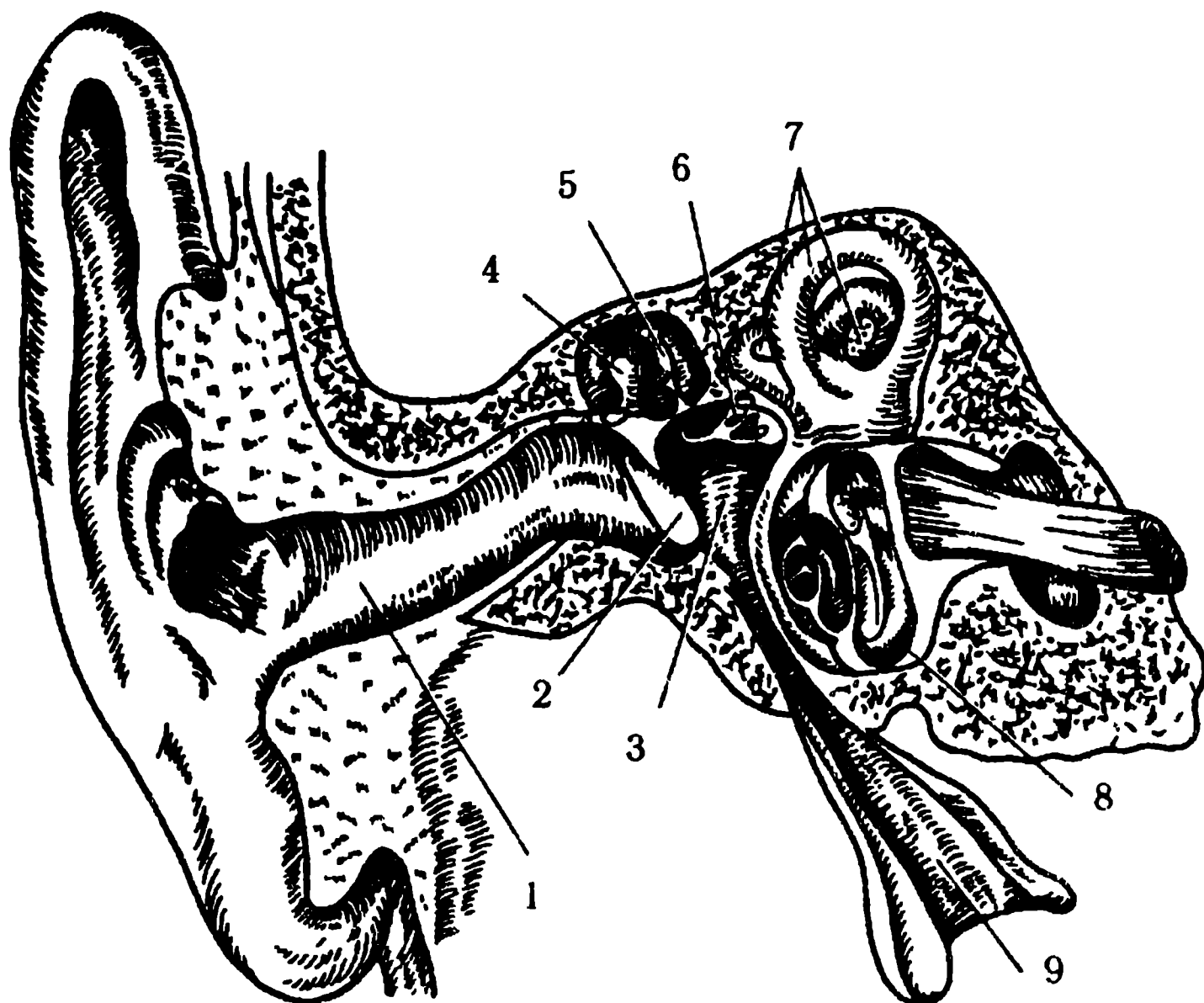


Рис. 10.3

как перевернутое изображение эмбриона человека в утробе матери. При этом на ушной раковине можно обнаружить изображения (проекции) всех органов тела человека, в связи с чем разработана методика лечения больных путем иглоукалывания биологически активных точек на ушной раковине, соответствующих проекции больного органа. При этом был обнаружен очень любопытный факт: активных точек на поверхности ушной раковины оказалось 100, в то время как на всем теле человека их 700. Объяснение этому факту может быть дано через установление связи точек на ушной раковине с определенными центрами головного мозга.

Слуховой проход соединяет ушную раковину со средним ухом 3, которое представляет собой замкнутую полость объемом около 1 см^3 , расположенную в толще височной кости черепа человека. От слухового прохода ее отделяет барабанная перепонка 2 — тонкое, гибкое, но в то же время достаточно прочное образование. Звуковые волны вызывают колебания этой туго, как кожа барабана, натянутой перепонки. В то же время она служит препятствием для попадания внутрь уха пылевых частиц, воды, микроорганизмов. Находящаяся за барабанной перепонкой полость содержит самые маленькие в организме человека косточки: молоточек 4, наковаленку 5 и стремечко 6. К этим косточкам присоединяются две самые маленькие в организме человека мышцы: стремянная и мышца, натягивающая барабанную перепонку.

Среднее ухо играет роль резонатора: звук, проходя его, многократно усиливается (в целом в 40 раз). Это объясняется действием двух физических законов: рычага и сохранения энергии. Рычаг с выигрышем в силе в 2 раза создают косточки внутреннего уха. Энергия звуковой волны, проходящей через систему внутреннего уха, остается постоянной, но, поскольку выход из среднего уха (так называемое овальное окно) имеет площадь, в 20 раз меньшую площади барабанной перепонки, интенсивность звука на выходе в 20 раз больше, чем на входе.

Внутреннее ухо состоит из евстафиевой трубы 9 и лабиринта. Евстафиева труба служит для выравнивания давления в барабанной полости с наружным атмосферным. В нормальном состоянии она находится в опавшем положении и открывается только при глотании. Лабиринт представляет собой большое количество запутанных, извивающихся перепончатых канальцев, заполненных особого рода жидкостью. В лабиринте различают три основные части: улитку 8, полукружные канальцы 7 и преддверие лабиринта. Улитка

содержит кортиева орган, непосредственно отвечающий за восприятие звука.

В целом человеческое ухо работает следующим образом. Звуковая волна колеблет барабанную перепонку, эти колебания через маленькие косточки передаются на вход в лабиринт. Стремечко, колеблющееся взад и вперед, действует как поршень и начинает раскачивать жидкость в лабиринте. Эти колебания и воспринимаются рецепторами кортиева органа.

Качества уха как звукоулавливающего прибора — благодарная тема для обсуждения на уроках физики. Как известно, звук характеризуется частотой, интенсивностью и спектральным составом. Но физические объективные качества звука, воздействуя на акустический анализатор человека — ухо, вызывают в нем физиологические ощущения высоты, громкости и тембра звука.

Диапазон частот, воспринимаемых органом слуха человека, составляет 16—20 000 Гц. Сам факт выделения из достаточно большого диапазона упругих волн в воздухе набора частот, называемых звуковыми, связан со свойством слуха человека воспринимать именно эти волны. Диаграмма, изображенная на рисунке 10.4, позволяет сравнить границы восприятия звука человеком и другими живыми существами.

Задача 37.1. Самые низкие и высокие частоты, воспринимаемые человеческим ухом, равны 16 Гц и 20 000 Гц. Чему равны соответствующие им длины волн?

Задача 37.2. Установлено, что восприятие звуков предельной частоты (16 Гц и 20 000 Гц) доступно лишь очень молодым людям. Мужчины, например, начинают утрачивать восприятие высоких звуков раньше, чем женщины. Большинство мужчин среднего возраста не могут воспринимать

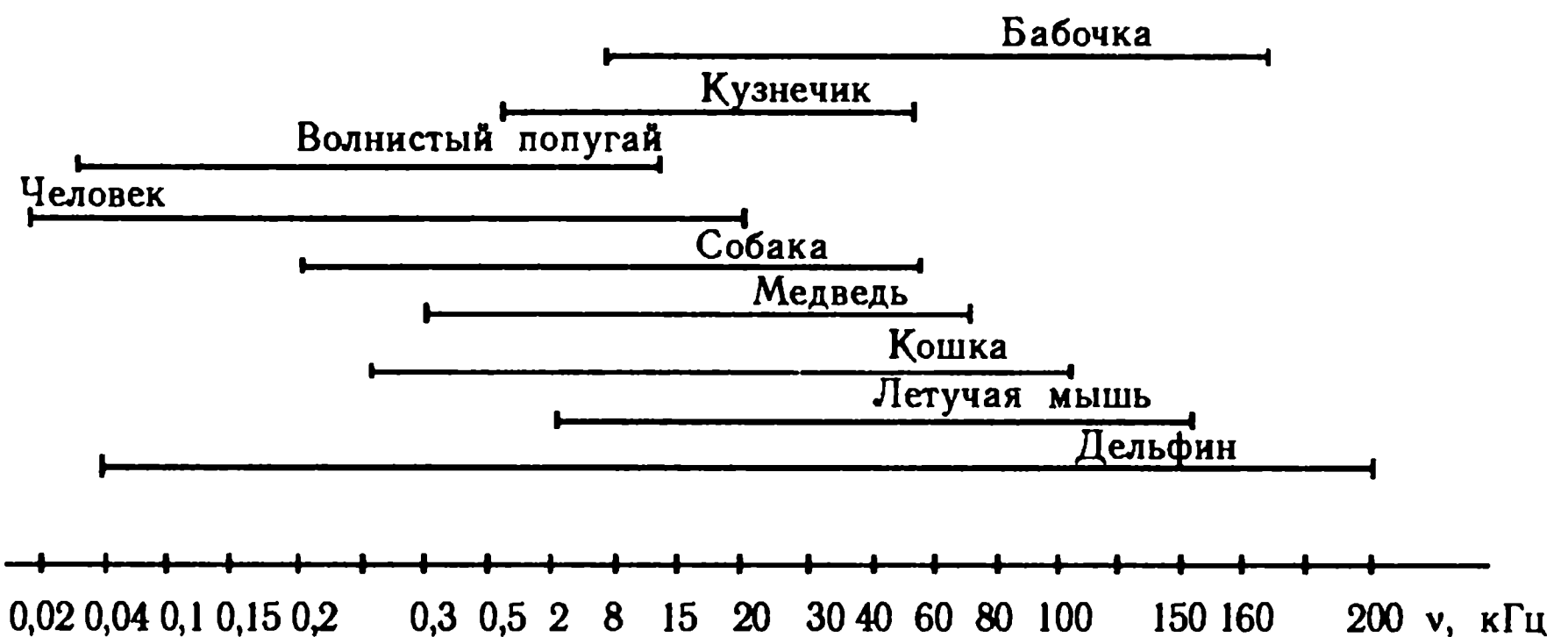


Рис. 10.4

звуки, более высокие чем приблизительно 12 000 Гц. После 50 лет как мужчины, так и женщины утрачивают способность воспринимать бóльшую часть верхней области звукового спектра из-за потери эластичности барабанной перепонки. А каков ваш диапазон восприятия звука?

В связи с ответом на этот вопрос можно предложить школьникам лабораторную работу по определению границ воспринимаемого ими диапазона акустических волн при помощи звукового генератора и высококачественного динамика.

Ультразвук и инфразвук

Воспринимает ли человек ультра- и инфразвук?

Воздействия ультразвука на акустический анализатор человека не воспринимаются им как звуковые ощущения, хотя и не остаются для него без последствий.

Инфразвук также находится вне пределов слышимости человека, но оказывает на него физиологическое воздействие. С частотой инфразвука совпадают колебания альфа-ритма биотоков человеческого мозга и биений сердца. Инфразвуковые волны вызывают резонанс внутренних органов. В частности, сердце под воздействием колебаний частотой 1 Гц начинает биться со все возрастающей силой. При этом кровеносные сосуды лопаются, не выдерживая возрастающего давления. И наоборот, подобрав соответствующим образом частоту и фазу инфразвука, можно добиться остановки сердца. Вдали от резонанса с внутренними органами (при частоте, примерно равной 13 Гц) инфразвук оказывает влияние на психическое состояние человека, вызывает у него ощущение неясной тревоги, безотчетного страха и т.д.

Некоторые ученые объясняют действием инфразвука на людей факты обнаружения в океане судов без команд, так называемых «летучих голландцев». По гипотезе советского ученого В.В. Шулейкина, море является природным источником инфразвуковых волн. Двигаясь со скоростью, намного превышающей скорость волн на море, инфразвуковой «голос моря» служит предвестником шторма для некоторых животных, а для людей — сильным источником дискомфорта состояния. Желание избавиться от неприятных ощущений и заставляет людей бросаться в море. Искусственными источниками инфразвуковых волн могут служить, например, необычно большие музыкальные инструменты. Они так же, как обычные музыкальные инструменты, воздействуют на человека, но при этом порождают неуверенность, страх, панику. Считают, что упоминаемая в Библии иерихонская труба была как раз таким инструментом. Известны пред-

ложения использовать инфразвук в качестве оружия, воздействующего на психику противника.

Задача 37.3. Какой будет реакция вашего организма на интенсивную звуковую волну длиной 50 см, 300 м, 0,5 см?

Область слышимости звука Существуют границы и для интенсивности воспринимаемых ухом звуков. Для того чтобы звуковая волна создавала ощущение звука, необходимо, чтобы интенсивность звука превосходила некоторое значение, называемое порогом слышимости. Звук, интенсивность которого ниже порога слышимости, ухом не воспринимается, так как он слишком слаб. С другой стороны, звук очень большой интенсивности также не воспринимается как звук, вызывая лишь ощущение боли и давления в ухе. Максимальная интенсивность звука, при увеличении которой возникает боль, называется порогом болевого ощущения. Значения обоих порогов — слышимости и боли — разные в разных областях частот. На рисунке 10.5 показана зависимость порога слышимости и порога болевого ощущения от частоты для так называемого среднего уха. Из рисунка видно, что человек лучше всего слышит звуки средних частот, особенно в области 800—2000 Гц, хуже — крайние частоты диапазона ниже 50 Гц и выше 10 000 Гц. Существует предположение, почему именно средняя часть диапазона доступных человеку звуков воспринимается им лучше всего. На эту часть приходится частоты, соответствующие голосам детей и женщин, чью просьбу о помощи человек должен слышать с большого расстояния при любой интенсивности звука.

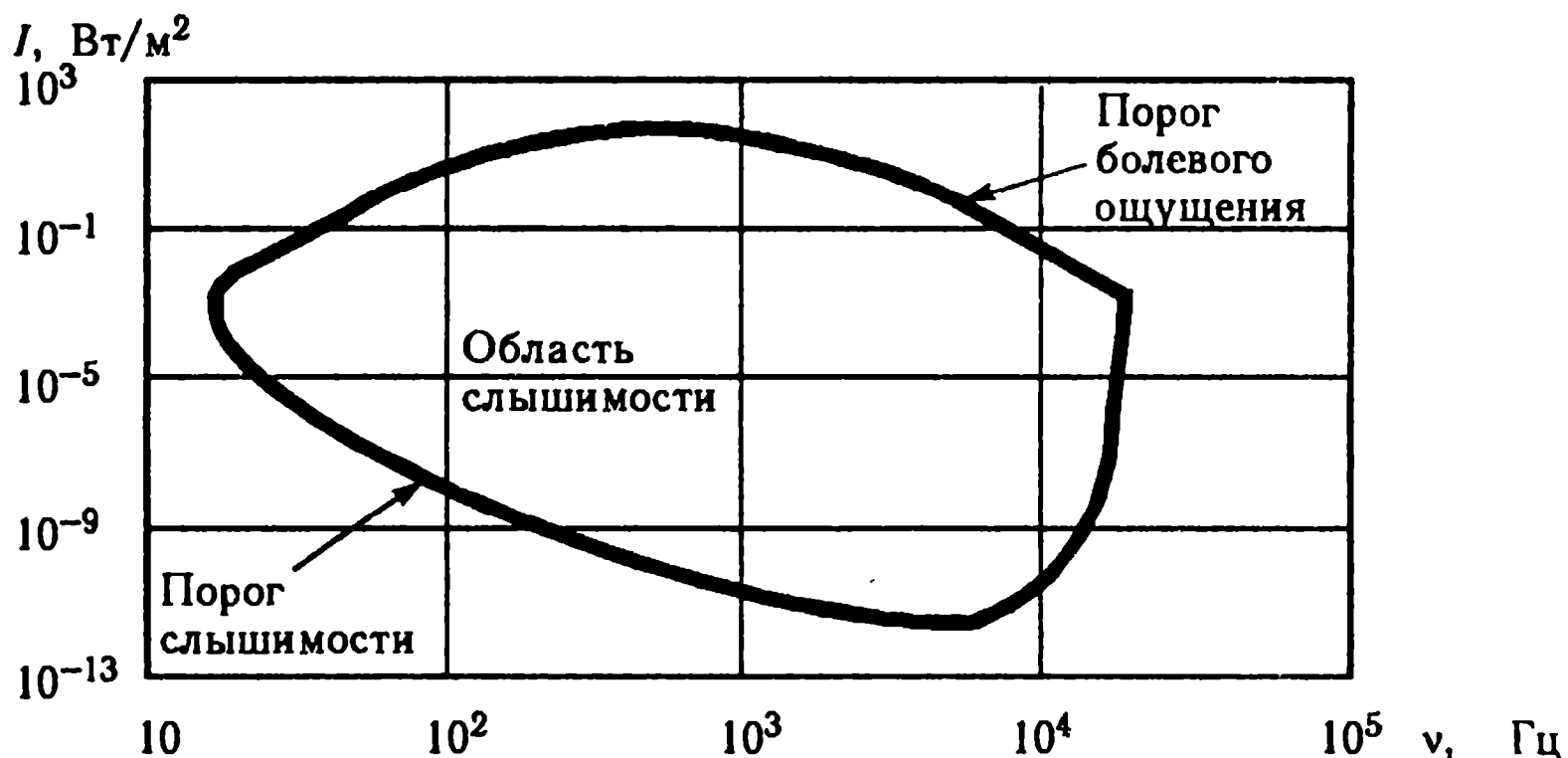


Рис. 10.5

Для каждого человека область слышимости своя. Ее можно установить при помощи специальных исследований. Соответствующая лабораторная работа позволяет установить эту границу каждому для себя.

Расширить представления о возможностях уха человека помогут следующие задачи.

Задача 37.4. При избыточном давлении 30 Па в звуковой волне частотой 1000 Гц ухо человека ощущает боль. Каковы при этом интенсивность звука и уровень интенсивности?

Задача 37.5. Источник звука производит сигнал мощностью 100 Вт. Какова интенсивность звука на расстоянии 100 м, если его энергия распространяется равномерно во все стороны? Чему равен уровень его интенсивности?

Задача 37.6. Человек с хорошим слухом может еще слышать звук с колебанием давления до 10^{-4} Па при частоте 2000 Гц. Определите амплитуду смещения частиц воздуха в такой волне.

Задача 37.7. Какова амплитуда давления звуковой волны, соответствующей пределу слышимости среднего человеческого уха?

Задача 37.8. Вычислите максимальное смещение молекул воздуха для звука частотой 1000 Гц на пороге слышимости. Определите максимальное изменение давления в этой волне.

Задача 37.9. Уровень интенсивности звука от реактивного самолета на расстоянии 30 м от него равен 140 дБ. Каков уровень интенсивности от него на расстоянии 300 м? Отражением от поверхности Земли пренебречь.

Задача 37.10. Человеческое ухо способно воспринимать разницу уровней интенсивности в 10 дБ. Каково отношение амплитуд давления двух звуков, уровни интенсивности которых различаются на это значение?

Задача 37.11. По данным английских исследователей Дж.Кимбл и Н.Джарлизи, человек может услышать тиканье наручных часов в тихой комнате с расстояния 6,1 м. Проверьте этот факт расчетом. Необходимые данные возьмите в таблице 10.1.

Задача 37.12. Вычислите максимальное смещение молекул воздуха при температуре 20 °С для звуковой волны частотой 120 Гц, интенсивность которой равна порогу болевого ощущения (120 Вт/м^2). Какова амплитуда давления этой волны?

Задача 37.13. Звуковая волна с уровнем интенсивности 75 дБ падает на барабанную перепонку, площадь поверхности которой $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Какую энергию поглотит барабанная перепонка за 1 с?

Результаты решения предложенных задач позволяют сделать выводы о высоком качестве уха человека как звуковоспринимающего прибора:

1) оно работает в колоссальном диапазоне интенсивностей, занимающем 14 порядков (от 10^{-12} до 10 Вт/м^2);

2) чувствительность барабанной перепонки такова, что она едва не улавливает удары отдельных хаотически движущихся молекул воздуха (на пределе слышимости амплитуда смещения перепонки равна одной пятидесятой диаметра молекулы воздуха!).

Ухо как
спектральный
прибор

А какова возможность уха как спектрального прибора?

Окружающие человека звуки редко представляют собой чистые тоны, т.е. колебания одной частоты. Как правило, все звуки в природе — сложные тоны и шумы. Сложные тоны образуются путем наложения на основной тон добавочных тонов или обертонов с частотами, кратными частоте основного тона. Звуки, состоящие из смеси самых разных частот, в которых невозможно выделить основной тон, называются шумами.

Собственная частота колебаний барабанной перепонки уха человека равна приблизительно 1000 Гц. При воздействии на ухо колебаний этой частоты наблюдается резонанс. Оказалось, что большинство окружающих человека «приятных» звуков — шум леса, дождя, моря и т.д. — определяется именно частотой в 1000 Гц. Человечество опытным путем обнаружило благоприятное, успокаивающее действие этих звуков и стало использовать в лечебных целях.

По поводу природных шумов выяснилась одна очень интересная деталь: характер многих природных периодических процессов очень похож на частотные характеристики музыкальных произведений. Несколько лет назад американские астрофизики провели компьютерную обработку некоторых волновых процессов, происходящих на Солнце, с целью их трансформации в колебания звуковой частоты. В результате была записана грампластинка под названием «Музыка Солнца». Судя по записи, звучание Солнца напоминает величественную органную музыку с ее полифоническим богатством, ее мощными басовыми аккордами, великолепием и сочностью созвучий. Недавно была проведена количественная обработка ряда параметров Цюрихского озера и озера Лугано (Швейцария). Музыка озер, как оказалось, звучит немного таинственно, напоминая то рокот бури, то игру на органе, то звон колоколов... В связи с этим возникает естественный вопрос: не являются ли великие музыканты гениальными интерпретаторами, аранжировщиками подслушанной и понятой ими музыки Вселенной?

Задача 37.14. Длина слухового прохода уха человека составляет 2,7 см. Определите частоту звука, при которой слышимость будет наилучшей.

Ухо обладает способностями спектрального прибора: оно различает отдельные компоненты сложного звука (например, аккорда). (Для сравнения упомянем, что орган зрения человека — глаз таким свойством не обладает: он не раскладывает сложное колебание на простые составляющие.)

Еще одним важным свойством нашего уха является его способность определять направление на источник звука по разности времени прихода звуковых волн в правое и левое ухо — это свойство уха называется бинауральным эффектом. Для выживания животных и человека важно не только, кто или что является источником звуковой волны, но и где он находится. Пространственный слух, основанный на бинауральном эффекте, позволяет решить эту задачу.

Задача 37.15. Оцените способность человека определять направление на источник звука.

Р е ш е н и е

Как видно из рисунка 10.6, разность хода двух лучей, приходящих в разные уши человека, равна

$$d = a \sin \varphi,$$

где a — среднее расстояние между ушами, равное 18—20 см.

При $\varphi = 3^\circ$

$$\sin \varphi = \frac{3 \cdot 3,14}{180} = 0,058;$$

$$d = 0,01 \text{ м.}$$

$$\text{При этом } t = \frac{d}{v} = \frac{0,01}{340} \text{ с} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Если колебания имеют частоту 10 000 Гц или период 10^{-4} с, то сдвиг фаз между обоими звуковыми ощущениями достигает 0,33 периода и вполне ощутим.

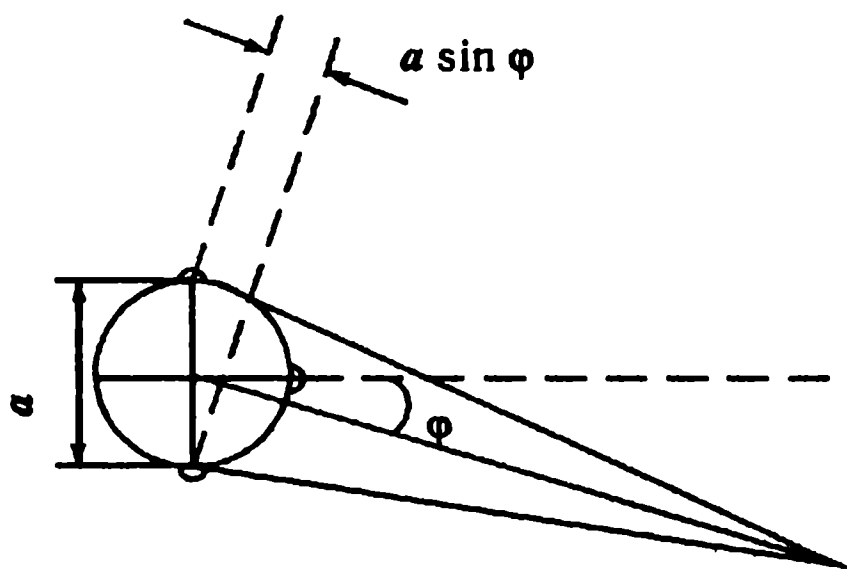


Рис. 10.6

Для больших частот и малых длин волн голова человека создает уже значительную акустическую «тень», что вызывает заметную разность амплитуд давления звука в обоих ушах [58, 331].

Голосовой орган человека Природа снабдила человека не только органом, улавливающим звук, но и собственным источником звука.

Голосовой орган человека устроен достаточно сложно. Гортань, в которой рождается звук, расположена в передней части шеи и представляет собой перевернутую книзу усеченную пирамиду, верхнее основание которой соответствует корню языка, а нижнее — трахее. В разрезе гортань напоминает песочные часы. Самое узкое место гортани, перешеек песочных часов, образовано голосовыми связками. Жесткий хрящевый каркас гортани состоит из отдельных частей, соединенных связками и способных изменять взаимное положение под действием мышц. Изменение объема и формы глотки — главного резонатора системы голосового аппарата человека — объясняет разнообразие разновидностей голосов, открывает возможности совершенствования техники речи и пения. При выдохе воздух, проходя через гортань, возбуждает колебания голосовых связок. Колебания голосовых связок очень сложны: в частности, они колеблются не как единое целое. В этом движении принимает участие большое (до 40 штук) количество отдельных мышц: дыхательных, гортанных, артикуляционных. Таким образом, воздушная струя, образующаяся во время выдоха, служит лишь материалом, из которого генерируется звук. Управляет работой голосовых мышц мозг, передавая необходимые сигналы с частотой порядка 500 Гц.

Характеристики голоса человека Голос человека характеризуется многими параметрами, среди которых тоновый (частотный) диапазон, громкость, окраска (тембр) и т.д. В двух формах проявления человеческого голоса — пении и речи — качества голоса проявляются несколько различно. Частотный диапазон речи составляет всего лишь 1/10 от общего диапазона голосовых частот. Обычно же голос человека включает в себя частоты от 64 до 1300 Гц. Специальными вокальными упражнениями этот диапазон можно расширить в основном за счет повышения верхней тоновой границы. Самый низкий тон, который может быть взят человеческим голосом, — это «фа» контроктавы с частотой 43,2 Гц. Самым высоким тоном является «фа»

третьей октавы (1354 Гц) из знаменитой арии царицы Ночи в «Волшебной флейте» В.А.Моцарта. Однако, некоторые певицы сумели превзойти этот результат: им оказались доступны частоты 2069 Гц и даже 2300 Гц.

Громкость (мощность) голоса человека меняется в широких пределах в зависимости от ситуации. Например, в интимном разговоре уровень интенсивности (звукового давления) равен примерно 30 дБ, при вспышке гнева он возрастает до 60 дБ. В помещении уровень интенсивности звука голоса оратора должен быть равен 55 дБ, а на открытом воздухе — 80 дБ. У певцов уровень интенсивности звука составляет 30—110 дБ и даже 130 дБ на расстоянии 1 м от поющего. Подобные значения интенсивности звука не могут быть достигнуты ни одним музыкальным инструментом с вибрирующими частями.

Данные об уровне интенсивности звуков различных источников приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1

Звуковое давление и уровень интенсивности звука в различных случаях

Амплитуда звукового давления, Па	Уровень интенсивности звука, дБ	Примерные условия, соответствующие данным таблицы
$2 \cdot 10^3$	160	Механическое повреждение барабанной перепонки
$2 \cdot 10^2$	140	Реактивный самолет на расстоянии 30 м (болевое ощущение)
?	120	Рок-музыка в закрытом помещении
2	100	Поезд метро
?	75	Шум в салоне автомобиля, движущегося со скоростью 100 км/ч
?	70	Интенсивное уличное движение
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Нормальный разговор
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Очень тихий шепот
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Порог слышимости

Задача 37.16. Дополните недостающими данными таблицу 10.1.

Задача 37.17. Существует оценка, показывающая, что если бы 2000 человек вели непрерывный разговор в течение 1,5 ч, то энергии их голосов

хватило бы на то, чтобы вскипятить один стакан воды. Проверьте, так ли это.

Задача 37.18. Оцените выходную мощность нормальной разговорной речи. Воспользуйтесь таблицей 10.1. Считайте, что звуки распространяются равномерно в полусфере вокруг рта человека. Сколько человек должны одновременно разговаривать, чтобы создать звук с выходной мощностью 100 Вт?

Задача 37.19. Воспользовавшись таблицей 10.1, определите: а) во сколько раз интенсивность звука при громком пении больше интенсивности обычной речи; б) во сколько раз интенсивность обычной речи больше интенсивности шепота.

Следующая важная характеристика голоса — его тембр, т.е. набор спектральных линий, среди которых можно выделить пики, состоящие из нескольких обертонов,— так называемые форманты. Именно форманты определяют секрет индивидуального звучания голоса и позволяют распознавать речевые звуки, так как у разных людей форманты даже одного и того же звука отличаются по частоте, ширине и интенсивности. Тембр голоса строго индивидуален, поскольку в процессе звукообразования важную роль играют специфические для каждого индивидуума резонаторные полости глотки, носа, околоносовых пазух и т.д. Неповторимость человеческого голоса можно сравнить лишь с неповторимостью узора отпечатков пальцев. Во многих странах мира магнитофонная запись человеческого голоса считается неоспоримым юридическим документом, подделать который невозможно [54, 235].

Спектры голосов певцов отличаются от спектра голоса обычного человека: в них сильно выражена высокая певческая

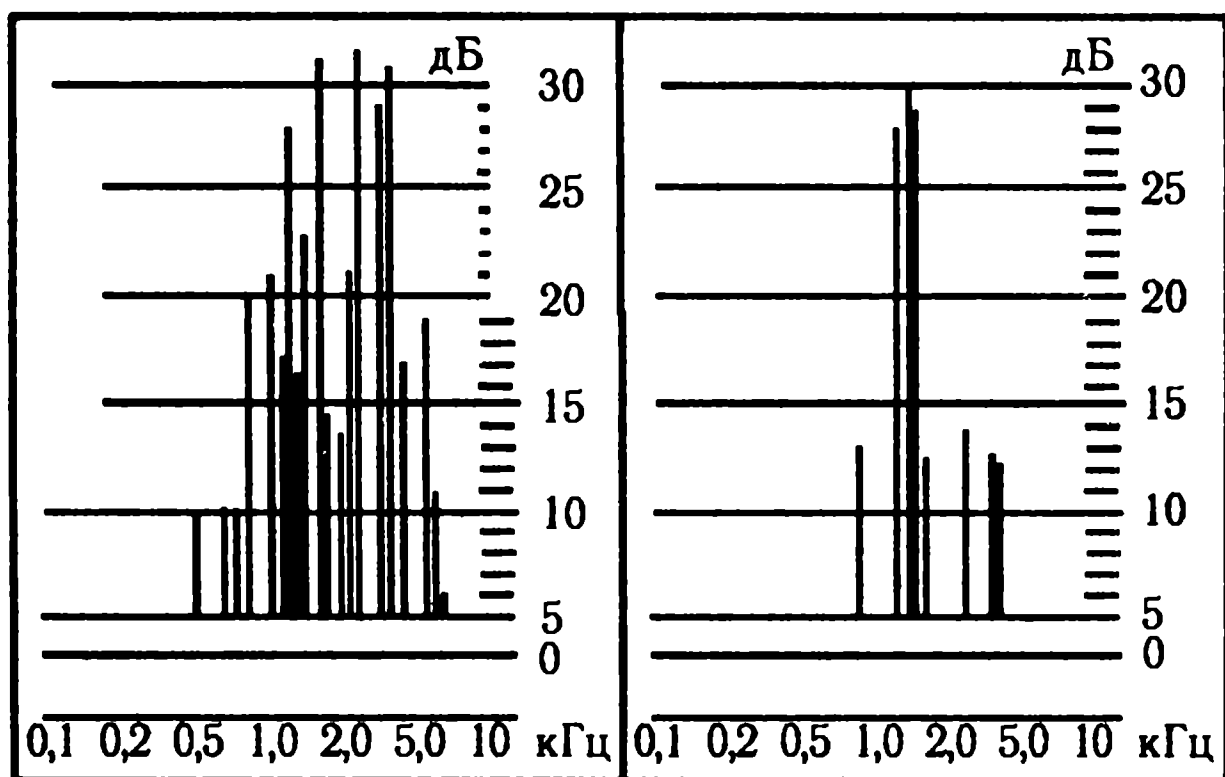


Рис. 10.7

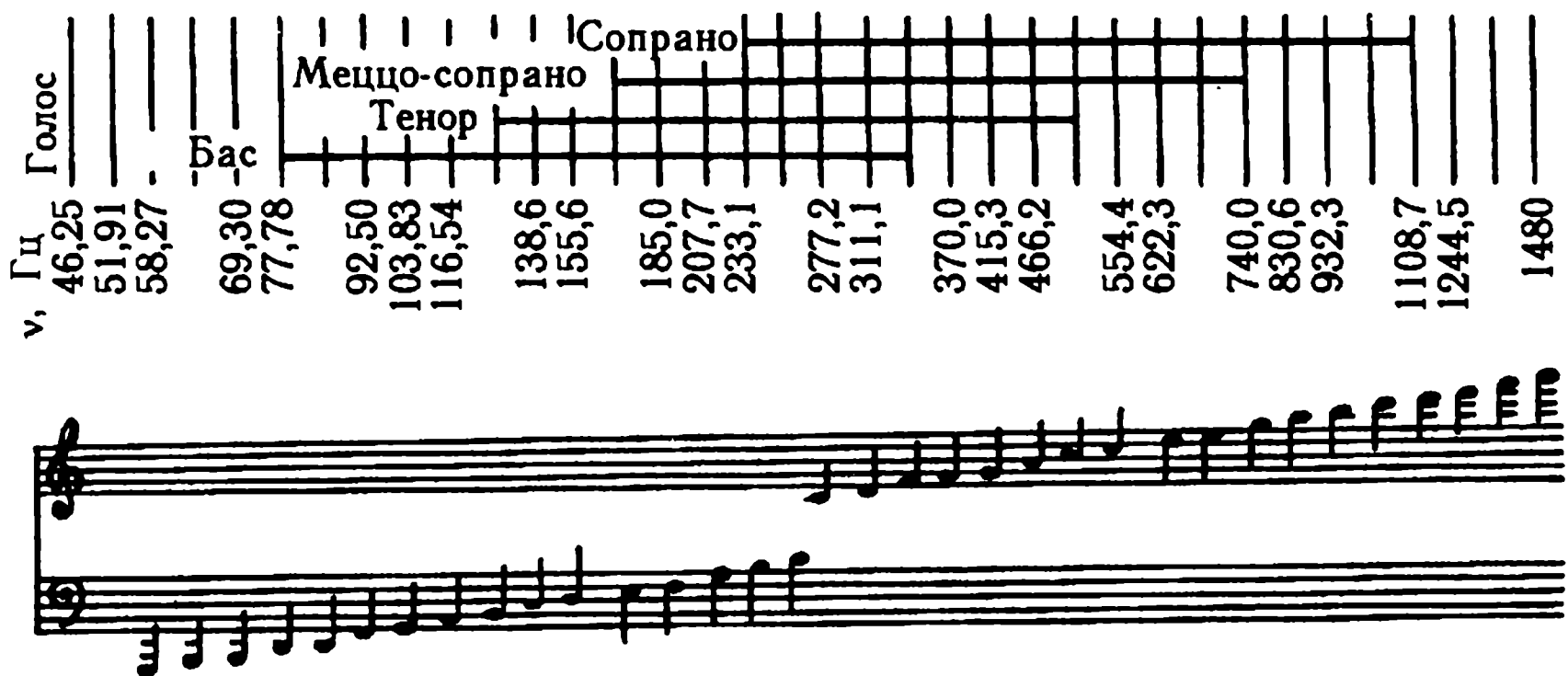


Рис. 10.8

форманта, т.е. обертоны с частотами 2500—3000 Гц, придающие голосу звонкий оттенок. У выдающихся певцов они составляют в спектре до 35 и более процентов (рис. 10.7, слева), в то время как у опытных — 15—30%, а у начинающих — 3—5% (рис. 10.7, справа).

Принято выделять три разновидности голосов для обоих полов: у мужчин — бас, баритон, тенор; у женщин — альт, меццо-сопрано и сопрано. Это разделение является в большей степени искусственным: оно не учитывает большое количество «промежуточных» голосов, так как пока нет объективного метода оценки качества голоса из-за безграничного сочетания его свойств. Частотные диапазоны голосов певцов и певиц приведены на рисунке 10.8.

§ 38. Радиоволны

Радиоволны
и человек

Среди обширного диапазона электромагнитных волн наибольший интерес для анализа связей человека и физики представляют, на наш взгляд, волны видимого света и радиоволны. В этом параграфе мы подробно рассмотрим влияние на организм человека электромагнитных волн радиодиапазона.

У человека нет рецепторов, воспринимающих радиоизлучение, и человек обычно не ощущает его. Но, как показали специальные эксперименты, человек может воспринимать электромагнитные волны с частотой 129 МГц и кратными

ей (резонансными) частотами 268, 387, 516 МГц. При облучении такими волнами люди явно ощущали наличие радиоизлучения, у некоторых возникали галлюцинации [65, 258]. Почему это происходило?

Тело человека можно с некоторой степенью точности уподобить электрическому диполю, генерирующему и принимающему электромагнитные волны. Действительно, установлено, что в результате движения зарядов в теле человека (биотоков) голова человека приобретает положительный заряд, а живот и ноги — отрицательный.

Задача 38.1. Основная «резонансная» частота тела человека для радиоволн равна 129 МГц. Оцените размеры антенны-диполя, подходящего для приема такой волны.

Р е ш е н и е

Длина волны, соответствующая частоте 129 МГц, равна

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{129 \cdot 10^6} \text{ м} = 2,3 \text{ м.}$$

Длина полуволнового диполя для приема этой волны равна

$$l = \frac{\lambda}{2} = 1,15 \text{ м.}$$

Получили, что длина диполя как раз соответствует расстоянию голова—ноги. Именно на таком расстоянии находятся электрические заряды в теле человека.

В действительности распределение зарядов в теле человека имеет гораздо более сложную картину. Если провести на теле человека, например на спине, линии равных зарядов, то мы увидим рисунок, похожий на изображение возвышенностей на топографической карте, причем наиболее высокие «горы» будут там, где анатомически расположены нервные узлы.

Физическая природа воздействия электромагнитных волн радиодиапазона на человека состоит, во-первых, в том, что они изменяют картину собственного электромагнитного поля человека. Во-вторых, волны взаимодействуют с электромагнитными полями мозга, нервов, мышц. Таким образом, человек представляет собой тончайшую электромагнитную систему, которая сама генерирует электромагнитные волны и чутко реагирует на их изменение как внутри себя, так и вовне.

Проще всего проверить, воздействует ли электромагнитное поле на живой организм, изолировав последний

от действия поля. Опыт показывает, что помещенные в экранированную камеру животные и растения сначала как будто развиваются нормально, но потом первые лысели, у них нарушалось действие отдельных органов, развивался рак. У растений также начинались своего рода «раковые опухоли».

Оказалось, что человек является неплохой антенной для радиоволн с частотой 70—100 МГц (длина волны 4,28—3 м). При определенном положении (ориентации) тела в пространстве поглощение энергии поля волны может возрасти более чем в 10 раз. Как говорят специалисты, тело на этих частотах «резонирует с полем».

Американских астронавтов перед полетом на Луну помещали в магнитную камеру. Серьезных отклонений у них не обнаружили, но субъективные показатели свидетельствовали, что пребывание в изоляции от электромагнитных полей не проходит бесследно.

Вспомните свои ощущения после долгой поездки в автомобиле, самолете, после пребывания в здании, построенном из железобетона. С ними связаны чувство вялости, сонливости, потеря аппетита, снижение работоспособности. Очевидно, лишение человека естественного электромагнитного окружения, являющегося его бессменным спутником на долгом пути эволюции, влияет на происходящие в его организме процессы. Ведь самочувствие человека в корне меняется, если искусственно увеличить напряженность электромагнитного поля до естественного уровня. Этот факт уже осознан учеными, и, по-видимому, скоро придется оснащать упомянутые объекты специальными генераторами, воспроизводящими необходимую для нормального самочувствия людей электромагнитную обстановку. О том, что электромагнитное поле планеты — один из факторов, повлиявших на возникновение жизни на Земле, говорит следующий факт. В одном из вариантов опытов, моделирующих процесс зарождения жизни на Земле из набора органических веществ, вместо электромагнитного излучения видимого диапазона или ультрафиолетового излучения, моделирующего солнечную радиацию, в качестве источника необходимой энергии использовалось высокочастотное радиоизлучение. Под его действием из исходной смеси веществ образовывались аминокислоты — «кирпичики» всего живого. В контрольном опыте при отсутствии такого облучения аминокислоты не образовывались [65, 265].

Влияние на организм искусственного радиодфона

Пока все то, о чем мы говорили, касалось естественного электромагнитного фона. А как влияют на человека те радиоизлучения, которые он сам «выпустил в свет»? Замечено, что люди, связанные по работе с радиоизлучением большой мощности (сотрудники радиолокационных станций, установок СВЧ, радио- и телепередающих и приемных станций и т.д.) часто жалуются на плохое самочувствие. Самое неприятное, что все большее число людей, непосредственно не связанных с производством радиоизлучения, тем не менее попадают под действие всепроникающих, загрязняющих среду обитания людей электромагнитных волн, создаваемых при работе все более мощных радиопередающих и телевизионных станций, радиорелейных линий, радиолокаторов, навигационных устройств, линий электропередач.

О том, как велик искусственный фон радиоизлучения, говорит следующий факт. На метровом диапазоне волн ($f = 300$ МГц) наша скромная планета посылает в пространство почти такой же мощности поток радиоизлучения, как и Солнце, в периоды, когда на нем нет пятен. Земля излучает в этом диапазоне в миллионы раз больше, чем Венера или Меркурий. По мнению известного астрофизика И.С.Шкловского, этот факт, а также то обстоятельство, что еще некоторое время назад излучение Земли в этом диапазоне было немного слабее, мог бы служить свидетельством того, что на нашей планете есть разумная жизнь [32, 166].

Задача 38.2. Оцените соотношение между естественным и искусственным радиодфоном.

Биологическое действие радиоволн

По своему биологическому действию радиоволны отличаются от действия ионизирующих излучений — ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-излучений (см. гл. 13). Фотоны радиоизлучения обладают намного меньшей энергией по сравнению с энергией межмолекулярных связей или средней кинетической энергией поступательного и вращательного движения молекул при комнатной температуре, т.е. их энергия значительно меньше, чем энергия, необходимая для разрушения самых слабых химических связей.

Задача 38.3. Сравните энергию квантов радиоизлучения и энергию теплового движения молекул в тканях живого организма.

Под действием высокочастотного электромагнитного поля частицы вещества (ионы и дипольные молекулы воды) начинают более интенсивно колебаться, что соответствует повышению температуры облученной ткани. Этот процесс образно называют «пляской молекул».

Радиоизлучение большой мощности может вызвать у человека тепловой удар и даже ожог. Могут происходить и более тонкие функциональные изменения в организме человека, связанные с работой глаз, половых органов, вообще генетического аппарата, иммунной системы. Имеются небезосновательные опасения, что искусственный ради фон, во много раз превышающий естественный, может ослабить зависимость биоритмов человека от всеобщего суточного ритма, синхронизированного естественным электромагнитным полем планеты. По-видимому, скоро мы встанем перед необходимостью решать и эту проблему «экологии» человека.

Принцип теплового нагрева тканей организма человека при облучении его мощным радиоизлучением положен в основу разработки стандартов на предельно допустимые уровни радиооблучения. По нормам, принятым в нашей стране, максимальная плотность потока излучения (в диапазоне частот 300 МГц—300 ГГц) не должна превышать 10 Вт/м^2 . Величина, определяемая произведением плотности потока на время работы, не должна быть более $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Если временной фактор не учитывать (брать уровень облученности без ограничения времени), то стандарт определяет предельно допустимый уровень значением $0,1 \text{ Вт/м}^2$ [65, 276].

Роль радиоэлектроники в жизни человека непрерывно возрастает. Вокруг Земли на разных орбитах работают спутники связи. В скором времени телевидением будет охвачена вся поверхность планеты. Человечество стоит на пороге создания глобальной системы связи. Космические солнечные электростанции, если проекты их будут реализованы, еще более повысят уровень ради фона: ведь энергию с орбиты предполагается передавать с помощью радиоволн.

Существует интересная гипотеза, объясняющая повышением ради фона явление акселерации — увеличение среднего роста и ускорение полового созревания людей. Статистика отметила появление признаков акселерации уже 140 лет назад, причем до 30-х гг. нашего века они были не так заметны, как теперь. При этом было установлено, что в городе ее проявления гораздо более выражены по сравнению с сельской местностью. Объяснение этого явления основывается на свойстве гиперкомпенсации, присущем человеку

и другим высшим животным. Оно заключается в том, что организм оценивает изменение воздействующих факторов среды и с опережением приспосабливается к такой тенденции за счет ускорения физиологических процессов. Радиофон угнетающе действует на рост и развитие млекопитающих. Ответом природы на этот процесс и стала акселерация — ускоренное развитие организма. В начале века она была не так заметна, поскольку деятельность людей тогда радиофон изменял несильно. В нашем столетии искусственные электромагнитные поля во много раз превысили естественный электромагнитный фон планеты, что и послужило причиной акселерационного взрыва [65, 276].

В заключение обсудим проблему космических связей. В § 15 мы получили оценки, показывающие неосуществимость в ближайшем будущем непосредственного контакта с представителями внеземных цивилизаций в результате космических полетов земных аппаратов. Ученые считают, что наиболее приемлемым способом установления контактов с другим разумом может стать обмен информацией путем передачи радиосигналов. Действительно, радиосвязь имеет много преимуществ перед другими способами контакта. Радиоволны движутся со скоростью, намного превышающей скорости космических кораблей и зондов. Генерация радиоволн осуществляется дешево и просто. К недостаткам можно отнести затухание радиоволн, т.е. уменьшение их интенсивности, с увеличением расстояния, что потребует резкого увеличения мощности излучения, если мы хотим, чтобы оно достигло отдаленных точек пространства.

Глава 11 ОПТИКА

§ 39. Глаз и зрение

Строение глаза человека

Человеческий глаз (рис. 11.1) представляет собой замкнутый объем примерно сферической формы. Плотная белая непрозрачная оболочка глаза называется склерой 1. Ее толщина 0,4—1,1 мм. Через заднюю стенку склеры проходят зрительный нерв 2 и кровеносные сосуды. Передняя часть склеры переходит в прозрачную оболочку — роговицу 3 толщиной 0,5 мм, служащую предохранительным покрытием для глаза. За роговицей внутри склеры расположены передняя глазная камера 4, хрусталик 5, задняя глазная камера. Передняя глазная камера заполнена прозрачной жидкостью, называемой водянистой влагой, задняя — прозрачным студенистым веществом, которое называется стек-

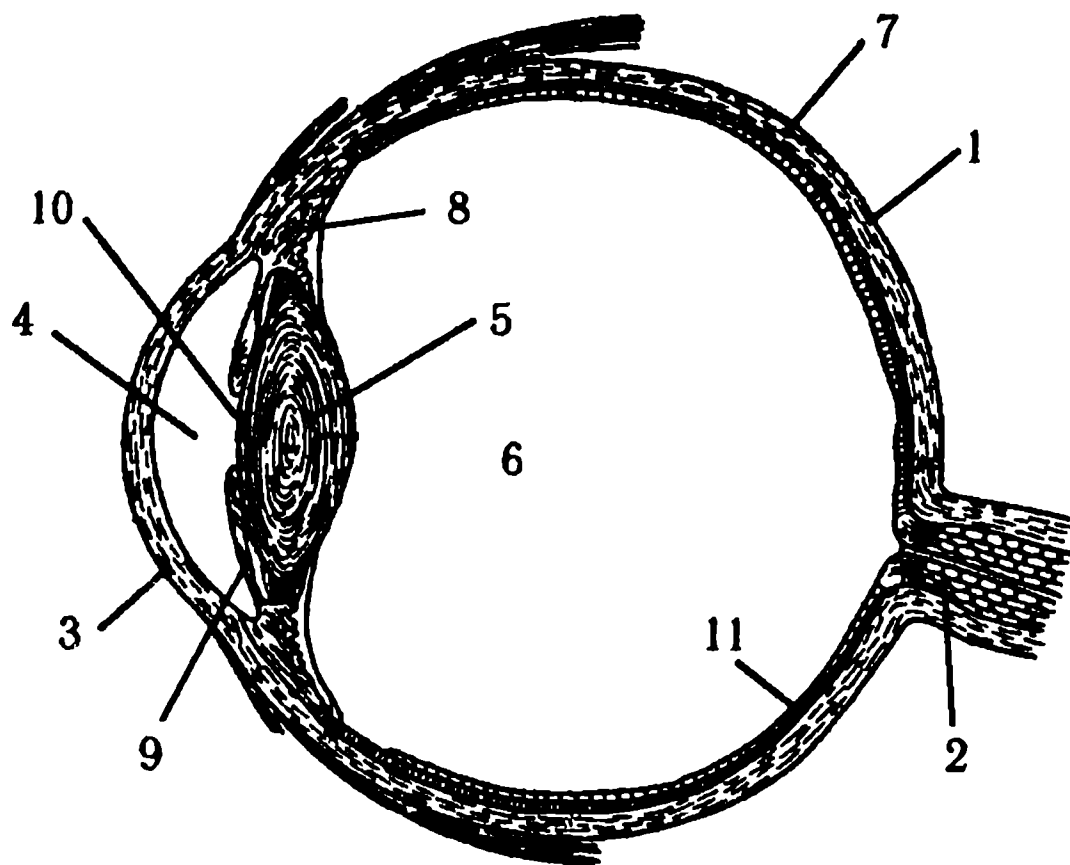


Рис. 11.1

ловидным телом 6. Эта часть глаза составляет оптическую систему глаза, создающую при преломлении лучей оптическое изображение предметов.

Внутренняя поверхность склеры покрыта сосудистой оболочкой 7, содержащей разветвления кровеносных сосудов, питающих глаз. Спереди она переходит в кольцевидную ресничную (цилиарную) мышцу 8 и далее в радужную оболочку 9, неодинаково окрашенную у разных людей и определяющую цвет глаз. Посредине радужной оболочки имеется отверстие, называемое зрачком 10, сквозь которое свет проходит внутрь глаза и которое играет роль диафрагмы. Зрачок кажется черным, так как изнутри отражается очень мало света. В зависимости от яркости объекта зрачок рефлекторно сужается или расширяется, ограничивая размеры пучка света, поступающего в глаз. Такая реакция предохраняет сетчатку в момент резкого изменения освещенности, когда адаптация глаза не успела произойти. Диаметр зрачка при этом может меняться от 2 до 8 мм. Зрачки реагируют всегда синхронно: в момент затемнения правого глаза расширяется зрачок и левого глаза. То же происходит и в момент сужения одного из зрачков. Это происходит вследствие того, что нервные волокна по пути в мозг частично перекрещиваются.

Хрусталик глаза человека представляет собой прозрачное бесцветное тело, напоминающее двояковыпуклую линзу, передняя поверхность которой менее выпукла, чем задняя. Хрусталик обеспечивает тонкую фокусировку глаза на различные расстояния. Эта фокусировка достигается сокращением цилиарных мышц, в результате чего изменяется кривизна хрусталика и, следовательно, фокусное расстояние.

Задняя часть склеры покрыта слоем чувствительной сетчатой оболочки, или сетчаткой 11. Она представляет собой радиально расходящиеся ответвления зрительного нерва. Толщина сетчатки больше в центре (0,2—0,22 мм), к краям она плавно уменьшается.

Сетчатка глаза имеет весьма сложное строение (рис. 11.2, а). Главную роль в ней играют светочувствительные клетки — палочки и колбочки (рис. 11.2, б). В них свет вызывает нервные раздражения, превращающиеся в нервные импульсы, которые по волокнам зрительного нерва передаются в кору головного мозга. Общая длина палочки 0,06—0,08 мм, колбочки около 0,035 мм. Число их громадно: 7 млн. колбочек и до 130 млн палочек.

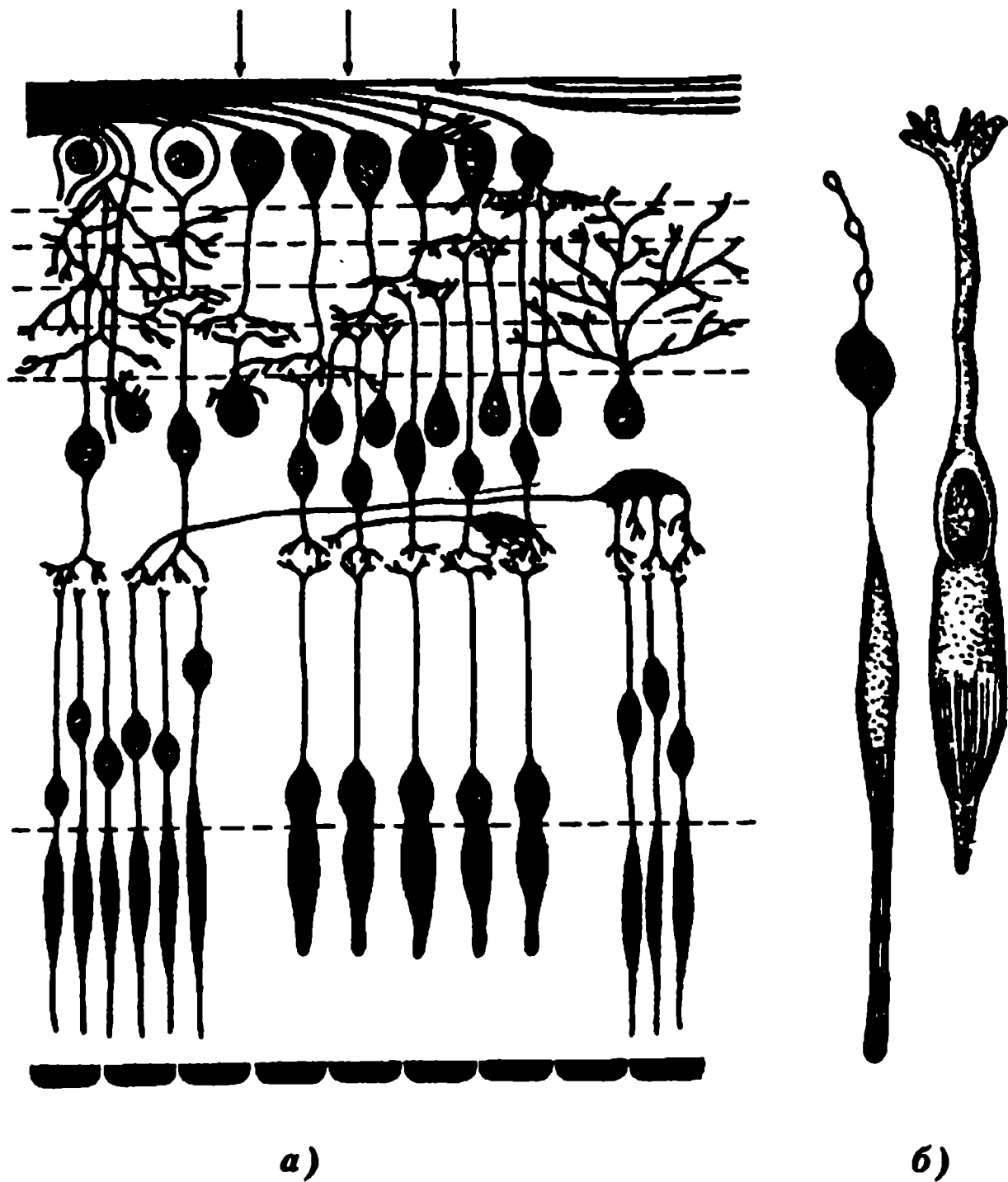


Рис. 11.2

Наиболее чувствительное место сетчатки — так называемое желтое пятно и центральная ямка, расположенные примерно в центре сетчатки. Диаметр желтого пятна примерно 0,25 мм. Оно состоит из очень плотно упакованных колбочек.

В месте подхода к глазу глазного нерва нет ни колбочек, ни палочек. Это место называется слепым пятном.

Сила аккомодации глаза.

Оптическая сила

Процесс изменения фокусного расстояния глаза вследствие работы цилиарных мышц называется аккомодацией глаза. Поскольку деформация хрусталика может происходить

только в определенных пределах, для всякого глаза существуют границы, называемые ближней и дальней точками ясного видения, в пределах которых он может отчетливо видеть предметы. Эти границы определяют область аккомодации глаза.

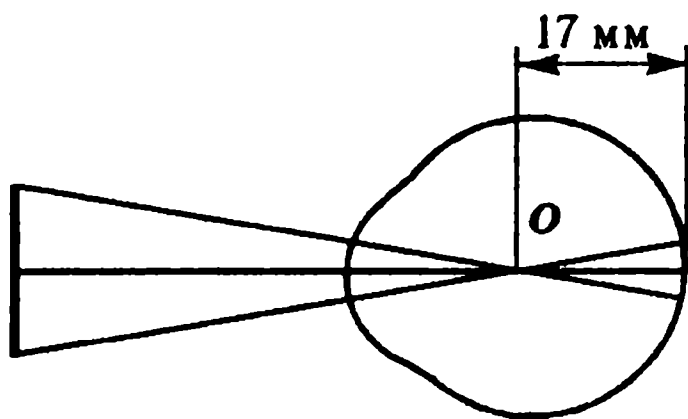


Рис. 11.3

Задача 39.1. На каком расстоянии от глаза находится дальняя точка ясного видения для нормального глаза?

Силой accommodation глаза называется разность оптических сил хрусталика при максимальной accommodation и ее отсутствии. При отсутствии accommodation (глаз смотрит на бесконечно удаленную светящуюся точку) параллельные лучи сходятся на сетчатке. При этом фокусное расстояние глаза будет равно расстоянию от сетчатки до точки, называемой узловой точкой глаза (точка O на рис. 11.3). Для среднего (редуцированного) глаза оно равно 17 мм, а соответствующая ему оптическая сила $D = 59$ дптр.

Задача 39.2. Чему равна оптическая сила среднего глаза, если его фокусное расстояние равно 17 мм?

Изменение оптической силы глаза при accommodation неодинаково у разных людей. Кроме того, с возрастом уменьшается эластичность мышц, деформирующих хрусталик. Таблица 11.1 показывает, как меняется с возрастом способность глаза к accommodation.

Задача 39.3. Дополните недостающими данными таблицу 11.1.

Поскольку ближняя точка ясного видения соответствует состоянию хрусталика с наибольшим напряжением мышцы, длительное пребывание в этом состоянии крайне утомительно для глаза. Расстояние, при котором глаз может находиться в accommodированном состоянии достаточно длительное время, а качество изображения на сетчатке получается хорошим, называется расстоянием наилучшего зрения. Его значение для нормального глаза примерно равно 25 см. Если необходимо рассматривать мелкие детали, расстояние между предметом и глазом можно на короткое время уменьшить, оставаясь в пределах области accommodation глаза.

Возрастные изменения расстояния до ближней точки ясного видения и силы аккомодации глаза

Возраст, год	Расстояние от глаза до ближней точки ясного видения, м	Сила аккомодации, дптр
До 10	0,07	14,9—14,6
15	0,08	12,0—12,3
20	0,10	?
25	0,12	?
30	0,14	?
40	0,22	?
50	?	4,9
60	?	2,1
70	?	0,25

Задача 39.4. Как изменится оптическая сила хрусталика глаза при переводе взгляда со звезд на книгу (книга находится на расстоянии наилучшего зрения)?

Близорукость и дальнозоркость

Два наиболее распространенных дефекта зрения — близорукость и дальнозоркость.

У близорукого глаза оба предела ясного видения находятся ближе, чем у нормального глаза. В ненапряженном состоянии мышцы, деформирующей хрусталик, параллельные лучи сходятся перед сетчаткой (рис. 11.4). Как и другие болезни глаз, близорукость может возникнуть из-за изменения кривизны преломляющих поверхностей хрусталика и роговицы, несимметричности этих поверхностей, неправильного положения хрусталика, большей длины глаза. По сравнению с нормальным близорукий глаз обладает некоторым преимуществом: он может увидеть более

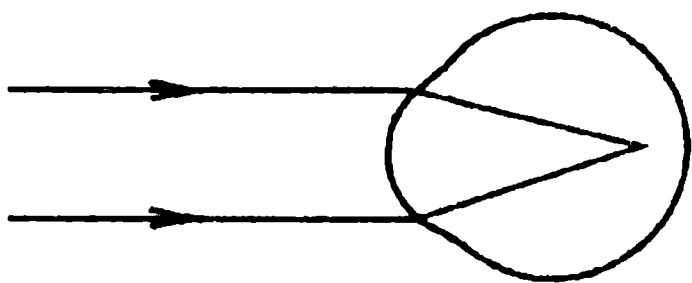


Рис. 11.4

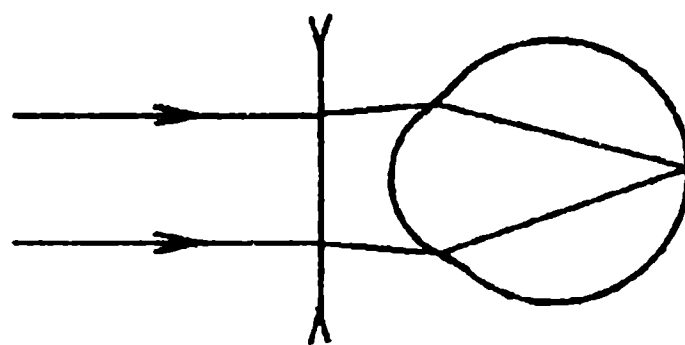


Рис. 11.5

мелкие детали, приближая рассматриваемый предмет на меньшее расстояние, чем это возможно для нормального глаза. Близорукость устраняется применением очков с рассеивающими линзами (рис. 11.5).

Задача 39.5. Левый глаз человека корректируется линзой с оптической силой $-6,5$ дптр. Близорукий это человек или дальнозоркий? Чему равен предел зрения (где находится дальняя точка ясного видения) этого человека без очков?

Задача 39.6. Пусть близорукости отвечает расстояние наилучшего зрения 12 см и предел зрения (дальняя точка ясного видения) 17 см. Какую оптическую силу должны иметь очки, чтобы человек мог отчетливо видеть дальние предметы, и каким будет в этом случае расстояние наилучшего зрения? Предположите, что линзы очков находятся на расстоянии 2 см от глаз.

Задача 39.7. Яблоко нормального глаза имеет длину 2 см. На сколько длиннее глаз близорукого человека (см. предыдущую задачу)?

Задача 39.8. Мальчик, сняв очки, читал книгу, держа ее на расстоянии 16 см от глаз. Какой оптической силы у него очки?

Задача 39.9. Близорукий человек без очков рассматривает предмет, находящийся на некоторой глубине под поверхностью воды. Оказалось, что если глаз расположить вблизи поверхности воды, то максимальное погружение предмета, при котором человек еще различает его мелкие детали, равно 30 см. Принимая показатель преломления воды равным $1,33$, определите, какие очки следует носить этому человеку.

Задача 39.10. Врач-окулист установил, что пациент отчетливо видит, если использовать комбинацию из трех соприкасающихся линз с фокусными расстояниями 60 , -20 и 100 см. Какой оптической силы очки следует выписать этому пациенту?

Дальнозоркий глаз — такой, у которого в ненапряженном состоянии изображение получается за сетчаткой (рис. 11.6). Ближний предел ясного видения такого глаза находится дальше, чем у нормального. Дальний предел ясного видения дальнозоркого глаза всегда отрицателен, т.е. находится не спереди, а сзади глаза. Дальнозоркость может быть обусловлена меньшей длиной глаза по сравнению с длиной

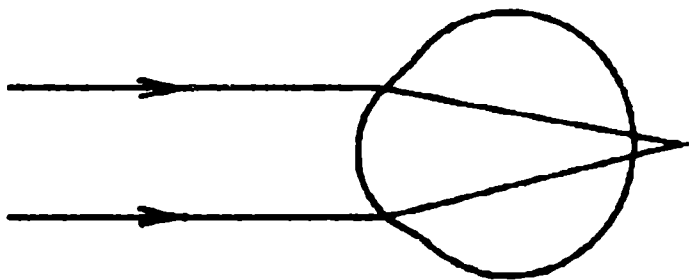


Рис. 11.6

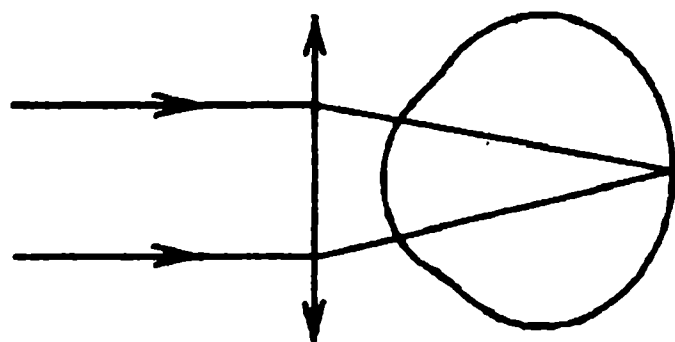


Рис. 11.7

нормального глаза. Корректируют дальнозоркость с помощью собирающих линз (рис. 11.7). С возрастом, в основном из-за уплотнения хрусталика, теряющего способность достаточно сжиматься, ближняя точка ясного видения удаляется от глаза. Это явление называется старческой дальнозоркостью.

Задача 39.11. У дальнозоркого человека расстояние наилучшего зрения равно 100 см. Какую оптическую силу должны иметь линзы его очков, чтобы он мог читать газету с расстояния 25 см? Для простоты будем считать, что линзы очков расположены вплотную к глазам.

Задача 39.12. Дальнозоркий глаз аккомодирует, не напрягаясь, на расстоянии не меньшем 50 см. Какова должна быть оптическая сила очков, чтобы предел аккомодации был понижен до 20 см, если считать очки и глаз близкорасположенными тонкими линзами?

Задача 39.13. Какую оптическую силу должны иметь очки для чтения, чтобы их владелец с расстоянием наилучшего зрения 120 см мог читать на расстоянии 25 м? Расстояние от линз до глаз равно 2 см.

Задача 39.14. Человек с нормальным зрением начинает смотреть через очки с оптической силой 5 дптр. Между какими двумя предельными положениями должен быть расположен рассматриваемый предмет, чтобы его было ясно видно без напряжения глаз?

Задача 39.15. Пятидесятилетний человек пользуется для чтения газеты с расстояния наилучшего зрения линзами с оптической силой +2,5 дптр. Через 10 лет он обнаружил, что может читать в тех же очках газету, но уже с расстояния 45 см. Какой оптической силы очки нужны ему теперь?

Задача 39.16. Женщина отчетливо видит правым глазом объекты на расстоянии от 35 до 210 см. Какой рецепт на бифокальные очки ей следует выписать, чтобы она могла отчетливо видеть далекие предметы (сквозь верхнюю часть стекол) и читать книгу с расстояния 25 см (сквозь нижнюю часть стекол)? Предположите, что линзы находятся от глаз на расстоянии 3 см.

В последнее время для коррекции дефектов зрения стали использовать контактные линзы, помещающиеся непосредственно на роговицу. Из-за различия в расположении линз и очков относительно глаз получают различные фокусные расстояния (оптические силы) корректирующих зрение устройств. В этом можно убедиться, решая следующие задачи.

Задача 39.17. Левый глаз человека может отчетливо различать предметы только на расстоянии от 18 до 36 см. Какой оптической силы контактная линза необходима ему? Каким при этом будет для него расстояние наилучшего зрения?

Задача 39.18. Одна из линз в очках близорукого человека имеет фокусное расстояние -22 см и находится на расстоянии 1,6 см от глаза. Каким

должно быть фокусное расстояние контактной линзы для этого глаза, если человек решил заменить очки контактными линзами?

Задача 39.19. Будет ли близорукий человек, носящий контактные линзы, отчетливо видеть под водой? Свой ответ обоснуйте, построив ход лучей.

Особенности зрения человека

Поле зрения глаза человека называется пространство, в пределах которого видны все его точки при фиксированном положении глаза. Поле зрения глаза, соответствующее наиболее чувствительной к свету части сетчатки — желтому пятну, невелико. На этом поле одновременно может проецироваться

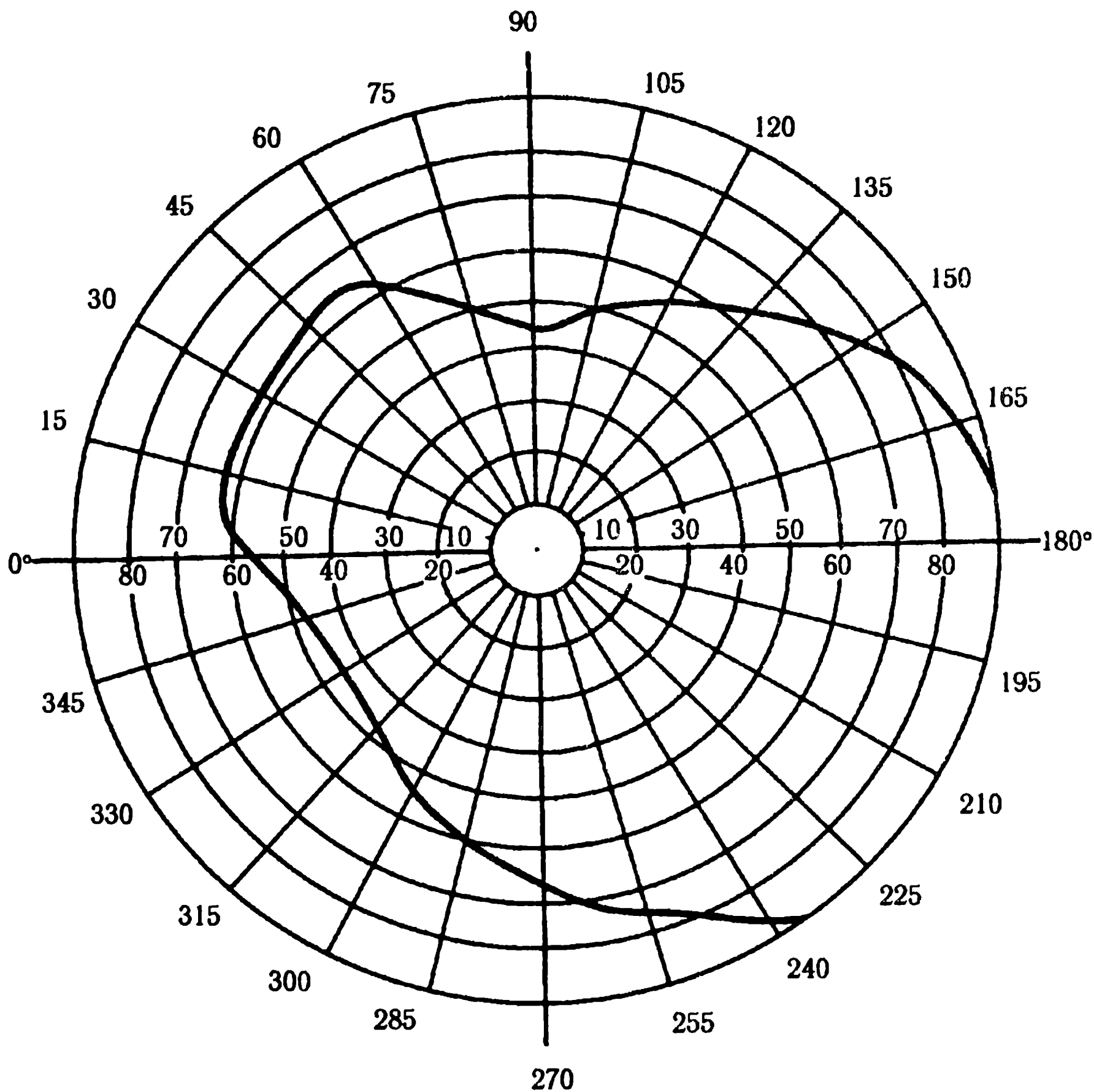


Рис. 11.8

картина с угловым размером около 6° по горизонтальному направлению и около 4° — по вертикальному. Поле центральной ямки еще меньше — около 1° по вертикали и горизонтали. Такая ограниченность поля ясного зрения компенсируется, однако, тем, что живой глаз обладает способностью быстро поворачиваться в глазной впадине, за очень короткое время обегая все точки видимой поверхности рассматриваемого большого объекта. Благодаря этому поле ясного видения расширяется примерно до 150° по горизонтали и до 120° по вертикали (рис. 11.8). При этом человек оказывается способным воспринимать широкое поле с малым количеством деталей и небольшой участок поля (соответствующий желтому пятну) с большим количеством деталей. Последнее обстоятельство очень важно с точки зрения безопасного существования человека, так как позволяет в каждый момент времени фиксировать внимание на небольшом количестве объектов, одновременно менее детально ориентируясь (не выпуская из поля зрения окружающие предметы). Отмечено, что с возрастом поле зрения человека увеличивается. Особенно резко этот процесс происходит в детском возрасте: например, за период от 6 до 7,5 лет поле зрения ребенка возрастает в 10 раз [63, 101].

Следующей важной особенностью зрения человека является его бинокулярность, т.е. зрение двумя глазами. Хотя само по себе зрение двумя глазами — норма для живого мира на Земле, у человека оно имеет специфическую особенность: за счет уменьшения расстояния между глазами происходит перекрывание их полей зрения, обеспечивающее в конечном счете стереоскопичность зрения человека. Благодаря этой особенности человек имеет возможность оценивать расстояние до наблюдаемого объекта. Действительно, желтое пятно расположено несколько в стороне от места пересечения сетчатки с оптической осью глаза. Поэтому, фиксируя глаз на каком-либо предмете, мы произвольно направляем на него не оптическую ось глаза, а прямую, проходящую через узловую точку глаза и центр желтого пятна. Получившаяся линия называется прямой зрения. При зрении двумя глазами оба наших глаза поворачиваются так, чтобы через предмет прошли прямые зрения обоих глаз. Изображения объектов, оказавшихся как ближе, так и дальше рассматриваемого, кажутся при этом двойными. По углу поворота глаз производится оценка расстояния до предмета.

При рассматривании объекта, лежащего, например, на прямой зрения левого глаза, правый глаз поворачивается на угол φ , называемый углом параллакса. Угол φ связан с расстоянием l до объекта соотношением $l = \frac{b}{\varphi}$, где b — расстояние между угловыми точками обоих глаз. Стереоскопическое зрение имеет место для угла параллакса, большего чем $1'$, хотя у некоторых людей этот предел достигает $10''$.

Задача 39.20. Оцените расстояние до объекта, угол параллакса которого составляет $1'$.

Решив задачу, получаем $l = 220$ м. Таким образом, можно утверждать, что стереоскопический эффект имеет место при рассматривании предметов, находящихся на расстоянии не более 220—250 м. О больших расстояниях мы можем судить по ряду косвенных признаков: по видимым угловым размерам знакомых предметов, по количеству различаемых деталей и т.д.

С особенностью зрения двумя глазами связан эффект «борьбы полей зрения». Он заключается в следующем. Когда на идентичные участки сетчатки правого и левого глаз попадают различные изображения, человек видит лишь одно из них, а не суммарный эффект.

Вообще, процесс зрения представляет собой очень сложный акт, в ходе которого определенную роль играют память, восприятие других органов и т.д. В ряде случаев воспринимаемые геометрические соотношения между объектами не соответствуют их действительным геометрическим соотношениям.

Мозг как бы корректирует работу глаз, и это понятно: живое существо нуждается в правильном представлении об окружающем мире, а не в правильных оптических изображениях. Особенно важна корректирующая роль мозга при пространственном восприятии.

Одним из наиболее существенных проявлений этого вмешательства мозга в работу глаз является выпрямление изображений, полученных на сетчатке глаза.

Задача 39.21. Какое изображение по качеству и размеру получается на сетчатке глаза человека с нормальным зрением? Предмет расположен на расстоянии ясного видения, его высота 5 см.

В том, что мозговая корректировка существует, свидетельствуют также многочисленные примеры «ошибок», или «обманов зрения» (рис. 11.9—11.11).

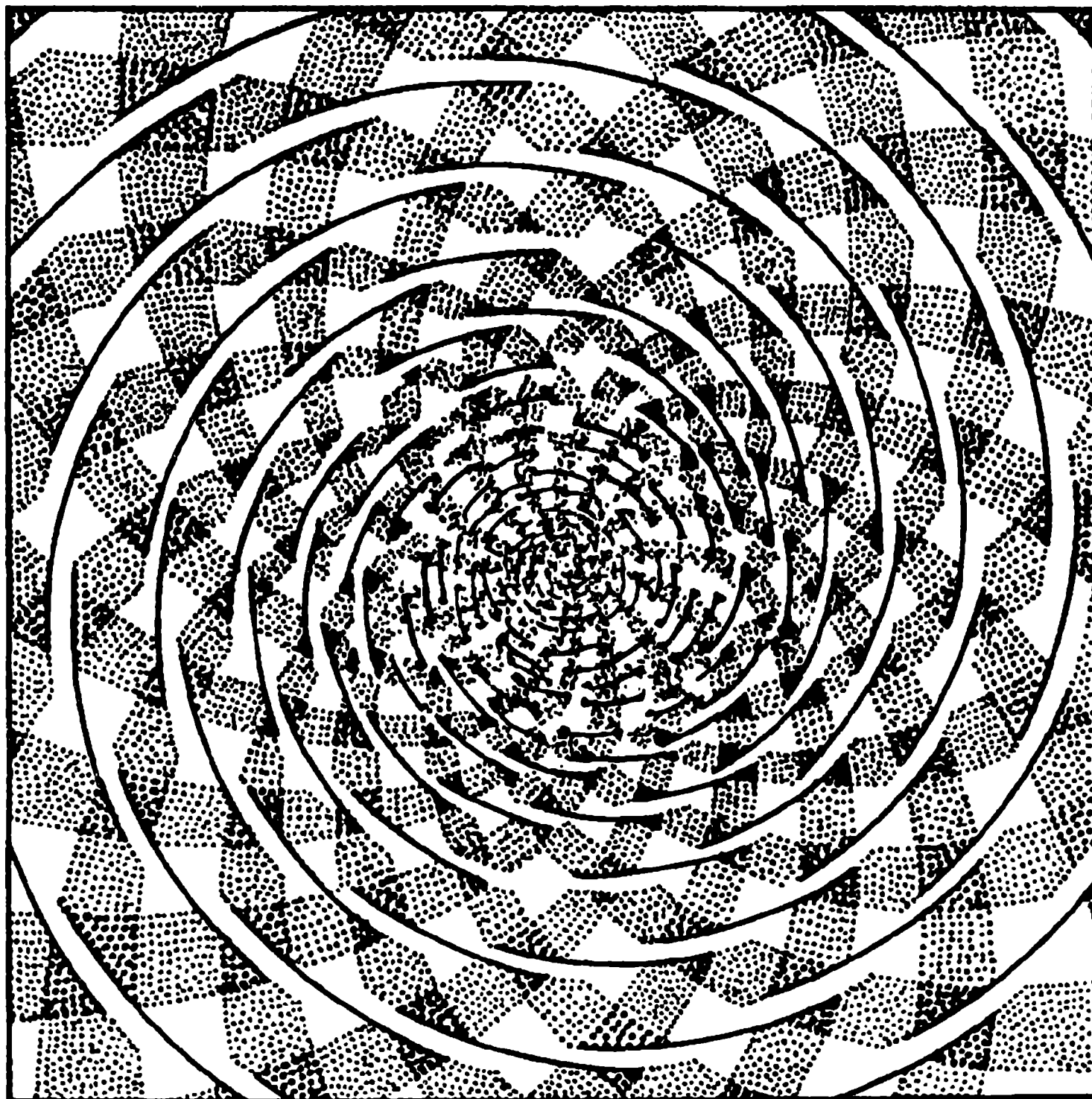


Рис. 11.9

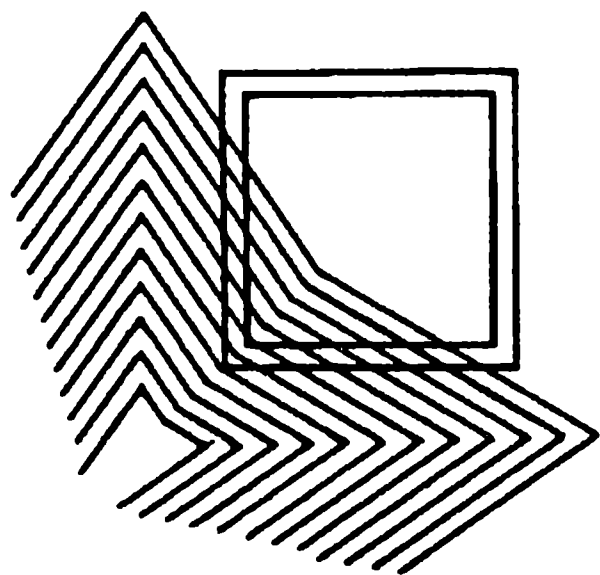


Рис. 11.10

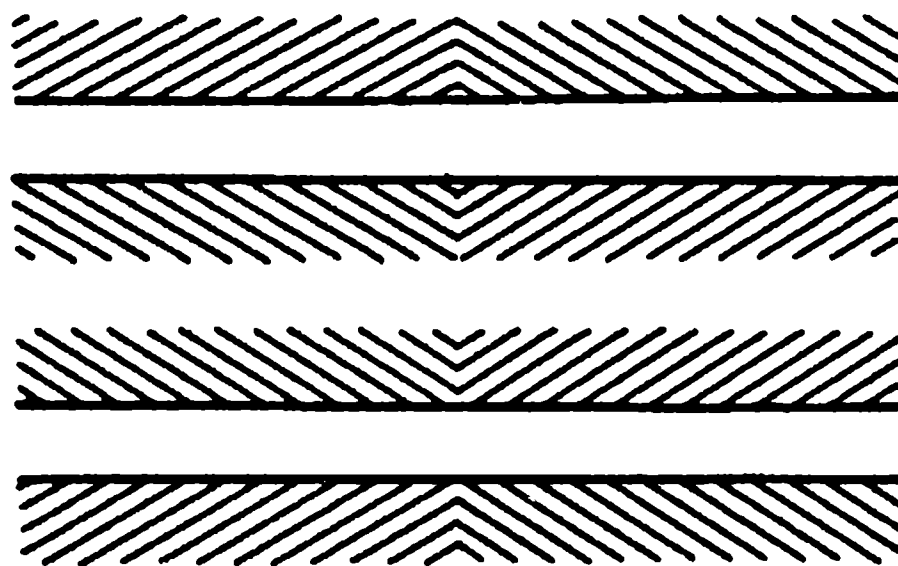


Рис. 11.11

Разрешающая способность глаза человека Две близкие светящиеся точки глаз воспринимает отдельно при условии, что угловое расстояние между ними не меньше определенного предела, называемого разрешающим угловым расстоянием. Его можно оценить.

Задача 39.22. Оцените разрешающее угловое расстояние глаза человека.

Р е ш е н и е

Разрешающее угловое расстояние глаза $d\varphi$ равно углу, под которым из задней узловой точки виден отрезок прямой, соединяющей две соседние колбочки на центральной ямке сетчатки. Если длина отрезка dx , то

$$d\varphi = \frac{dx}{f},$$

где $f = 17$ мм — фокусное расстояние глаза.

Можно положить, что $dx = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м, тогда

$$d\varphi = \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{17 \cdot 10^{-3}} = 0,147 \text{ рад} = 30''.$$

И действительно, наблюдения показали, что для нормального глаза $d\varphi$ несколько меньше $1'$. Кроме того, приведенная оценка совпадает с той, которую можно получить на основе дифракционных соотношений.

Разрешающей способностью глаза называется величина, обратная разрешающему угловому расстоянию. За единицу остроты зрения принимается острота зрения такого глаза, который разрешает угол в $1'$. Это в среднем острота нормального глаза.

Задача 39.23. На каком расстоянии друг от друга должны находиться два человека, чтобы глаз смог разделить их увидеть с расстояния 11 км?

Задача 39.24. Может ли нормальный человеческий глаз видеть отдельными две фары грузовика, разнесенные на 1,8 м, с расстояния 10 км? На каком наибольшем расстоянии фары могут еще восприниматься отдельно?

Известны случаи феноменально высокой остроты зрения. Так, описан случай, когда острота зрения человека достигала 30 единиц. Этот человек невооруженным глазом видел спутники Юпитера, которые нормальным глазом можно увидеть только в телескоп [65, 209].

А вот другой пример. Женщина, прозванная «живым микроскопом», обладает глазами столь высокой разрешающей способности, что ей даже трудно читать — мешают отлично видимые переплетения бумажных волокон. Цветной телевизор она вообще не может смотреть: изображение на

экране распадается на множество точек. У женщины необычное хобби: карандашом с особо прочным грифелем она наносит тексты литературных произведений на страницы крошечных тетрадей. Последний ее «шедевр» — почтовая открытка, на которой уместилось 327 тыс. слов, что примерно составляет восемьсот страниц машинописного текста [65, 210].

Задача 39.25. Каково угловое разрешение глаза с остротой зрения 30 единиц?

В литературе широко обсуждается явление повышения разрешающей способности глаз космонавтов, находящихся на околоземной орбите. И наши, и американские космонавты проявили способность видеть такие подробности на поверхности Земли, как суда в океане, трубы домов, автобусы на шоссе и т.д. Отмечалась у них и повышенная чувствительность на изменение яркости изображения. Было высказано много гипотез, объясняющих психофизиологические особенности зрительного восприятия в космосе. По одной из них, атмосфера играет роль самофокусирующейся увеличительной газовой линзы разной толщины в зависимости от того, где находится создающий линзу слой воздуха: над летним или зимним полушарием. В атмосферной линзе имеются неоднородные включения. Большинство из них — облака, туман, дымки и т.д. — ухудшает прозрачность атмосферы. Меньшая же часть неоднородностей, возникающих, например, в горных районах, в несколько раз повышает зоркость космонавтов [65, 209].

Цветное зрение Важное свойство зрительного восприятия человека — видение в цвете — объясняет теория цветного видения. Эта теория исходит из того, что в глазу есть три типа светочувствительных приемников, отличающихся друг от друга разной чувствительностью к разным частям спектра — красной, зеленой и сине-голубой. Цветовое ощущение возникает в колбочках. Пока не установлено, имеются ли приемники всех трех типов в каждой колбочке или существуют три различных вида колбочек.

Глаз обычного человека может различать около 160 цветов [10, 101]. Тренированный глаз художника и красильщика в состоянии различить свыше 10 000 цветных тонов [65, 26].

Встречаются люди (более 1% мужчин и около 0,1% женщин), зрение которых характеризуется отсутствием при-

емников одного из указанных выше типов. Еще реже (примерно один на миллион) встречаются люди, у которых есть приемники лишь одного типа. Первая группа людей — дихроматы — различают меньше цветов, чем люди с нормальным зрением; вторая — монохроматы — совсем не различают цвета [37, 140].

Для получения цветового ощущения важен не только спектральный состав отраженного или испускаемого наблюдаемым объектом света, но и мощность излучения других расположенных рядом предметов.

Цвет многое значит в нашей жизни. Механизм цветового воздействия пока неясен, хотя накоплено множество интересных экспериментальных фактов. Известно, что красный цвет возбуждает, черный угнетает, зеленый успокаивает, желтый создает хорошее настроение.

Способность человеческого организма реагировать на цвет — основа одного из направлений натуртерапии — лечения природными средствами. Доказано, что черный цвет может замедлить течение инсульта и малярии, красный помогает при лечении бронхиальной астмы, кори, рожистых заболеваний кожи, голубой замедляет пульс и понижает температуру. Больным глаукомой полезно носить очки с зелеными стеклами, а гипертоникам — с дымчатыми. Исследования показали, что при красном свете снижается слуховая чувствительность человека, а при зеленом отмечено ее повышение. «Холодные» тона стимулируют белковый обмен, а «теплые», наоборот, тормозят. Если школьный класс окрасить в белый, бежевый или коричневый тона, то улучшится успеваемость и дисциплина учащихся. В производственных помещениях, окрашенных в голубой и бежевый цвета, повышается производительность труда [65, 26].

Кривая видности Глаз человека по-разному реагирует на свет различной длины волны. Чувствительность глаза к излучению различных длин волн характеризуется так называемой кривой видности. На рисунке 11.12 приведена кривая видности среднего нормального глаза (1). По оси абсцисс отложены длины волн λ , доступные зрительному восприятию человека (от 400 до 760 нм), а по оси ординат — относительная световая эффективность $V(\lambda)$. Кривая имеет максимум при 555 нм, условно принимаемый за единицу. Подсчитано, что при $\lambda = 400$ нм $V(\lambda)$ в 2500 раз, а при $\lambda = 760$ нм в 20 000 раз меньше, чем при

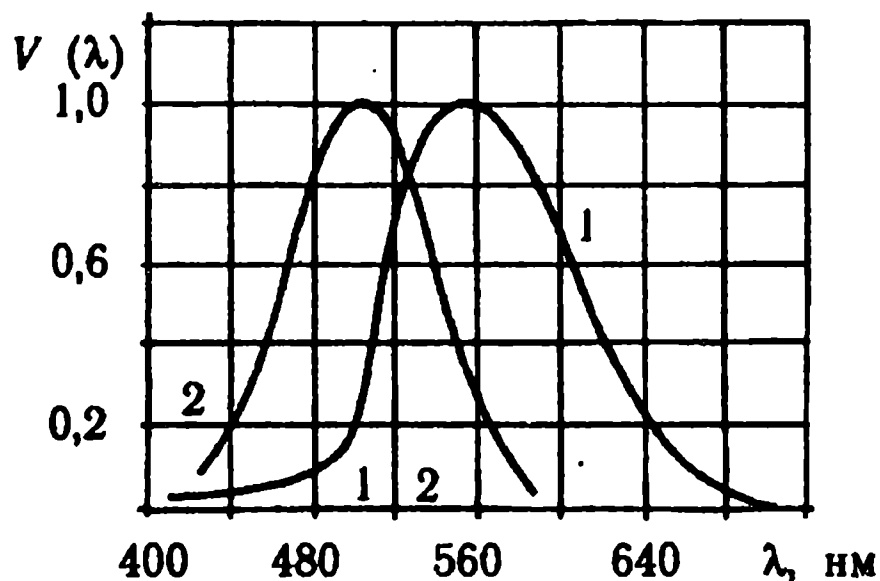


Рис. 11.12

$\lambda = 555$ нм. Это значит, что источник фиолетового света должен быть в 2500 раз более мощным, чем источник желто-зеленого, чтобы создаваемые ими освещенности казались человеческому глазу одинаковыми. В той же ситуации источник красного света должен быть в 20 000 раз более мощным.

Границы видимой области, а также сама кривая видности глаза человека не случайны. Глаз сформировался в процессе длительной эволюции, приспособившись к условиям освещенности земных предметов солнечным светом. На эту мысль наводит то обстоятельство, что на видимую область спектра приходится более 40% энергии излучения Солнца (см. гл. 12), хотя размеры этой области невелики.

Сумеречное зрение

Сумеречное зрение, или зрение при освещенности менее 0,01 лк, осуществляется за счет одних только палочек: они обладают гораздо большей чувствительностью к свету, чем колбочки, хотя не способны, как колбочки, различать цвета. Разрешающая способность глаза человека при сумеречном зрении понижается примерно в 10 раз по сравнению с дневным. Это объясняется тем, что палочки находятся на периферии сетчатки и расположены гораздо менее плотно, чем колбочки в области желтого пятна. Целесообразность этого вида зрения заключается в увеличении чувствительности глаза в условиях плохой освещенности. Обладающее этим свойством существо, безусловно, имеет большие шансы на выживание, так как его способность к ориентации в пространстве гораздо меньше зависит от времени суток. Ухудшение разрешающей способности, происходящее при

этом, компенсируется возможностью усиления сигнала, передающегося по нервным волокнам от палочек в мозг, за счет соединения этого волокна не с каждой палочкой в отдельности, а с целой их группой.

Кривая видности глаза при сумеречном видении оказывается смещенной влево по оси длин волн (см. рис. 11.12, кривая 2).

Обусловленность свойств зрения человека условиями окружающей среды

Человек живет в трехмерном мире, и зрение приспособилось к восприятию именно трехмерного пространства. Двумерность воспринимается поверхностью сетчатки, а глубина изображения (стереоскопичность) обусловлена бинокулярностью.

Зрение человека цветное, потому что в цвете закодирована дополнительная к черно-белому изображению информация, владение которой делает человека менее уязвимым со стороны окружающей среды.

Даже сам диапазон электромагнитных волн, с помощью которого человек воспринимает окружающий мир, обусловлен фактором, главенствующим во внешней среде, — излучением Солнца.

Почему глаз реагирует на видимый диапазон длин волн?

Человек видит в результате того, что его глаз поглощает отраженное окружающими предметами солнечное излучение. Понятно, что глаз должен быть максимально приспособлен к восприятию именно солнечного света. Спектр излучения нашего светила таков, что максимум интенсивности его излучения приходится на длину волны 0,55 мкм (см. задачу 41.5). Поэтому наиболее подходящей для использования с энергетической точки зрения должна быть область вблизи этой длины волны. При этом интервал длин волн должен быть таким, чтобы на него приходилась значительная часть полной энергии излучения Солнца.

Бóльшие длины волн — микроволны и радиоволны — плохо подходят для этой роли, хотя на их долю приходится 50% излучаемой Солнцем энергии (см. гл. 12). Действительно, с ростом длины волны происходит ухудшение качества зрения, так как при этом уменьшается разрешающая способность всех оптических приборов, в том числе и глаза. Кроме того, увеличение длины волны требует увеличения геометрических размеров приемных устройств, в том числе и биологических элементов, связанных со зрением. Это, безусловно, отрицательный фактор в естественном отборе, осуществляющемся в процессе эволюции.

Однако главная причина непригодности микроволнового диапазона для зрения связана с корпускулярными свойствами электромагнитного излучения и существованием больших «шумов» в этом диапазоне, делающих невозможным зрение глазами, температура которых порядка температуры тела человека и окружающих предметов. Строгое доказательство этого факта можно найти в главе 12.

Что касается коротковолнового излучения, то оно испытывает сильное поглощение в атмосфере Земли (табл. 11.2), поэтому его применение энергетически невыгодно.

Таблица 11.2

Доля энергии излучения Солнца, достигающая поверхности Земли

Диапазон длин волн, мкм	Энергия излучения, %	
	у поверхности Солнца	у поверхности Земли*
0,3—0,4	5	1
0,4—0,75	52	40
0,75—2,3	43	59

За 100% принята энергия, приходящаяся на весь диапазон длин волн (от 0,3 до 2,3 мкм).

Кроме того, с уменьшением длины волны заметнее проявляются корпускулярные свойства излучения, что должно принципиально изменить весь механизм зрительного восприятия.

Таким образом, наиболее подходящим для зрения оказывается диапазон длин волн, называемый видимым: с 0,4 до 0,76 мкм. На него приходится максимум энергии излучения Солнца. Излучение соответствующей длины волны свободно проникает через атмосферу, его приемник может быть не слишком велик, чтобы возникли проблемы с его функционированием.

Человеческий глаз — совершенный оптический прибор

Зрение — одно из важнейших качеств живущих на поверхности Земли существ — от простейших до самых сложных. Глаз человека — результат длительного эволюционного процесса. Путь создания природой самого совершенного оптического прибора, каким является человеческий глаз, проследил в своей книге «Глаз и солнце» С.И.Вавилов [66, 78].

Глаз человека обладает несколькими свойствами, не имеющими аналогов у других живых существ на Земле: это бинокулярное восприятие глубины и способность к дневному и ночному зрению.

Ученые часто считают глаз выдвинутой вперед частью головного мозга, своего рода «окном» в сознание. С этим трудно не согласиться: ведь сетчатка и зрительный нерв представляют собой вещество со свойствами вещества мозга. Сеть кровеносных сосудов, питающих глаз, почти в 2 раза больше, чем в любом другом органе. Процесс создания зрительных образов начинается в глазу и продолжается в мозге человека.

Совершенство глаза как оптического прибора проявляется и в его размерах: столь сложное устройство разместилось в очень малом объеме — примерно $5,76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Задача 39.26. Оцените объем глаза человека.

Гениальность конструктора-природы проявилась при создании глаза человека также в том, что здесь она достигла оптимального согласования различных элементов. Это означает, что в глазу нет ничего лишнего, все возможности, предусмотренные природой, используются. Имеющее место дублирование функций различных систем (например, обеспечение высокой разрешающей способности) определяет надежность устройства, без чего невозможна его длительная и безотказная работа, участие в естественном отборе и развитие. Можно утверждать, что природа, создавшая столь совершенное устройство, намного превзошла конструкторские достижения самого человека.

В ходе изучения темы можно рекомендовать провести по крайней мере две лабораторные работы, отличающиеся по содержанию от традиционных антропометрической направленностью: «Изучаем зрение человека» и «Определение характеристических параметров зрения человека» (см. Приложение).

§ 40. Фотометрия. Распространение света

Фотометрия При изучении этой части курса необходимо отметить несколько моментов, в которых связь человек и физика приобретает особое звучание. Эти моменты таковы.

Воздействие света на глаз состоит прежде всего в передаче ему энергии излучения. Однако, как было показано в § 39,

реакция глаза зависит не только от энергии, переносимой светом, но и от его спектрального состава. Видимое излучение принято характеризовать по световому или зрительному ощущению, оцениваемому по воздействию света на глаз человека. Вся фотометрия, основанная на этом принципе, есть яркое проявление антропоцентрического характера процесса познания, поскольку предметом изучения этой физической дисциплины являются не объективно характеризующие физическое явление энергетические величины, а величины, используемые для описания зрительного восприятия мира человеком.

Глаз человека сформировался и эффективно работает в условиях достаточно высокой освещенности поверхности Земли солнечными лучами. Освещенность данной точки поверхности планеты не остается постоянной: она изменяется в зависимости от времени года, времени суток, состояния атмосферы.

Задача 40.1. Какова максимальная освещенность поверхности Земли прямыми солнечными лучами?

Задача 40.2. Освещенность Земли прямыми солнечными лучами составляет около 10^5 лк. Оцените силу света и световой поток, испускаемый Солнцем.

Задача 40.3. Найдите яркость Солнца, зная, что в ясный день прямое падение солнечного излучения создает на поверхности, перпендикулярной направлению на Солнце, освещенность $7 \cdot 10^4$ лк. Поглощением и рассеянием лучей в атмосфере пренебречь.

Задача 40.4. Высота Солнца изменяется от угла φ_1 до угла φ_2 . Как изменится освещенность поверхности Солнца?

Задача 40.5. По одному из космических проектов предлагается построить вокруг Солнца замкнутую сферу для более полного улавливания излучаемой им энергии. Во сколько раз освещенность точек сферы будет больше освещенности поверхности Земли, если расположить сферу на вдвое большем расстоянии, чем расстояние от Земли до Солнца?

Освещенность поверхности Земли солнечным светом — важный эволюционный фактор. Действительно, жизнь человека сильно зависит от растительного мира, а фотосинтез растений требует определенных условий освещенности. Установлены предельные границы освещенности, необходимой для активного фотосинтеза: $(0,02—30) \cdot 10^4$ лк [34, 26].

Глаз человека хорошо приспособился к освещенностям, меняющимся в очень широких пределах: от примерно 10^5 лк (при освещенности прямыми солнечными лучами) до 10^{-6} лк (полная темнота). Механизм приспособления глаза к изменениям освещенности, составляющим 12 порядков, таков.

Изменяя диаметр зрачка, глаз человека может регулировать световой поток, поступающий в глаз, только в диапазоне 1:10. Более эффективно на изменение освещенности реагирует в процессе адаптации сетчатка [37, 143].

Задача 40.6. Оцените границы интервала изменений светового потока, воспринимаемого глазом человека.

Рассеяние света Процесс рассеяния сводится к генерации вторичных волн молекулами или частицами среды под действием падающего на них излучения. Характер рассеяния зависит от соотношения между длиной волны и размерами частиц. Если линейные размеры частицы меньше, чем длина волны, рассеяние происходит по закону Рэлея: мощность рассеянного излучения обратно пропорциональна четвертой степени длины волны.

Закон Рэлея представляет для нас интерес потому, что с его помощью объясняется цвет неба и зорь на нашей планете.

Задача 40.7. Почему небо голубое?

Р е ш е н и е

При наблюдении неба днем в глаз наблюдателя попадает рассеянное частицами атмосферы излучение Солнца. Поскольку интенсивнее рассеиваются световые волны меньшей длины волны, то спектр рассеянного света будет сдвинут в сторону более коротких длин волн; поэтому цвет неба оказывается голубым. Вне земной атмосферы небо будет представляться черным, при этом в глаз будут попадать лишь прямые лучи от звезд.

Задача 40.8. Какого цвета небо на Венере?

Р е ш е н и е

В гораздо более плотной, чем земная, атмосфере Венеры сильно ослабляется идущая от Солнца коротковолновая часть видимого спектра. Это значит, что в цветах неба и поверхности планеты будут отсутствовать голубые, синие и фиолетовые тона. Небо Венеры будет желтым, а пейзаж — оранжево-зеленоватым.

Полученные с помощью зондов автоматических межпланетных станций «Венера-13» и «Венера-14» цветные изображения панорамы Венеры подтверждают наши рассуждения: небо планеты желтое.

Задача 40.9. Возможна ли радуга на Венере?

Задача 40.10. Какого цвета небо на Марсе?

Р е ш е н и е

Поскольку Марс имеет очень разреженную атмосферу, плотность которой резко убывает с высотой, можно ожидать, что на Марсе небо будет голубым в пределах нескольких градусов над горизонтом, а остальная его часть будет черной.

В научно-фантастических романах, описывая другие миры, писатели часто рассуждают о цветах неба той или иной планеты. Оказывается, в этом вопросе решающее значение имеют законы физики, а не произвол автора.

Задача 40.11. Подберите в понравившемся вам научно-фантастическом произведении место, где говорится о цвете неба планеты, на которой разворачиваются описываемые события. Как, по-вашему, правдоподобен с физической точки зрения этот цвет?

Ясно, что не только рассеяние, состав и плотность атмосферы определяют цвет неба планеты. Здесь важен источник света: сила света, спектральный состав излучения. Может сыграть роль количество этих источников (если у планеты несколько солнц).

Рассеяние света определяет также цвет Солнца и облаков.

Задача 40.12. Как объясняется красный цвет неба на закате и восходе? желтый цвет Солнца в зените?

Задача 40.13. Почему облака кажутся белыми, а тучи темно-серыми?

Р е ш е н и е

Белый цвет облаков (серый в тени) объясняется тем, что закон Рэля справедлив лишь для небольших частиц, чьи размеры сравнимы с длиной волны. Такие размеры имеют молекулы кислорода, азота. Но облака содержат капельки воды и кристаллы льда, размеры которых много больше длины волны. Такие частицы рассеивают свет почти равномерно на всех частотах. Поэтому облака и кажутся белыми (серыми в тени) [2, 453].

**Поглощение
солнечного света
атмосферой
Земли.**

**Парниковый
эффект**

Атмосфера Земли пропускает далеко не все излучение Солнца. До поверхности Земли не доходят гамма-лучи, рентгеновские, короткие ультрафиолетовые. Основным защитным слоем атмосферы от этих смертоносных для всего живого излучений является озоновый слой. Молекулами водяного пара атмосферы поглощаются волны, лежащие на стыке инфракрасных и радиоволн. Длинные радиоволны отражаются от ионосферы.

В земной атмосфере есть только два окна, через которые к поверхности планеты проходит электромагнитное излучение. Одно из них пропускает видимое излучение и частично примыкающее к нему инфракрасное и ультрафиолетовое. Второе окно пропускает радиоволны с длиной волны от 1 см до 20 м. Именно через первое окно проникает излучение Солнца, делающее возможным саму нашу жизнь.

Атмосфера играет роль фильтра не только для излучения, приходящего к нашей планете из космоса. Она влияет и на прохождение излучения самой Земли. С этим процессом связан так называемый парниковый эффект, состоящий в том, что нагретая солнечными лучами поверхность планеты испускает инфракрасное излучение, основная часть которого не выходит за пределы атмосферы, а поглощается благодаря присутствию углекислого газа. (Слой углекислого газа играет роль крыши парника, не позволяющей теплу рассеиваться.) Температура нижних слоев атмосферы и поверхности планеты оказывается значительно выше той, которая была бы, не будь в воздухе атмосферы такого количества CO_2 . Неразумная хозяйственная деятельность людей приводит к непрерывному увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере Земли, что чревато для человечества многими неприятностями.

В сочетании с разрушением озонового слоя атмосферы планеты, имеющего также антропогенный характер, все более проявляющиеся следствия парникового эффекта могут поставить на грань катастрофы человеческую цивилизацию.

Глаз и волновые свойства света Может ли человек без специальных приборов наблюдать такие проявления волновых свойств света, как поляризация, дифракция и интерференция?

Про интерференцию ответ тривиален.

Дифракционные явления наблюдать можно (см., например, [86, 57]). Собственно, именно дифракция устанавливает предел разрешающей способности глаза человека.

Задача 40.14. Оцените разрешающую способность человеческого глаза, учитывая дифракцию.

Р е ш е н и е

Разрешающее угловое расстояние из дифракционных соображений оценивается формулой $\Theta = \frac{1,22\lambda}{D}$, где λ — длина волны света; D — диаметр зрачка.

При $\lambda = 555$ нм, диаметре зрачка $D = 4$ мм получаем

$$\theta = \frac{1,22 \cdot 555 \cdot 10^{-9}}{0,004} = 1,67 \cdot 10^{-4} \approx 35''.$$

Этот результат хорошо согласуется с физиологической оценкой разрешающей способности глаза (см. задачу 39.22).

Глаз у большинства людей не обладает способностью отличать поляризованный свет от неполяризованного. Это объясняется тем, что электрические оси молекул родопсина в плоскости фоторецепторной мембраны расположены хаотически. Лишь очень небольшая часть людей обладают этим свойством, не подозревая о нем. Желающих выяснить, чувствительны ли их глаза к поляризованному свету, отсылаем к книге М. Миннарта «Свет и цвет в природе» [78, 200].

Наличие в школе лазера сильно облегчает постановку демонстраций и проведение лабораторных работ по оптике. В связи с изучением дифракции можно показать с помощью лазера опыт по дифракции на нити, в качестве которой использовать человеческий волос. Можно даже определить его толщину по характерным размерам дифракционной картины.

Глава 12

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

§ 41. Тепловое излучение

Гуманитарное рассмотрение идей квантовой физики

Основными положениям квантовой физики являются представления о квантовом характере излучения, переноса и поглощения энергии, о квантово-волновом дуализме, о волновой функции и т.д. Математическими выражениями основополагающих идей для квантовой физики служат уравнения Шредингера, формула для длины волны де Бройля, соотношения неопределенностей Гейзенберга.

Предлагаем несколько примеров гуманитарного рассмотрения идей квантовой физики.

Задача 41.1. Как соотносятся между собой энергии квантов инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений? Как каждая из них соотносится с энергией теплового движения молекул вещества при обычных температурах?

Задача 41.2. Чему равна связанная с человеком длина волны, когда он бежит со скоростью 10 м/с? Какой смысл имеет подобная длина волны?

Задача 41.3. Как изменились бы события, наблюдаемые в повседневной жизни, если бы постоянная Планка h внезапно возросла до 10^{-7} Дж·с?

Задача 41.4. Во что превратится квантовая физика при $h \rightarrow 0$?

«Современная» физика, о которой стали говорить после рождения квантовой теории и теории относительности А.Эйнштейна, послужила для человечества источником идей, переросших свой первоначальный характер частнонаучных проблем и превратившихся в общеметодологические, философские. Это принципы симметрии, соответствия, наблюдаемости, дополненности и т.д. При изучении связей физики и человека, особенно их биологического аспекта, интерес представляет принцип дополненности. Его ввел в 1927 г. Н.Бор.

Принцип
дополнительности
и его расширение
на нефизические
области знания

Математическим выражением принципа до-
полнительности является соотношение не-
определенностей Гейзенберга.

Гейзенберг, анализируя возможности из-
мерения координат и импульса электрона,
пришел к выводу, что условия, благопри-
ятные для измерения положения, затрудняют нахождение
импульса и, наоборот; в этом смысле понятия координаты
и импульса дополнительные друг другу.

Принцип дополнительности утверждает, что для объяс-
нения некоторых экспериментов следует использовать либо
волновые, либо корпускулярные представления об электро-
не, но не те и другие одновременно, хотя только их одновременный
учет дает полное понимание природы электрона. Позднее
ученым удалось расширить область применения принципа
дополнительности и на другие области знания. Так, аме-
риканский физик Дж.Хилер считал, что дополнительными
в смысле боровского принципа дополнительности являются
использование слова для передачи информации, с одной
стороны, и анализ смыслового значения — с другой.

Академик А.Б.Мигдал указывал на дополнительную физиче-
скую картину явления и его математического описания [87, 88].

Н.Бор, размышляя над применением понятия дополнитель-
ности в психологии, обнаружил, что дополнительными являются
мысли и чувства, истина и ясность. Кроме того, и это самое
важное для нас сейчас, Н.Бор показал дополнительную фи-
зико-химическую причинности и биологической целенаправлен-
ности, с помощью которых только и можно получить правильное
представление о биологии. Дополнительность этих подходов
в статье «Свет и жизнь» он доказал следующим образом:
«Непрерывный обмен веществ между организмом и окружа-
ющей средой необходим для поддержания жизни, вследствие
чего четкое выделение организма как физико-химической си-
стемы не представляется возможным. Поэтому можно считать,
что любая попытка провести резкую грань, позволяющую
осуществить исчерпывающий физико-химический анализ, вы-
зывает изменение обмена веществ в несовместимой для жизни
организма степени.» [87, 88].

Тепловое
излучение

Модельным представлением теории теп-
лового излучения является абсолютно чер-
ное тело. Хорошим приближением к нему
может служить Солнце. Мы уже не раз отмечаем значение
излучения нашего светила для жизни на Земле. Оказывается,

многие параметры его излучения можно рассчитать исходя из теории теплового излучения.

Задача 41.5 Чему равна длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца, если температура на его поверхности составляет 6000 К?

Представление об излучении Солнца как об излучении абсолютно черного тела поможет сделать следующие очень важные оценки.

Задача 41.6. Покажите, что на долю микроволнового излучения приходится почти 50% энергии излучения Солнца.

Задача 41.7. Какая часть энергии излучения Солнца приходится на видимую часть спектра электромагнитных волн?

Задача 41.8. Чему равна энергия, ежесекундно излучаемая каждым квадратным метром поверхности Солнца?

Задача 41.9. Считается, что Солнце в сутки теряет $3,6 \cdot 10^8$ т вещества. Проверьте эту оценку.

Задача 41.10. Найдите солнечную постоянную, т.е. энергию, посылаемую Солнцем ежеминутно через площадку в 1 м^2 , перпендикулярную к солнечным лучам и находящуюся от него на расстоянии, равном расстоянию от Солнца до Земли.

Задача 41.11. Солнечная постоянная равна 1350 Вт/м^2 . С какой скоростью Солнце уменьшает свою массу? Если эта скорость сохранится в будущем, то сколько времени Солнце еще будет существовать?

Задача 41.12. Плотность потока солнечного излучения, достигающего поверхности Земли (солнечная постоянная), составляет 1350 Вт/м^2 . Скольким фотонам, падающим ежесекундно на квадратный метр поверхности, соответствует это значение? Примите длину волны фотонов равной 555 нм.

Задача 41.13. Плотность потока излучения, приходящего на Землю, составляет 1350 Вт/м^2 . Какой поток излучения Земля получает от Солнца? Сколько энергии получила Земля за время своего существования (4,5 млрд. лет)?

Задача 41.14. Плотность потока солнечного излучения (солнечная постоянная) равна 1350 Вт/м^2 . Какое количество вещества в год достигает поверхности Земли? Можно ли сделать вывод, что Земля становится тяжелее?

Результаты решения последних задач с очевидностью свидетельствуют о том, что Земля получает очень малую часть энергии, излученной Солнцем. Между тем запасы этой энергии очень велики. Существуют проекты, и мы о них уже упоминали, в которых предполагается окружить Солнце сферой, полностью улавливающей излученную им энергию. Речь идет о так называемой сфере Дайсона. Предлагаем ряд задач, иллюстрирующих эту идею.

Задача 41.15. Сколько энергии будет приходить от Солнца на каждый квадратный метр сферы Дайсона, расположенной на расстоянии 2 а.е. от него?

Задача 41.16. Определите температуру теплопроводящей сферы, находящейся на расстоянии 2 а.е. от Солнца, считая ее абсолютно черной, а излучение равновесным.

Задачи на тепловое излучение Солнца так многочисленны и в методическом плане так разнообразны, что целесообразно посвятить целое занятие этой теме. Занятие можно назвать так: «Изучаем Солнце». Кроме решения задач и дискуссии о роли Солнца в жизни планеты, можно выполнить лабораторную работу «Определение солнечной постоянной» (см. Приложение).

Тепловое излучение Земли Проблема теплового баланса Земли рассматривалась в главе 7. Чтобы лучше понять происхождение длинноволнового инфракрасного излучения, уходящего от Земли в космическое пространство, рассмотрим следующие задачи.

Задача 41.17. Земля вследствие излучения в среднем ежеминутно теряет с каждого квадратного метра 5,4 кДж. При какой температуре абсолютно черное тело излучало бы такую же энергию?

Задача 41.18. Мощность излучения с поверхности Земли в космос принимается равной $9,1 \cdot 10^5$ Дж/(м²·с). Найдите излучательную способность поверхности Земли.

Задача 41.19. Чему равна яркостная температура дневного света?

Задача 41.20. Какую долю энергии, ежесекундно получаемой от Солнца, излучал бы земной шар, если бы поверхность везде имела температуру 0 °С, а коэффициент поглощения был бы равен 1?

Задача 41.21. Считая, что атмосфера поглощает 10% энергии излучения Солнца, найдите мощность, получаемую от Солнца горизонтальным участком земли площадью 0,5 га. Высота Солнца над горизонтом равна 30°.

Задача 41.22. Зная солнечную постоянную для Земли, найдите солнечную постоянную для Марса.

Задача 41.23. Оцените температуру, до которой нагрелась бы поверхность Земли, если бы она поглощала солнечное излучение как абсолютно черное тело. Считайте, что в результате суточного вращения Земли температура ее поверхности всюду одинакова.

Глаз человека как абсолютно черное тело Другим важным примером абсолютно черного тела является глаз человека.

Задача 41.24. Почему глаз человека можно рассматривать как модель абсолютно черного тела?

Задача 41.25. К излучению какой длины волны наиболее чувствителен глаз человека?

Задача 41.26. Оцените энергию, которую излучают зрачки человека за час.

Высокая чувствительность глаза человека к падающему свету позволила С.И.Вавилову в опытах со зрением человека подтвердить квантовый характер света. Так, он установил, что порог зрительного раздражения глаза человека на длине волны 555 нм равен $2,1 \cdot 10^{-13}$ Дж/(с·м²).

Задача 41.27. Скольким квантам соответствует порог зрительного раздражения глаза человека?

Задача 41.28. При определенных условиях сетчатка глаза человека может регистрировать всего лишь 5 фотонов света с длиной волны 555 нм. Чему равна соответствующая энергия, воспринимаемая сетчаткой, в электронвольтах? Какая энергия поступает в глаз, если он каждую секунду поглощает 5 таких фотонов?

Задача 41.29. Докажите, что высокая чувствительность глаза человека к инфракрасному излучению сделала бы его работу невозможной.

Р е ш е н и е

Мощность излучения стенки глаза внутрь глазной полости составляет $P = \frac{W}{t} = \sigma ST^4$.

Для $T = 310$ К, $S = 17 \cdot 10^{-4}$ м² и $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) получаем $P = 0,89$ Вт.

Мощность прямого солнечного излучения через зрачок

$$P_1 = A\pi r^2,$$

где A — солнечная постоянная; r — радиус зрачка.

Тогда $P_1 = 1400 \cdot 3,14 (2 \cdot 10^{-3})^2$ Вт = 0,017 Вт.

Получили, что мощность собственного излучения глаза в 50 раз больше мощности попадающего в глаз солнечного излучения. Если бы чувствительность глаза в инфракрасной области была бы столь же высока, что и в видимой, то собственное инфракрасное излучение глаза затмило бы не только рассеянное излучение неба, но и прямой солнечный свет. Работа глаза как органа зрения стала бы невозможной.

**Теплообмен
организма
человека с
окружающей
средой**

Рассмотрим еще несколько задач, иллюстрирующих приложения теории теплового излучения к процессам теплообмена организма человека с окружающей средой (см. гл. 7).

Задача 41.30. На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости тела человека?

Задача 41.31. Оцените мощность, излучаемую телом человека при температуре $t = 36$ °С, принимая его за серое тело с коэффициентом поглощения $\alpha = 0,9$.

Задача 41.32. В состоянии покоя каждый килограмм тела человека каждую секунду выделяет количество теплоты, равное 0,8 Дж. Почти вся эта энергия уходит в виде излучения. Чему равна поглощательная способность

Задача 41.33. Оцените приближенное значение энергии солнечного излучения, которое человек с площадью поверхности $1,5$ м² поглощает в течение 1 ч, если солнечные лучи падают на него в ясный день под углом 40° к вертикали. Считайте, что испускательная способность тела $a = 0,8$.

Задача 41.34. Ньютон установил, что скорость остывания изолированного тела прямо пропорциональна разнице температур между телом и его окружением, т.е. $\frac{Q}{t} \approx (T_2 - T_1)$. При этом считается, что потеря энергии происходит исключительно за счет излучения.

Покажите, что этот закон следует из формулы $P = \sigma Sa(T_2^4 - T_1^4)$ при $T_1 \approx T_2$ (a — испускательная способность тела).

Задача 41.35. Сколько времени будет остывать тело человека?

Задача 41.36. На сколько сместится максимум спектральной плотности энергетической светимости при изменении температуры тела человека от 30 до 31°C ? Тело человека считать абсолютно черным.

Задача 41.37. В медицине для диагностики ряда заболеваний получил распространение метод, называемый термографией. Он основан на регистрации различия теплового излучения здоровых и больных органов, обусловленного небольшим отличием их температур. Вычислите, во сколько раз отличаются абсолютные температуры и энергетические светимости участков поверхности тела человека, имеющих температуру $30,5$ и $30,0$ °С, соответственно.

Глава 13

ФИЗИКА ЯДРА. РАДИОАКТИВНОСТЬ

§ 42. Происхождение элементов. Химический состав живых организмов

Тема «Физика ядра» богата примерами, иллюстрирующими очень важные аспекты связи человек и физика. Мы обсудим только некоторые из них, интересные с точки зрения нашего подхода к гуманитаризации и мало освещенные в литературе. Вопросы ядерной медицины, воздействия радиоактивных излучений на живые организмы, проблема радиационной безопасности исчерпывающим образом рассмотрены в ряде книг и статей, к которым мы и отсылаем интересующихся (см., например, [55], [81], [82]).

Происхождение элементов Проблема происхождения тяжелых элементов также важна для науки, как и проблема происхождения жизни. Опытные данные, представленные в таблице 13.1, свидетельствуют о несовпадении распространенности химических элементов во Вселенной с их относительным содержанием в коре Земли и, что более существенно, в живых организмах.

Первое обстоятельство наука объясняет тем, что наша планета образовалась путем аккреции из внутренней части протооблака, окружающего Солнце, из которого возникли все планеты нашей системы. Поскольку эта часть облака была богата элементами, более тяжелыми, чем водород — самый распространенный элемент во Вселенной, — Земля оказалась состоящей из иного набора веществ. А откуда взялись элементы, составляющие нашу планету?

Сейчас установлено, что более тяжелые, чем гелий и водород, элементы образуются в недрах звезд в реакциях термоядерного синтеза. При этом по мере выгорания соответствующего горючего (водорода при образовании гелия, углерода при образовании кислорода и т.д.) происходит сжатие (коллапс) звезды и ее разогрев, включающий сле-

дующую термоядерную реакцию, приводящую к образованию все более тяжелых элементов. Эта цепь термоядерных реакций синтеза химических элементов заканчивается образованием ядер железа. Более тяжелые ядра не могут образоваться таким образом, так как при дальнейшем усложнении ядер путем присоединения к ним все новых нуклонов возникают неустойчивые радиоактивные изотопы, распадающиеся задолго до того, как к ним будет присоединен очередной нуклон.

Таблица 13.1

Относительное содержание основных химических элементов

Элемент	Содержание, %			
	Вселенная	Солнце	Растения	Человек
H	82	87	10	10
He	18	13	—	—
N	0,33	0,33	0,28	3,0
C	0,33	0,33	3,0	18
Mg	0,33	0,33	0,03	0,05
O	0,3	0,25	79	65
S	0,01	0,004	0,15	0,254
Fe	0,01	0,004	0,15	0,254
Si	0,01	0,004	0,15	0,254
Другие	0,001	0,04	7,5	3,7

Единственным местом образования ядер более тяжелых элементов, чем железо, могут служить оболочки сверхновых звезд. По представлениям современной науки [37, 77], при взрыве такой звезды происходят цепные ядерные реакции, сопровождающиеся образованием большого количества нейтронов. Эти нейтроны захватываются ядрами, так что промежуточные ядра не успевают распасться. После захвата очередного нейтрона такие ядра становятся устойчивыми и дальнейший их рост происходит без помех. Таким образом, могут образовываться ядра элементов вплоть до трансурановых. Малая распространенность во Вселенной элементов тяжелее железа объясняется тем, что они образуются за

короткий интервал времени (порядка 1 с) при взрыве сверхновой звезды, тогда как более распространенные легкие элементы имеют гораздо больше времени для образования из первичного водорода в ядрах массивных звезд.

Образовавшиеся в результате вспышки сверхновой звезды тяжелые элементы поступают в межзвездное пространство, где постепенно перемешиваются с межзвездным газом, состоящим по преимуществу из гелия и водорода. Из этого материала потом, на более позднем этапе эволюции Вселенной, образуются звезды следующего поколения и планеты. Таким образом, можно утверждать, что Земля, все живое на ней, и организм человека в частности, построены из реликтовых осколков когда-то ярких звезд, погибших задолго до возникновения Солнца и нашей планеты.

Химический состав живых организмов

Химический состав живых организмов на поверхности нашей планеты иной, чем земной коры. Это объясняется некоторыми особыми свойствами «жизненно важных» элементов. Ученые утверждают, что для жизни необходимо около 20 первых элементов таблицы Менделеева. Использование таких элементов, как углерод, кислород, водород, азот, сера, фосфор, для построения «живых» молекул обусловлено их малыми размерами и возможностью образовывать устойчивые соединения с двух- и трехкратными связями, определяющими их высокую реакционную способность. Особенно велико значение углерода: химия земной жизни использует его в качестве основной структурной единицы для образования сложных молекул. Особая роль углерода как «жизненного» элемента определяется его необычными химическими свойствами. Рассмотрим некоторые из них.

Углерод достаточно распространен во Вселенной, чтобы природа при создании жизни не испытывала недостатка в материале. Он обладает способностью образовывать четыре сильные химические связи, называемые ковалентными, с другими атомами, включая сам углерод. По богатству соединений с другими элементами углерод превосходит все известные элементы, вместе взятые. Так, например, с водородом он может образовывать соединения до $C_{90}H_{154}$ включительно [79, 28]. Поскольку ковалентные связи имеют пространственную структуру, углерод может создавать скелеты гигантских трехмерных молекул, подобных белкам и нуклеиновым кислотам. Несмотря на некоторую термодинамическую не-

стабильность, соединения углерода с другими веществами инертны, с трудом вступают в химические реакции, что обеспечивает высокую устойчивость сложных молекулярных систем.

В сочетании этих необходимых для земной жизни свойств углерод неповторим. Ближайшим его соперником принято считать кремний, который лучше других химических элементов удовлетворяет некоторым требованиям к «жизненно важному» элементу. По крайней мере, органическая жизнь на основе кремния весьма распространенный сюжет научно-фантастических произведений. Однако тщательные исследования показали, что такая жизнь чрезвычайно редкое явление во Вселенной. Действительно, связи между атомами кремния в 2 раза слабее, чем у углерода. Это означает, что длинные цепочки или кольца, созданные атомами кремния по образцу углеродных соединений, маловероятны. В то же время кремний способен образовывать прочные соединения с кислородом, в результате чего на Земле почти весь кремний находится в виде оксида кремния, практически не поддающегося разрушению. Поэтому в нашем сознании кремний — материал для горных пород, а не для жизни. Данные астрономии также свидетельствуют не в пользу кремния: в метеоритах, кометах, межзвездных облаках и атмосферах звезд найдены разной сложности органические молекулы на основе углерода, в то время как кремний всегда присутствует в соединении с кислородом [18, 240].

Другие два биогенных элемента — сера и фосфор — присутствуют в относительно малых количествах, но важны способностью образовывать кратные химические связи, в результате чего эти элементы вошли в состав белков (сера) и нуклеиновых кислот (фосфор): АТФ — энергетическая основа работы клеток живых существ.

Натрий, калий, магний, кальций, хлор принимают участие в построении организмов в небольших количествах. Атомные остатки этих элементов — необходимая принадлежность обменных процессов в клеточных мембранах. В исчезающе малых количествах в живых организмах присутствуют железо, марганец, кобальт, медь, цинк, ванадий, йод. Так, железо играет важную роль в процессе дыхания, йод принимает участие в образовании гормонов.

Химические элементы попадают в организм человека из воздуха и с пищей. «Микроэлементное меню» разное у жителей разных стран, оно различное в праздники и будни, зимой и летом. Так, английские ученые подсчитали, что каждый житель Британских островов ежедневно поглощает

в среднем 5400 мг хлора, 4600 мг натрия, 23,2 мг железа, 0,32 мг свинца, по 0,3 мг серебра и сурьмы, 0,01—0,001 мг золота, по 0,001—0,0001 мг платины и урана [52, 265].

Пребывание жизненно необходимых элементов в организме человека представляет собой определенный этап общего круговорота веществ в природе, после чего эти элементы опять возвращаются в окружающую среду.

Техногенная деятельность человека еще В.И.Вернадским была отнесена к числу геологических факторов. В частности, в результате резкого роста потребления человеком полезных ископаемых происходит заметное ускорение природных циклов некоторых химических элементов.

Управление горнорудной промышленности США произвело следующий интересный подсчет: каждый американец ежегодно потребляет чуть меньше 20 т полезных ископаемых (не считая тех металлов и стройматериалов, которые используются повторно). Если этот уровень потребления сохранится, то родившийся сегодня гражданин США за свою жизнь истратит 350 т свинца (главным образом для автомобильных аккумуляторов, пайки, сварки и электронного оборудования); 300 кг цинка (который идет на выплавку бронзы, покрытие стальных конструкций, используется при производстве резины и красок); более 700 кг меди (в основном расходуемой на электронное оборудование, генераторы, средства связи и провода); почти 1,5 т алюминия (самолеты, складная мебель, банки для пива, соков и других прохладительных напитков); 15 т чугуна (строительство судов и зданий, кухонные принадлежности и автомобили); более 12 т глины (без которой не удастся выпускать не только кирпичи, но и бумагу, краску, стекло, керамику); соли каждый израсходует около 13 т, и не столько в пищу, сколько на изготовление пластмасс, детергентов, на посыпание дорог. На все строительные нужды человеку требуется более 500 т камня, песка, гравия, цемента [83, 114].

§ 43. Свойства атомов и жизнь. Радиоактивность

Свойства атомов и особенности живого вещества

Свойствами атомов как физических объектов определяются многие особенности живого вещества. В частности, нас будут интересовать размеры атомов, их неуничтожимость, способность к взаимным превращениям в результате ядерных реакций.

Какое значение для жизни имеют размеры атомов?

Оказывается, тем, что человек и объекты окружающего его мира имеют некоторый объем и конечные размеры, они обязаны тому обстоятельству, что атомы не столь уж малы.

Задача 43.1. Оцените размер атома водорода. Примите, что радиус первой борновской орбиты атома водорода равен 0,53 нм.

Задача 43.2. Чего больше в атоме: вещества или поля?

Задача 43.3. Найдите плотность ядерного вещества. Примите, что в ядре с массовым числом A все нуклоны плотно упакованы в пределах его радиуса.

Задача 43.4. Чему был бы равен объем тела человека, если бы оно состояло из ядерного вещества?

Задача 43.5. Оцените, какие размеры имели бы Земля, Солнце и Вселенная, если бы они состояли из ядерного вещества

Что касается интенсивности внутриядерных сил, то о них можно сказать следующее.

Внутри ядер атомов доминирует сильное взаимодействие, определяемое безразмерной константой сильного взаимодействия α_c .

Аналогично слабое взаимодействие, ответственное за β -распад, теперь имеет свою безразмерную константу α_w .

Задача 43.6. Приняв α_c примерно равной единице, найдите отношение $\frac{\alpha_g}{\alpha_c}$, где α_g — безразмерная гравитационная постоянная (см. задачу 10.19.)

Задача 43.7. Вычислите значение безразмерной константы слабого взаимодействия $\alpha_w = \frac{gm_e^2}{\hbar^3}$, где g — ускорение свободного падения; m_e — масса электрона.

С точки зрения физики, круговорот элементов в биосфере определяется тем, что атомы — долгоживущие образования. Действительно, считается, что все когда-либо в процессе эволюции Вселенной образовавшиеся атомы остались с тех пор неизменными (за исключением атомов радиоактивных элементов). Для последовательного проведения в учебном процессе идеи гуманизации изучения физики следует обратить особое внимание учащихся на это обстоятельство.

В последнее время возрос интерес к представителям отечественной философской мысли. Очень интересным и злободневным в связи с этим может стать обсуждение идей русского ученого Н.Ф.Федорова.

Н.Ф.Федоров по праву считается родоначальником отечественного философского направления, известного под названием «Русский космизм», представителями которого являлись уже известные нам Н.А.Умов, К.Э.Циолковский, В.И.Вернадский, А.Л.Чижевский. Для философских взглядов Н.Ф.Федорова были характерны идеи о восходящем характере природной эволюции, о роли человека в этом процессе, о необходимости нового, сознательно направленного его этапа, ведущего ко все большему одухотворению природы, человека и мира. Так, по мнению Федорова, разум порождается эволюцией как сознательное орудие ее дальнейшего развития. Особенно интересна для нас теория «Общего дела» Федорова. В соответствии с ней главной целью человечества должно стать воскрешение всех умерших, «всех отцов» или всех прежде живших на Земле людей. Как выясняется, эта теория не противоречит данным современной биологии и генетики: каждый человек носит в своих генах наследственную информацию, полученную от предков и передаваемую потомкам. Реализованная в последнее время в биологии процедура «клонирования», т.е. выращивание целого организма из одной единственной клетки, несущей в себе всю необходимую генетическую информацию о нем,— лучшее тому подтверждение.

А что можно сказать об идее «общего дела», с точки зрения физики? Сделаем простые оценки.

Известно, что вещество биосферы постоянно по составу и ограничено количественно: по оценкам ученых, количество вещества в биосфере составляет 10^{12} — 10^{13} т [52, 265]. На животных и людей приходится при этом всего 1% массы, остальное на растения. За год растения планеты перерабатывают количество вещества, масса которого превышает их собственный вес в 8—10 раз. За 100 тыс. лет могучий, великолепно организованный и устойчивый планетный вихрь жизни перерабатывает массу вещества, равную массе биосферы. Тогда оказывается, что в процессе существования планеты все атомы вещества биосферы многократно прошли через живое вещество.

Задача 43.8. Сколько биогенных циклов осуществилось на Земле за время существования ее биосферы?

Задача 43.9. По оценкам ученых через историю человечества прошло что-то около 100 млрд индивидов. Оцените отношение массы всех живших на Земле людей к массе вещества биосферы.

Р е ш е н и е

Масса всех живших за это время людей составила $7 \cdot 10^{12}$ кг.

Сравнивая это значение с массой биосферы, получим, что для восстановления всех живших на Земле людей должна быть израсходована почти вся биосфера планеты, накопленная к настоящему времени.

Несколько разочаровывающий результат наших расчетов не умаляет значения учения Н.Ф.Федорова об «общем» для всего человечества деле, направленном на преодоление зависимости от сил разрушения и смерти. Может быть, и нет нужды «воскрешать» всех предков, так как каждый из нас носит в себе их частицу, и в этом смысле они продолжают свое существование в нас. Осознание преемственности поколений и в материальном, биологическом смысле, и в деле познания и преобразования окружающего мира ставит нас перед необходимостью более ответственно относиться к собственной жизни, к жизни других людей, к поиску смысла своего существования.

С другой стороны, известно, что разобщенное, не связанное общей идеей человечество беспомощно перед лицом грозящих ему планетарных и, быть может, галактических кризисов. Мы не имеем общей для всего человечества стратегии развития цивилизации, сохранения окружающей среды, создания для всех людей оптимальных условий существования, контактов с другим разумом, наконец. Именно в этом, в осознании необходимости задуматься о выработке объединяющих человечество идей и «дел», и состоит, на наш взгляд, ценность работ Н.Ф.Федорова.

Способность атомов к взаимному превращению

Следующее важное свойство атомов — способность их к взаимному превращению в результате радиоактивного распада. Интересную возможность для проведения важных оценочных расчетов можно обнаружить, если вспомнить, что явление радиоактивного распада хорошо изучено с количественной стороны.

Задача 43.10. Оцените возраст Галактики, предполагая, что количество изотопов ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$ в момент ее возникновения было одинаковым, а в настоящее время отношение числа атомов урана-235 к числу атомов урана-238 составляет 0,0072.

На оценке относительного количества радиоактивного изотопа углерода ${}_{6}^{14}\text{C}$ в ископаемых материалах основан широко применяемый в археологии метод радиоуглеродного датирования. Вот несколько задач, посвященных ему.

Задача 43.11. Чтобы определить возраст древней ткани, найденной в одной из египетских пирамид, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода $^{14}_6\text{C}$. Она оказалась равна 9,2 расп./мин на 1 г углерода. Концентрация $^{14}_6\text{C}$ в живых растениях соответствует 14 расп./мин на 1 г $^{14}_6\text{C}$. Период полураспада $^{14}_6\text{C}$ равен 5730 годам. Исходя из этих данных оцените возраст ткани.

Задача 43.12. Определите возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа $^{14}_6\text{C}$ у них составляет $\frac{3}{5}$ удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях, $\frac{3}{4}$ этой активности

§ 44. Роль мутаций в происхождении человека

Мутации — есть источник любого наследуемого изменения. Они служат сырьем для естественного отбора, обеспечивая разнообразие живых организмов. Мутации бывают самопроизвольными (спонтанными) и искусственными (индуцированными). Частота самопроизвольных мутаций у организмов всех видов исключительно мала, они имеют случайный, ненаправленный характер. Индуцированные мутации возникают гораздо чаще. Их причиной являются так называемые мутагенные факторы. Ими могут быть вирусы, некоторые химические соединения, ультрафиолетовое и главным образом рентгеновское и ионизирующее излучения.

Все живые существа на поверхности нашей планеты находятся под воздействием естественного фона радиации, который складывается в основном из радиоактивного излучения пород, входящих в состав коры Земли. Сильным источником радиации являются, кроме того, космические лучи. Некоторую долю фоновой радиации составляют радиоактивные вещества, поглощаемые человеком с пищей или входящие в состав тканей его тела.

Задача 44.1. Взрослый человек получает с пищей радиоактивный изотоп калия активностью $3,7 \cdot 10^3$ Бк. Сколько ядер калия распадется за 1 с?

Задача 44.2. Чему равна активность радиоактивного изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$, присутствующего в теле человека в концентрации 1 радиоактивный атом на 10^{12} стабильных? Примите, что организм человека состоит на 18% из углерода, а период полураспада его радиоактивного изотопа составляет 5600 лет.

Задача 44.3. Радиоактивные изотопы калия, содержащиеся в теле человека, обладая активностью 83 000 Бк, вносят вклад в фоновую радиацию. Сколько калия содержится в организме человека, если в каждом грамме его за 1 мин совершается 2000 актов распада?

В настоящее время радиационный фон на поверхности Земли характеризуется небольшим и почти постоянным значением эквивалентной дозы излучения — около 2 мЗв в год. При таком фоне количество детей, родившихся с генетическими дефектами, составляет 10% от общего числа родившихся, а родившихся с серьезными генетическими нарушениями — 2% [81, 67].

Однако фоновое радиоизлучение на поверхности нашей планеты не всегда было таким. Известно, что в далеком прошлом и активность пород была выше и атмосфера хуже защищала от космического излучения. Очевидно, что в происхождении жизни на Земле мутагенный фактор фоновой радиации сыграл одну из решающих ролей. Известны гипотезы, объясняющие некоторые события земной эволюции резким повышением радиации фона за счет близкой вспышки сверхновой звезды.

Очень интересна высказанная Г.Н.Матюшиным гипотеза о влиянии локального изменения радиоактивного фона планеты на происхождение человека. Вот как он ее излагает.

«5—10 млн. лет назад Африка была более или менее равномерно заселена родственными антропоидами. Активный вулканизм, общее поднятие материка, мощные землетрясения и разломы земной коры в этот период обнажили урановые руды и резко повысили радиационный фон в Восточной и Южной Африке. Здесь сложилась опасная зона. Видимо, в результате этого у обитавших там человекообразных обезьян произошли крупные мутации: появились прямоходящие особи. В Западной же и Экваториальной Африке обезьяны не испытали этого радиационного потрясения и, почти не изменившись, дожили до наших дней» [47, 110].

Действительно, сравнение карт Африки, приведенных на рисунках 13.1 и 13.2, обнаруживает явную связь между найденными стоянками древнейших на Земле людей, зонами землетрясений и активного вулканизма и расположением урановых месторождений. На рисунке 13.2 показаны, кроме того, области обитания человекообразных обезьян, находящиеся вне зоны, характеризующейся высоким радиационным фоном.

По мнению Матюшина, мутации привели к тому, что у предков человека прежде всего увеличился размер черепа и изменилась его форма, утончились кости, он стал прямоходящим, потерял шерстяной покров. «Несчастные мутанты», лишившись присущих животным средств защиты от врагов и окружающей среды, неминуемо погибли бы, если

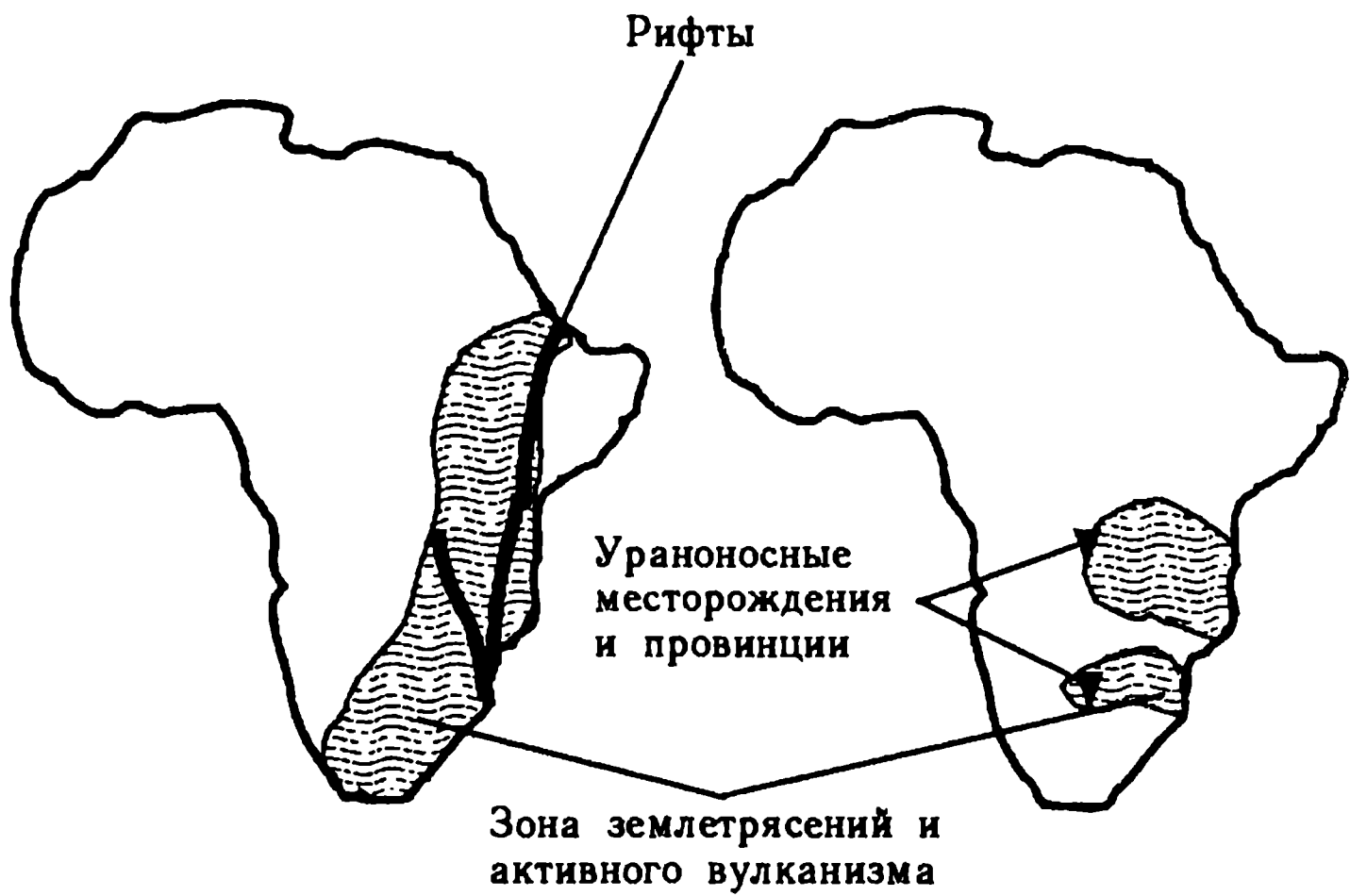


Рис. 13.1

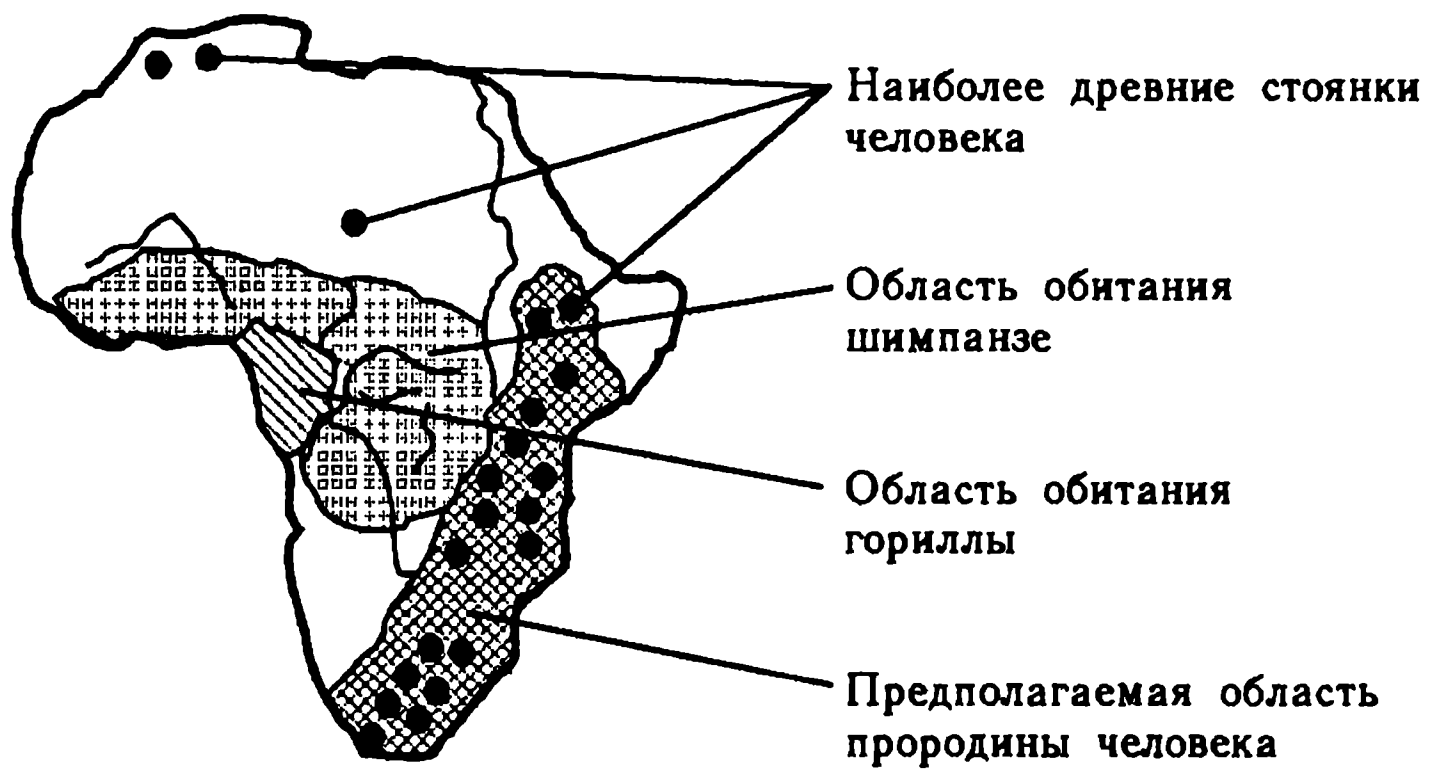


Рис. 13.2

бы не нашли замену всему тому, что у них отобрала природа,— острым клыкам, большой физической силе, ловкости и т.д. Эта замена, определившая возникновение нового существа,— искусственные орудия труда и организация человеческого общества — была найдена [47, 111].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физика и антропный принцип

К числу принципов, пришедших в процессе развития науки из разряда частнонаучных в разряд общеметодологических, философских, относится так называемый антропный принцип. Он позволил обобщить большое число фактов, экспериментально наблюдаемых в астрофизике, физике элементарных частиц, в химии и биологии, и установил существование органических связей между явлениями и закономерностями, изучаемыми этими научными дисциплинами, часто далеко отстоящими друг от друга.

Некоторые ученые считают антропный принцип первой попыткой научно обоснованного объяснения структуры Вселенной. Но так или иначе без опоры на него сейчас невозможно объяснить ни эволюцию окружающего мира, ни роль и место человека во Вселенной.

Чтобы понять содержание антропного принципа, обратимся к результатам оценочных расчетов, выполненных нами в ранее рассмотренных главах. Сравним между собой результаты, полученные при вычислении:

а) отношения радиуса Вселенной к радиусу протона (см. задачу 1.2);

б) отношения плотности нуклона к плотности Вселенной (см. задачу 1.13);

в) отношения силы электромагнитного взаимодействия электрона и протона к силе их гравитационного взаимодействия (см. задачу 30.2);

г) числа частиц во Вселенной (см. задачу 1.14);

д) времени жизни Вселенной, выраженного в условных единицах (см. задачу 1.8);

е) отношения безразмерной постоянной гравитационного взаимодействия к постоянной слабого взаимодействия (см. задачу 43.6).

Проявленную тенденцию комбинаций мировых констант быть кратными числу 10^{40} или его квадрату (10^{80}) П. Дирак назвал законом больших чисел.

Обнаруженное Дираком совпадение больших чисел выглядит так, как если бы природа специально «подгоняла»

значения констант, чтобы во Вселенной могла появиться жизнь. Известный космолог А.Л.Зельманов сказал по этому поводу так: «Мы являемся свидетелями событий потому, что другие события протекают без свидетелей». Эти слова выражают суть антропного принципа.

Что это за принцип и какое он имеет отношение к рассматриваемым физическим проблемам?

Прежде всего заметим, что сложные формы движения материи, такие, например, как сложные химические соединения, жизнь и тем более разумная жизнь, могли возникнуть во Вселенной только на определенном этапе ее развития, близком к нашей эпохе. Действительно, сложная химия и жизнь, по крайней мере, в известных нам формах, требуют существования планет земного типа, вероятно, с океанами, обогреваемыми достаточно близкой звездой, свечение которой остается постоянным в течение длительного времени.

Для развития жизни, таким образом, нужна сложная химия и благоприятные условия в течение многих миллиардов лет. Таких условий заведомо не было в далеком прошлом Вселенной, когда не было ни звезд, ни планет. Не может жизнь начать зарождаться и в далеком будущем, когда звезды погаснут, и тем более в очень далеком будущем, когда распадутся тяжелые частицы, превращаясь в излучения и нейтрино.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы. Во-первых, жизнь и разумная жизнь нашего типа могут возникнуть во Вселенной во вполне определенный период времени — в нашу эпоху, когда есть для этого условия. Вселенная может порождать исследователей ее самой, порождать «наблюдателей» или, как сказал А.Л.Зельманов, «свидетелей» только в нашу эпоху. Так трактует антропный принцип взаимную связь между свойствами Вселенной и возможностью появления в ней разумной жизни.

Во-вторых, наблюдатели («свидетели») могут появиться только при определенном наборе физических констант, при определенных физических законах. Если и были (или, может быть, есть?) другие Вселенные с иными законами, то они существуют без сложных структур (без «свидетелей»), в них никогда не появится жизнь. Таким образом, наша Вселенная такая, какой мы ее видим, именно потому, что мы в ней есть [20, 147].

Позволим себе использовать последнюю мысль для мотивации изучения физики. Поскольку природа создала человека для того, чтобы иметь наблюдателя, смысл человеческого существования — в том числе и в познании окружающего мира. Это познание может быть и чувственным, и рациональным. Его объектом может быть окружающий человека мир и сам человек как часть этого мира.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Лабораторные работы

1. Определение скорости равномерно движущегося объекта без использования измерительных приборов

Ц е л ь р а б о т ы: научиться определять скорость равномерно движущегося объекта без использования измерительных приборов.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: игрушечный автомобиль.

Последовательность выполнения работы

1. Определите длину своей пяди l (пядь — расстояние между большим и средним пальцами напряженной ладони) и интервал времени T между двумя последовательными ударами своего пульса.

2. Подготовьте и разметьте при помощи пяди на столе или парте дистанцию для движения игрушечного автомобиля.

3. Заведите автомобиль, установите его на линию старта и приведите в движение в момент времени, совпадающий с ударом пульса. Определите число ударов пульса, соответствующих времени движения автомобиля по дистанции.

4. Рассчитайте путь, пройденный автомобилем, по формуле $s = Nl$, где N — число пядей, уложившихся на дистанции.

5. Рассчитайте время его движения по формуле $t = Tn$, где n — число ударов пульса.

5. Вычислите скорость движения автомобиля по формуле

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

6. Запишите ответ, сделайте вывод.

2. Определение времени реакции человека

Ц е л ь р а б о т ы: определить важную характеристику организма человека — время его реакции.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: деревянный метр.

Последовательность выполнения работы

1. Один из участников опыта прижимает вертикально расположенный деревянный метр к стене так, чтобы середина метра находилась на уровне отметки на стене.

2. Затем, отвлекая внимание стоящего рядом партнера, отпускает метр в свободное падение. Второй участник должен остановить падение метра, прижав его к стене, так быстро, как сможет.

3. Отметив новое положение середины метра, измеряют длину его пролета h по расстоянию между метками.

4. Вычисляют время реакции t по формуле $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

5. Повторяют опыт с другим участником.

6. Записывают ответ, делают вывод.

3. Градуировка динамометра и определение становой силы человека

Ц е л ь р а б о т ы: проградуировать самодельный динамометр и определить становую силу человека, силу обеих рук.

Последовательность выполнения работы

1. Подвешивая разные грузы к динамометру, определите в каждом случае удлинение пружины x . Результаты запишите в таблицу.

Таблица

m , кг					
F , Н					
x , м					

2. По данным таблицы постройте график зависимости $F = f(x)$.

4. Вычислите жесткость пружины.

5. Измерьте удлинение пружины динамометра, соответствующее действию становой силы человека. По графику определите значение становой силы.

6. При помощи ручного динамометра определите силы, развиваемые обеими руками человека.

7. Сделайте вывод, запишите ответ.

4. Определение коэффициентов трения подошв обуви человека о различные поверхности

Ц е л ь р а б о т ы: определить значения коэффициентов трения подошв обуви человека о различные поверхности.

Последовательность выполнения работы

1. Один из участников опыта встает на доску. Другой поднимает ее за один край до тех пор, пока стоящий на доске человек не начнет с нее соскальзывать.

2. Измерьте высоту подъема доски h в момент соскальзывания с нее человека. Измерьте длину доски l .

3. Вычислите коэффициент трения по формуле

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \left(\sqrt{\left(\frac{l}{h} \right)^2 - 1} \right)^{-1}.$$

4. Повторите опыт для поверхностей из других материалов.

5. Сделайте вывод, запишите ответ.

5. Определение массы тела человека динамическим методом

Ц е л ь р а б о т ы: определить массу тела человека динамическим методом.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: две легкоподвижные тележки, секундомеры, сантиметровая лента.

Последовательность выполнения работы

1. Два человека (разной массы m_1 и m_2 , одна из которых неизвестна) встают на две легкоподвижные тележки лицом друг к другу, упираясь ладонями друг о друга.

2. По сигналу одновременно оттолкнувшись, разъезжаются в разные стороны.

3. Измерьте расстояния s_1 и s_2 , пройденные тележками до полной остановки.

4. Вычислите неизвестную массу по формуле

$$m_2 = m_1 \sqrt{\frac{s_1}{s_2}}.$$

5. Сравните это значение массы с результатом, полученным другим способом.
6. Сделайте вывод, запишите ответ.
7. Повторите опыт для других пар участников.
8. Измерьте время разезда t_1 и t_2 .
9. Вычислите неизвестную массу по формуле

$$m_2 = m_1 \frac{t_1}{t_2}.$$

10. Сравните полученный результат с предыдущим.
11. Повторите опыт для других пар участников.
12. Запишите ответ, сделайте вывод.

6. Определение мощности, развиваемой человеком

Ц е л ь р а б о т ы: определить значения развиваемой человеком мощности в разных физических упражнениях.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: секундомер, деревянный метр.

Последовательность выполнения работы

1. Выберите вид физических упражнений, для которых будете определять мощность.
2. При помощи секундомера и линейки измерьте характерные параметры движения: время, перемещения частей тела и т.п.
3. Оцените значение силы, развиваемой человеком при этих движениях.
4. Рассчитайте развиваемую мощность.
5. Сравните полученные вами значения мощности с результатами, полученными другими участниками опыта при других видах упражнений.
6. Запишите все результаты в тетрадь, стараясь расположить их в порядке возрастания развиваемой мощности.
7. Сделайте вывод, запишите ответ.

7. Определение атмосферного давления

Ц е л ь р а б о т ы: определить давление атмосферы — важный параметр окружающей человека среды.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: стеклянная трубка с пробкой, резиновый шланг, линейки, штативы, вода, воронка.

Последовательность выполнения работы

1. Соберите установку в соответствии с рисунком 1.
2. Установив перемещением воронки с водой уровень воды в стеклянной трубке на расстоянии 10—15 см от ее верхнего конца, закройте отверстие в трубке пробкой.
3. Измерьте высоту столба воздуха l в закрытой части трубки.
4. Опустите воронку на 1—1,5 м от первоначального положения. Измерьте h — разность уровней воды в трубке и воронке и $(l + \Delta l)$ — высоту столба воздуха в закрытой части трубки после окончания опыта.
5. Вычислите атмосферное давление по формуле

$$p = \frac{\rho g h (l + \Delta l)}{\Delta l}.$$

6. Сравните полученное значение атмосферного давления с показаниями барометра.
7. Сделайте вывод, запишите ответ.

8. Определение влажности воздуха

Ц е л ь р а б о т ы: определить один из важнейших параметров окружающей человека среды — влажность воздуха — при помощи самодельного гигрометра.

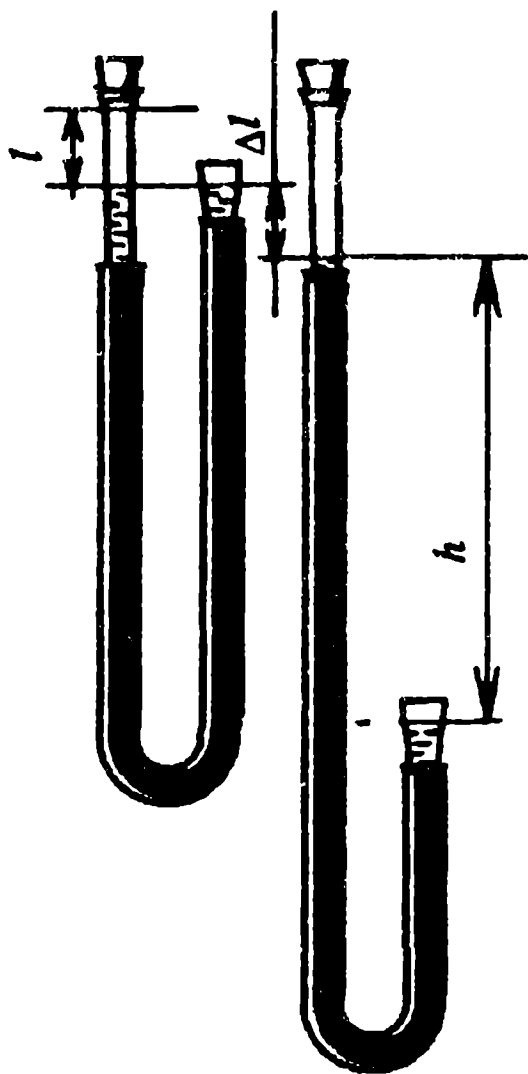


Рис. 1

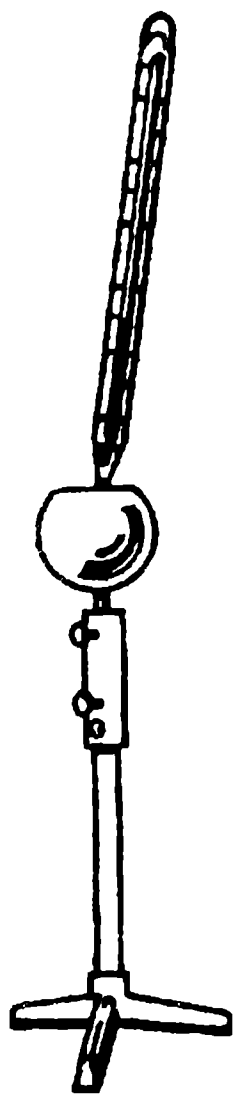


Рис. 2

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: термометр, самодельный гигрометр, изготовленный из полого шара с зеркальной поверхностью (из набора по электростатике) и установленный на подставке (рис. 2).

Последовательность выполнения работы

1. Заполните шар гигрометра водой комнатной температуры не более чем на $3/4$ его объема.

2. Определите термометром температуру t в помещении, а затем опустите термометр в шар.

3. Опустите в воду кусок льда или снега и внимательно следите за поверхностью шара.

4. Как только поверхность шара станет матовой (на ней выступит роса), определите температуру воды t_1 . Она будет соответствовать температуре, называемой температурой (точкой) росы t_p .

5. По таблице «Давление насыщающих паров при различных температурах» (см., например, [16, 106]) определите давление водяного пара p_n , содержащегося в воздухе при данной температуре t , и давление p насыщенного пара при той же температуре (по точке росы t_p).

6. Определите относительную влажность воздуха

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%.$$

7. Опыт проделайте три раза, вычислите среднее значение относительной влажности в помещении.

8. Запишите ответ, сделайте вывод.

9. Определение дыхательного объема легких человека

Ц е л ь р а б о т ы: определить один из важнейших параметров организма человека — дыхательный объем его легких.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: воздушный шарик, линейка, номограмма для определения площади поверхности (рис. 3).

Последовательность выполнения работы

У п р а ж н е н и е 1. Определение объема легких человека по площади поверхности его тела.

1. Вычислите площадь поверхности тела человека по формуле

$$S = 0,167\sqrt{ml},$$

где S — площадь поверхности м^2 ; m — масса тела, кг; l — длина тела, м.

2. Рассчитайте объем легких человека по формуле

$$V = 2,5 \cdot 10^{-3}S \text{ или } V = 2,0 \cdot 10^{-3}S,$$

где V — объем, м^3 ; S — площадь, м^2 .

(Формулы приведены для вычисления объема легких соответственно мужчин и женщин, так как считается, что каждому квадратному метру поверхности тела мужчины соответствует 2500 мл, а женщины — 2000 мл объема легких.)

3. Определите площадь поверхности тела человека с помощью номограммы (см. рис. 3). Для этого соедините при помощи линейки прямой линией показатели массы и длины тела. Точка пересечения этой прямой со шкалой S даст значение площади поверхности.

4. Рассчитайте объем легких по формуле, приведенной в пункте 2.

5. Сравните результаты определения S разными способами. Сделайте вывод. Запишите ответ.

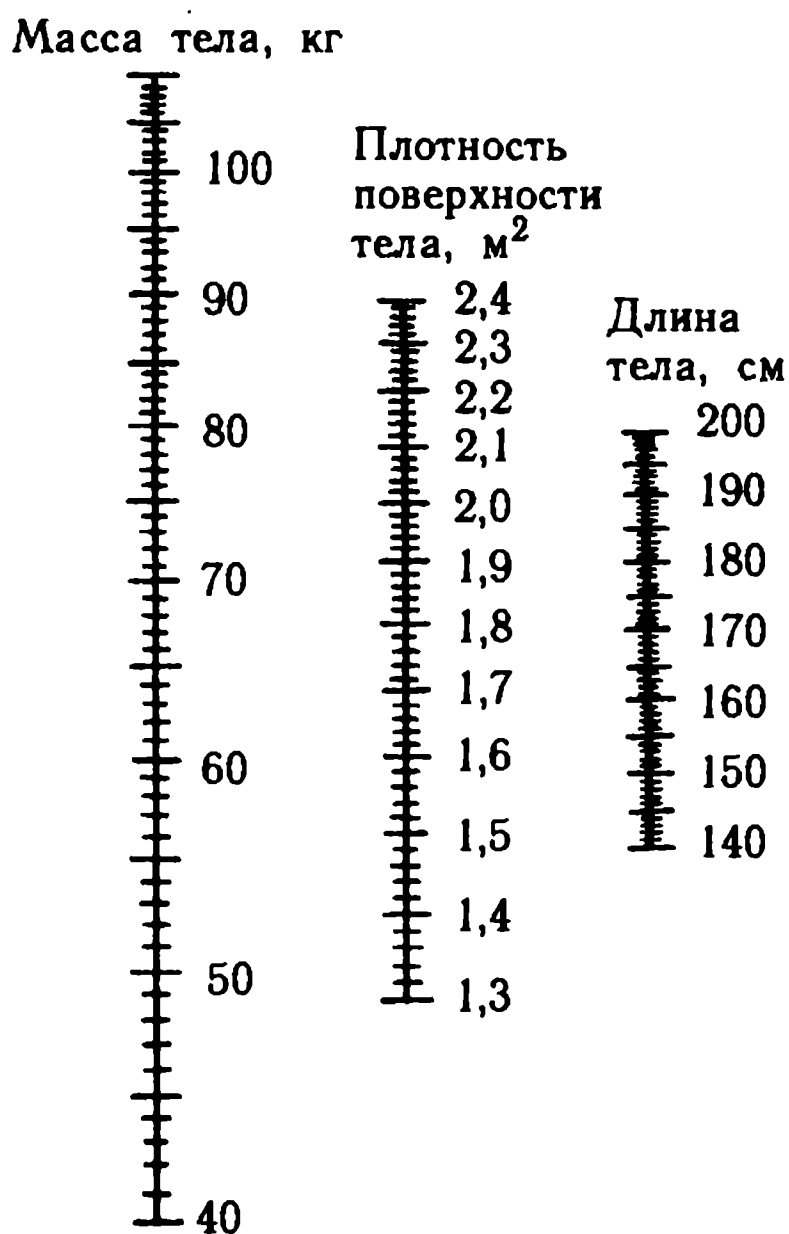


Рис. 3

У п р а ж н е н и е 2. Определение дыхательного объема легких при помощи самодельного спирографа.

1. В качестве самодельного спирографа предлагаем использовать воздушный шарик. Этот выбор определяется возможностью иметь для каждого участника эксперимента свой прибор, не требующий дезинфекции при каждом использовании. При выдохе воздуха в шарик он надувается. Объем шарика можно вычислить, если измерить его диаметр, по формуле $V = \frac{\pi d^3}{6}$.

2. Измерьте дыхательный объем своих легких $V_{\text{дых}}$. Для этого сделайте в шарик через рот 10 спокойных выдохов. Измерьте диаметр шарика, вычислите объем заполняющего его воздуха. Вычислите дыхательный объем легких, разделив объем шарика на 10.

3. Повторите опыт 3 раза. Вычислите средний дыхательный объем легких и запишите результат в таблицу.

4. Измерьте резервный объем выдоха $V_{\text{р.выд}}$. Сразу после спокойного выдоха возьмите отверстие шарика в рот и сделайте максимально глубокий выдох. Определите объем шарика. Повторите опыт 3 раза, вычислите средний резервный объем выдоха, запишите результаты в таблицу.

Таблица

Основные параметры дыхания человека	Числовые значения
Возраст, лет	
Пол	
Масса, кг	
Длина тела, м	
Площадь поверхности, м ²	
Дыхательный объем $V_{\text{дых}}$, л	
Резервный объем выдоха $V_{\text{р.выд}}$, л	
ЖЕЛ, л	
Резервный объем вдоха $V_{\text{р.вд}}$, л	
ЖЕЛ, л (теоретическая)	
МЛВ, л/мин	
МЛВ, л/мин (теоретическая)	

5. Для определения жизненной емкости легких, взяв отверстие шарика в рот, сделайте глубокий вдох и максимально

выдохните в шарик. Не отнимая шарик ото рта, повторите действия 5 раз. Определите диаметр и рассчитайте объем получившегося шара. Вычислите жизненную емкость легких (ЖЕЛ), поделив объем шара на 5. Результаты запишите в таблицу.

6. Рассчитайте резервный объем вдоха $V_{р.вд}$ по формуле $V_{р.вд} = \text{ЖЕЛ} - (V_{о,о} + V_{р.выд})$.

Результаты запишите в таблицу.

7. Вычислите теоретическое значение своей жизненной емкости легких (в литрах) по формуле

$\text{ЖЕЛ} = [\text{рост(м)} \cdot 5,2 - \text{возраст(лет)} \cdot 0,022] - 4,2$ (для юношей) или $\text{ЖЕЛ} = [\text{рост(м)} \cdot 4,1 - \text{возраст(лет)} \cdot 0,018] - 3,7$ (для девушек).

Результаты запишите в таблицу.

8. Сравните результаты определения основных параметров дыхания человека разными способами между собой и с нормой. Норма для ЖЕЛ составляет 2,8—3,8 л для юношей и 2,5—2,8 л для девушек [63, 202].

9. Сделайте вывод, запишите ответ.

У п р а ж н е н и е 3. Определение максимальной легочной вентиляции (МЛВ).

1. Возьмите в рот отверстие воздушного шарика. В течение 10 с дышите часто и глубоко, выдыхая воздух в шарик.

2. Измерьте диаметр шарика, вычислите его объем V .

3. Вычислите МЛВ по формуле $\text{МЛВ} = 6V$. Результат запишите в таблицу.

4. Вычислите МЛВ, представляющую норму для вашего возраста и пола, по формуле

$\text{МЛВ} = [\text{рост(м)} \cdot 1,34 - \text{возраст(лет)} \cdot 1,26] - 21,4$ (для юношей) или $\text{МЛВ} = [71,3 - \text{возраст(лет)}] \cdot [\text{площадь поверхности тела(м}^2\text{)}]$ (для девушек).

Результаты запишите в таблицу.

5. Сделайте вывод. Запишите ответ.

10. Определение давления крови человека

Ц е л ь р а б о т ы: определить характеристические параметры работы сердечно-сосудистой системы человека — артериальное давление, систолический и минутный объемы крови.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: прибор для измерения давления, фонендоскоп, секундомер.

Последовательность выполнения работы

1. Ознакомьтесь с устройством прибора для измерения давления крови.

2. Обнажите левую руку участника опыта, плотно оберните манжету прибора вокруг середины его плеча так, чтобы ее нижний край находился на 2,5—3 см выше локтевого сгиба.

3. Установите фонендоскоп на лучевой артерии в области локтевого сгиба.

4. Проверьте уровень ртути в манометре: он должен стоять на нулевой отметке. Нагнетайте воздух в манжету до тех пор, пока манометр не покажет 160—180 мм рт. ст. (до полного исчезновения пульса).

4. Медленно выпускайте воздух из манжеты. С помощью фонендоскопа установите момент, когда появится первый звук. Показания манометра при этом дадут значение систолического (верхнего) давления крови в артерии.

5. Зафиксируйте момент прекращения звука. Показания манометра в этот момент будут соответствовать значению диастолического (нижнего) давления крови.

6. Вычислите пульсовое давление как разницу между верхним и нижним давлениями.

7. Вычислите систолический объем крови по формуле

$$CO = [(101 + 0,5 ПД) - (0,6 ДД)] - 0,6A,$$

где CO — систолический объем, мл; ПД — пульсовое давление, мм рт. ст.; ДД — диастолическое давление, мм рт. ст.; A — возраст человека, год.

8. С помощью секундомера определите число сокращений сердца в минуту.

9. Вычислите минутный объем крови по формуле

$$МОК = CO \cdot ЧСС,$$

где МОК — минутный объем крови, мл; ЧСС — число сокращений сердца в минуту.

10. Проверьте влияние физической нагрузки на кровяное давление и пульс.

11. Измерьте МОК человека в положении лежа.

12. Запишите ответ, сделайте вывод.

11. Определение сопротивления тканей тела человека постоянному и переменному электрическому току

Ц е л ь р а б о т ы: определить сопротивление тканей тела человека постоянному и переменному электрическому току.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: элементы электрических цепей, изображенных на рисунках 4 и 5, проводники, свинцовые пластинки-электроды, применяемые для электропроцедур.

Последовательность выполнения работы

У п р а ж н е н и е 1. Определение сопротивления тканей тела человека постоянному электрическому току.

1. Соберите цепь в соответствии с рисунком 4. Выключите потенциометр. Переключатель Π поставьте в положение a . Установите свинцовые пластинки на выбранный участок тела.

2. Замкните ключ и медленным перемещением движка потенциометра установите силу тока 100 мкА.

3. Измерьте U и I .

4. Перебросьте переключатель Π в положение b и по максимальному отбросу милливольтметра определите ЭДС поляризации.

5. Вычислите сопротивление $R = \frac{U - \mathcal{E}}{I}$.

6. Повторите опыт для другого участка тела.

7. Запишите ответ, сделайте вывод.

У п р а ж н е н и е 2. Определение сопротивления тканей тела человека переменному электрическому току.

1. Соберите цепь в соответствии с рисунком 5. Закрепите электроды на том же участке тела, что и в упражнении 1.

2. Установите ползунком реостата $U = 0$. Замкните ключ.

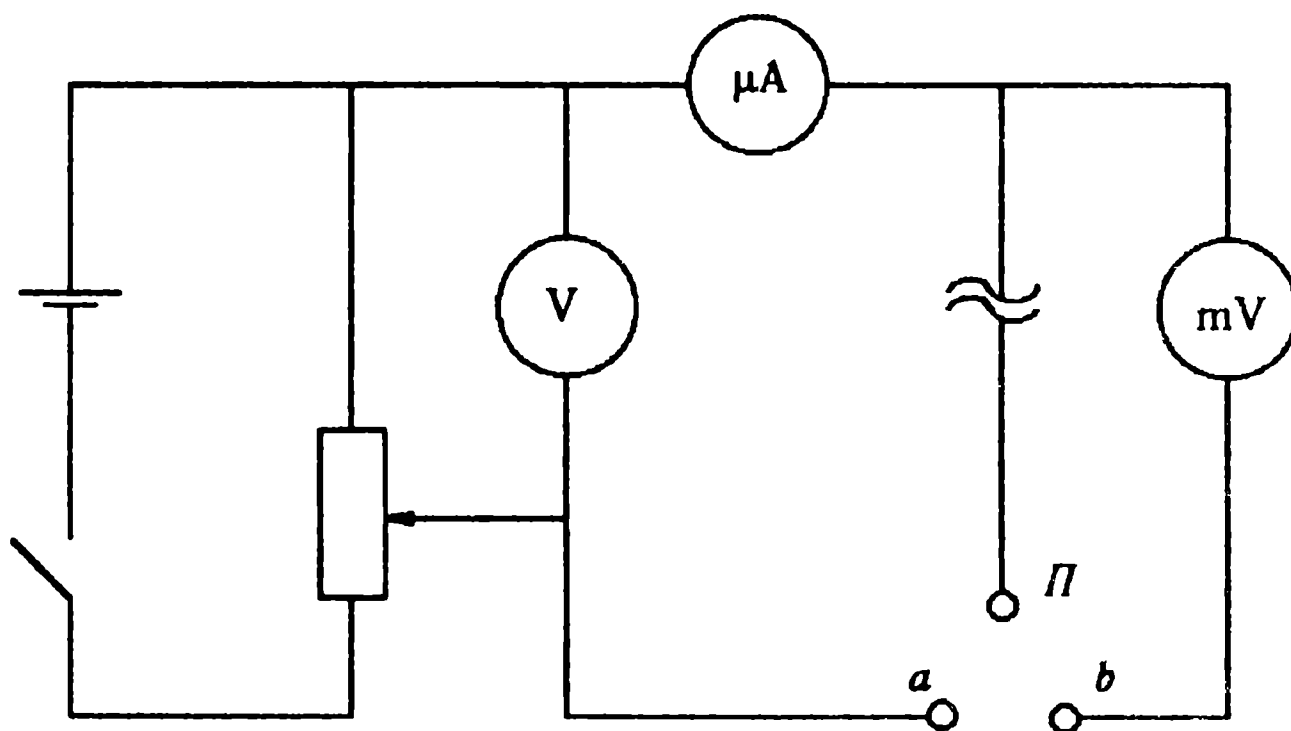


Рис. 4

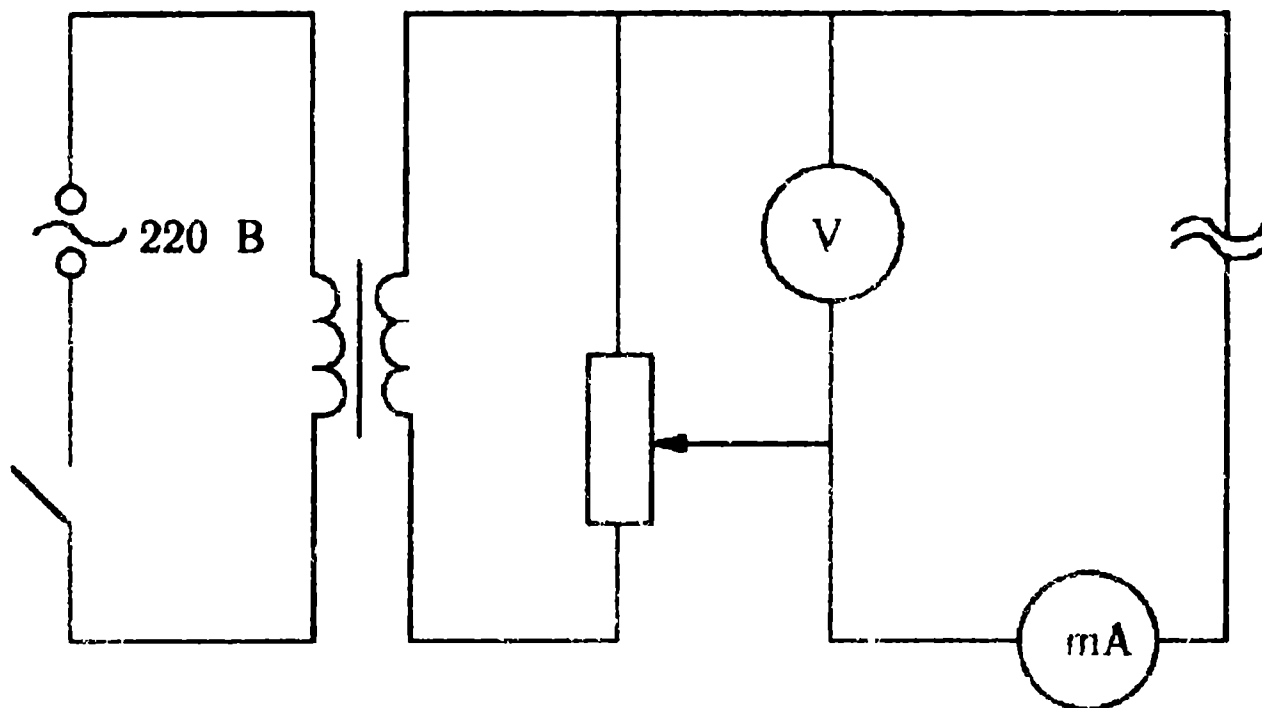


Рис. 5

3. Медленным перемещением движка установите ток 100 мА.

4. Измерьте U и I . Вычислите сопротивление R .

5. Опыт повторите трижды. (Больше трех измерений делать не рекомендуется, так как скапливающиеся у клеточных мембран ионы рассасываются медленно, что ведет к искажению результатов.)

12. Определение индукции магнитного поля Земли

Ц е л ь р а б о т ы: определить значение индукции магнитного поля Земли.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: рамка с несколькими витками провода, гальванометр, компас.

Последовательность выполнения работы

1. При помощи стрелки компаса определите направление линии индукции магнитного поля Земли.

2. Установите рамку вертикально так, чтобы ее плоскость оказалась перпендикулярной направлению стрелки компаса.

3. Подсоедините гальванометр к катушке.

4. Поверните рамку на 180° вокруг вертикальной оси. Измерьте отброс стрелки гальванометра Δq .

5. Повторите опыт 5 раз и найдите среднее значение заряда, прошедшего через гальванометр при повороте рамки.

6. Вычислите модуль горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли по формуле $B_r = \frac{\Delta q R}{2NS}$,

где R — сопротивление провода рамки; N — число витков в рамке; S — площадь рамки.

7. Расположите рамку в горизонтальной плоскости и повторите опыт, поворачивая рамку на 180° вокруг горизонтальной оси.

8. Вычислите модуль вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли B_v .

9. Вычислите индукцию магнитного поля Земли по формуле

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_v^2}.$$

10. Запишите ответ, сделайте вывод.

13. Изготовление и изучение свойств секундного маятника

Ц е л ь р а б о т ы: изготовить секундный маятник, познакомиться с его свойствами.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: нить, грузик, секундомер, линейка, пластилин.

Последовательность выполнения работы

1. Рассчитайте длину секундного маятника по формуле

$$l = \frac{gT^2}{4\pi^2}.$$

2. Отмерьте на нити нужную длину, сделайте отметку (но не отрезайте).

3. Изготовьте маятник, подвесьте его к опоре.

4. Определите опытным путем период колебаний маятника. Для этого измерьте при помощи секундомера время t 20 колебаний (n). Тогда период можно будет рассчитать по формуле

$$T = \frac{t}{n}.$$

5. Измените длину маятника, если окажется, что T неточно равен 1 с. Повторите опыт по определению T .

6. Убедитесь, что период колебаний получившегося математического маятника не зависит от амплитуды колебаний.

7. Убедитесь, что изменение массы грузика (в разумных пределах) не влияет на период его колебаний.

8. Проверьте, насколько хорошо соответствует частота колебаний вашего маятника частоте ударов вашего пульса.

9. Сделайте вывод, запишите ответ.

14. Исследование зависимости периода колебаний физического маятника от его приведенной длины

Ц е л ь р а б о т ы: установить (качественно), как зависит период колебаний физического маятника от его приведенной длины.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: качели, математический маятник переменной длины, секундомер.

Последовательность выполнения работы

1. Приведите в движение оба маятника. Их колебания не совпадут.

2. Изменяя длину математического маятника, сделайте ее такой, чтобы периоды колебаний обоих маятников стали одинаковыми.

3. Измерьте длину l получившегося математического маятника. По определению приведенной длины L физического маятника $l = L$. ($L = \frac{I}{mga}$, где I — момент инерции физического маятника массой m ; a — расстояние от точки подвеса до центра масс; g — ускорение свободного падения.)

4. Изменяя положение центра масс физического маятника, исследуйте зависимость T от L . (Положение центра масс качелей можно изменить, посадив на них человека, изменив его положение на качелях и т.п.)

5. Сделайте вывод, запишите ответ.

15. Изучение свойств уха человека

Ц е л ь р а б о т ы: получить спектральную характеристику уха человека на пороге слышимости.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: звуковой генератор (ЗГ), осциллограф.

Последовательность выполнения работы

1. Включите ЗГ и осциллограф в сеть. Выходное напряжение с ЗГ подайте на вертикальные пластины осциллографа.

3. Установите на ЗГ выбранную частоту. Добейтесь максимальной интенсивности звука при данной частоте.

4. Уменьшайте интенсивность звука до тех пор, пока он не пропадет. Отметьте амплитуду колебаний сигнала на экране осциллографа, соответствующую этому моменту. Результаты запишите в таблицу.

f , Гц									
I , дел									

5. Повторите опыт 8—10 раз для разных частот.
6. Постройте график зависимости спектральной характеристики уха на пороге слышимости $I = \varphi(f)$.
7. Сделайте вывод, запишите ответ.

16. Наблюдение некоторых психофизиологических особенностей зрения человека

Ц е л ь р а б о т ы: наблюдать такие свойства зрения человека, как его бинокулярность, «борьбу полей зрения», способность к аккомодации.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: рисунок для обнаружения слепого пятна; булавки, укрепленные на основании; штатив; ширма с двумя отверстиями, расстояние между которыми меньше диаметра зрачка; рисунок для определения «борьбы полей зрения»; лист белой бумаги.

Последовательность выполнения работы

У п р а ж н е н и е 1. Обнаружение аккомодации глаза.

1. Посмотрите через отверстие в ширме на штатив, находящийся на расстоянии 2—4 м от глаза.

2. На расстоянии 25—30 см от глаз поместите булавку. Обратите внимание на ее раздвоение.

3. Закройте одно из отверстий ширмы. Отметьте момент, когда исчезнет изображение булавки.

4. Повторите опыт с булавкой. Отметьте момент раздвоения штатива и исчезновения его изображения при закрытии одного из отверстий ширмы.

5. Объясните наблюдаемые явления и зарисуйте соответствующие схемы хода лучей (рис. 6).

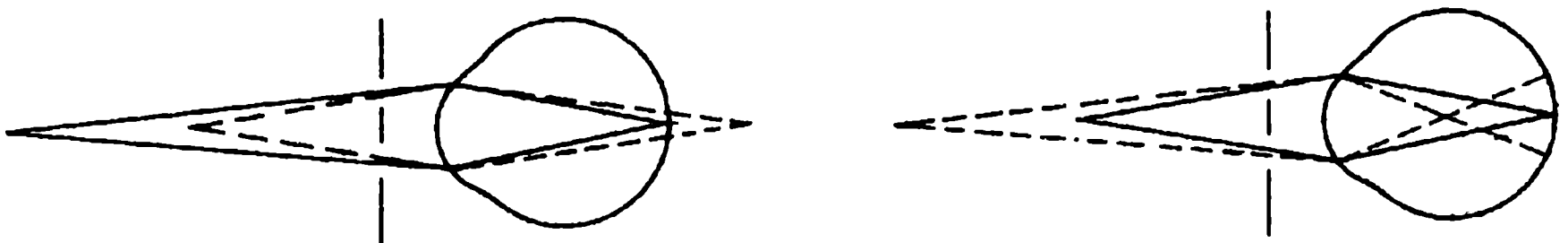


Рис. 6



Рис. 7

У п р а ж н е н и е 2. Обнаружение слепого пятна.

1. Поместите перед глазами рисунок 7.
2. Закрыв правый глаз, левым посмотрите на крест, расположенный в правой части рисунка.
3. Приближая и удаляя рисунок от глаза, убедитесь, что на определенном расстоянии изображенный в левой части рисунка круг выпадает из поля зрения.
4. Повторите опыт для другого глаза.
5. Объясните наблюдаемое явление и зарисуйте соответствующие схемы хода лучей.

У п р а ж н е н и е 3. Обнаружение «борьбы полей зрения».

1. Сверните из бумаги трубку в форме конуса длиной 15—20 см.
2. Посмотрите на рисунок 8.
3. Переводя взгляд вдаль или надавливая на одно из глазных яблок, пронаблюдайте за изменением изображения. Опишите, что вы увидели. (Изображения квадратов начнут сближаться, пока не окажутся полностью наложенными друг на друга. При этом изображения обоих квадратов попадут на идентичные участки сетчатки обоих глаз. Однако в результате «борьбы полей зрения» линии штриховки квадратов одновременно видны не будут. Будет появляться то одно, то другое изображение, или одни линии будут сменять другие в разных частях квадрата.)
4. Приставьте трубку широкой стороной к правому глазу, а к левому на уровне узкой части раструба приставьте

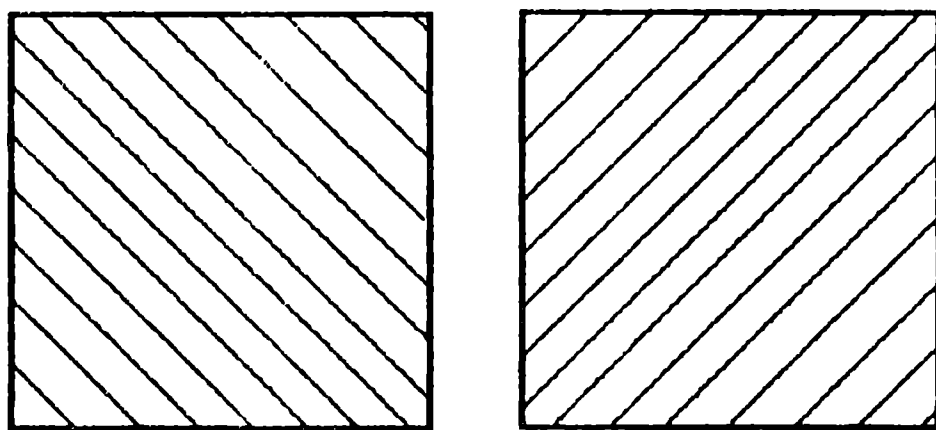


Рис. 8

ладонь. Смотрите обоими глазами так, чтобы взгляд левого глаза был направлен на ладонь, а правого — в раструб. Опишите, что вы увидели. (Вы должны увидеть, что ладонь кажется «продырявленной». Это объясняется тем, что поле зрения левого глаза оказывается сильнее, чем правого, в результате чего видна ладонь, приставленная к раструбу. Однако небольшой участок поля зрения правого глаза (отверстие раструба) освещен сильнее. Отсюда и «дырка» в предмете.)

5. Опишите свои ощущения письменно. Как вы объясните наблюдаемые явления?

У п р а ж н е н и е 4. Изучение особенностей бинокулярного зрения.

1. Один из участников опыта вкалывает 2 булавки в верхнюю часть деревянного бруска на некотором расстоянии друг от друга и, загородив опору ширмой, поворачивает устройство так, чтобы булавки оказались примерно на одном луче зрения.

2. Другой участник опыта, поочередно глядя на булавки то одним, то другим глазом, должен определить, какая из булавок находится ближе к нему.

3. Сравните результаты предыдущего опыта с результатом, полученным при рассматривании булавок обоими глазами.

4. Сделайте вывод о преимуществе зрения двумя глазами для оценки глубины расположения предметов.

5. Поясните свои рассуждения схемой хода лучей.

6. Установите примерно на одном луче зрения булавку и штатив. Глядя на булавку обоими глазами, наблюдайте, что будет происходить с изображением штатива.

7. Фиксируйте глазами штатив. Наблюдайте, что происходит с изображением булавки.

8. Повторите опыты, по очереди закрывая то один глаз, то другой.

9. Объясните происходящее в опытах с помощью схемы. Что будет, если при раздвоении изображений закрыть сначала левый, а потом правый глаз?

17. Определение характеристических параметров зрения человека

Ц е л ь р а б о т ы: определение силы аккомодации и остроты зрения, а также диаметра слепого пятна глаза человека.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: ширма с двумя отверстиями, расстояние между которыми меньше диаметра зрачка; две булавки, укрепленные на подставках; измерительная лента; карандаш, обернутый белой бумагой; лист белой бумаги; рисунок для определения остроты зрения (рис. 9).

Последовательность выполнения работы

У п р а ж н е н и е 1. Определение силы аккомодации глаза (работа выполняется вдвоем).

1. Определите ближнюю точку ясного видения. Для этого закройте один глаз, перед другим поместите ширму. Глядя открытым глазом через ширму на булавку, начните постепенно приближать ее к ширме. Определите и измерьте расстояние, на котором изображение булавки начнет раздваиваться. Результаты запишите в таблицу как положение ближней точки ясного видения для открытого глаза.

Таблица

Левый глаз		Правый глаз	
Ближняя точка ясного видения, м	Дальняя точка ясного видения, м	Ближняя точка ясного видения, м	Дальняя точка ясного видения, м

2. Определите ближнюю точку ясного видения (возможно только для близорукого глаза). Для этого булавку, наоборот, постепенно удаляйте от глаз. Отметьте расстояние, при дальнейшем увеличении которого изображение булавки начинает раздваиваться. Результаты определения запишите в таблицу.

3. Вычислите оптическую силу хрусталика при отсутствии аккомодации:

$$D_1 = \frac{1}{F_1}, \text{ или } D_1 = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{b},$$

где a_1 — расстояние до дальней точки ясного видения; b — расстояние до сетчатки; F_1 — фокусное расстояние глаза.



Рис. 9

4. Вычислите оптическую силу хрусталика при наибольшей аккомодации глаза:

$$D_2 = \frac{1}{F_2}, \text{ или}$$

$$D_2 = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{b},$$

где a_2 — расстояние до ближней точки ясного видения; b — расстояние до сетчатки; F_2 — фокусное расстояние глаза при напряженном состоянии хрусталика.

5. Вычислите силу аккомодации глаза:

$$D = D_2 - D_1.$$

6. Прodelайте опыт для другого глаза.

7. Нарисуйте схему хода лучей в рассмотренных случаях.

8. Запишите ответ.

У п р а ж н е н и е 2. Определение размеров слепого пятна глаза.

1. Нарисуйте в верхнем углу листа бумаги крест. Закройте левый глаз, правым фиксируйте изображение креста. Из правого верхнего угла по направлению к кресту ведите карандаш, обернутый белой бумагой. Отметьте расстояние BC , на котором изображение карандаша перестанет быть видимым, и расстояние AC , на котором опять возникнет изображение карандаша (рис. 10).

2. Измерьте расстояние OK от глаза до изображения.

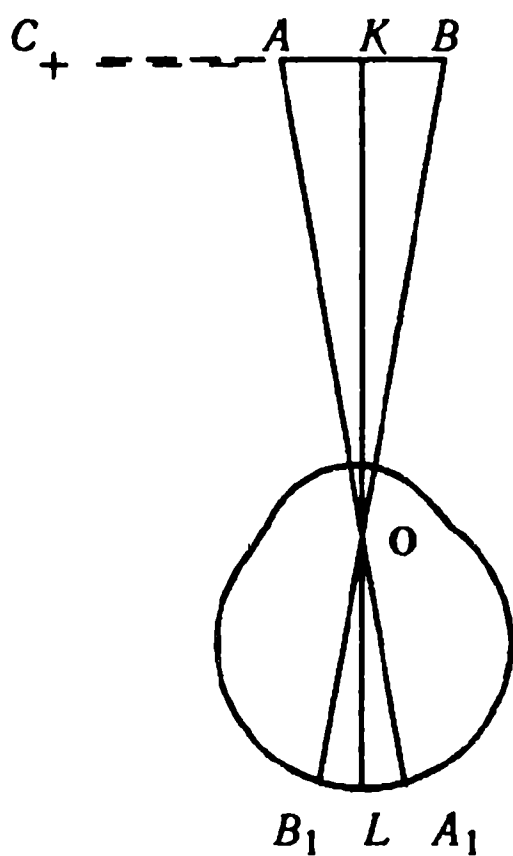


Рис. 10

3. По формуле

$$a = \frac{AB \cdot OL}{OK}$$

определите диаметр слепого пятна. (Расстояние OL от узловой точки глаза до сетчатки примите равным 17 см. Расстоянием от узловой точки до роговицы за малостью можно пренебречь.)

4. Повторите опыт для другого глаза.

5. Вычислите средний диаметр слепого пятна ваших глаз.

6. Запишите ответ.

У п р а ж н е н и е 3. Определение остроты зрения.

1. Прикрепите к доске чертеж, изображенный на рисунке 9.

2. Постепенно отходя от чертежа, определите расстояние, на котором обе линии перестанут восприниматься отдельно. Измерьте его.

3. Измерьте расстояние между линиями чертежа.

4. По формуле $d = \frac{AB \cdot OL}{OK}$ вычислите расстояние между двумя изображениями линий рисунка на сетчатке (см. рис. 10).

5. Вычислите разрешающее угловое расстояние глаза по формуле

$$\theta = \frac{d}{OL}$$

6. Определите остроту своего зрения по формуле

$$k = \frac{d}{x},$$

где $x = 5 \cdot 10^{-5}$ м — расстояние, соответствующее разрешающему угловому расстоянию нормального глаза, равному 1'.

7. Повторите измерения и вычисления для другого глаза.

8. Запишите ответ.

18. Определение спектральных границ чувствительности человеческого глаза

Ц е л ь р а б о т ы: определить спектральные границы чувствительности человеческого глаза, используя дифракционную решетку.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: лампа накаливания, прибор для определения длины световой волны.

Последовательность выполнения работы

1. Включите лампу и расположите ее за экраном со щелью.

2. Установите экран на расстоянии L от дифракционной решетки. Рассматривая щель в экране через дифракционную решетку, изменением взаимного положения экрана и лампы добейтесь наилучших условий видимости.

3. Измерьте расстояния от центра щели на экране до красного и фиолетового краев спектра. Измерьте эти расстояния по правую и по левую сторону от щели на экране и найдите их средние значения.

4. По измеренному расстоянию до положения красного края спектра и расстоянию от дифракционной решетки до экрана вычислите тангенс угла по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{ср}}}{L}.$$

5. Определите угол, а затем синус полученного угла ($\sin \varphi_{\text{кр}}$).

6. По известному значению постоянной решетки d и найденному значению синуса угла определите длину волны красного света на границе воспринимаемого глазом спектра:

$$\lambda_{\text{кр}} = d \sin \varphi_{\text{кр}}.$$

7. Повторите измерения и вычисления для фиолетового края спектра.

8. Запишите ответ. Сделайте вывод.

19. Определение солнечной постоянной

Ц е л ь р а б о т ы: определить одну из характеристик окружающего человека мира — солнечную постоянную.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: лампа накаливания мощностью 200—300 Вт с прозрачным баллоном, измерительная лента.

Последовательность выполнения работы

1. Включите лампу. Приблизив ее к лицу, вы веками закрытых глаз ощутите, что веки нагрелись за счет инфракрасного излучения лампы. Выключите лампу.

2. Выйдите на улицу, подставьте лицо под излучение солнца. Запомните ощущение тепла, идущего от него.

3. Вернувшись в класс, найдите для лампы такое положение, при котором ее излучение оказывает такое же световое и тепловое воздействие на кожу ваших век, как и солнечное излучение. Измерьте расстояние от вас до лампы.

4. Вычислите плотность потока излучения от лампы по формуле

$$\varphi_e = \frac{P}{4\pi R^2},$$

если принять, что лампа излучает во все стороны равномерно (здесь P — мощность лампы).

5. Предполагая, что спектр излучения Солнца и лампы одинаков, оцените значение солнечной постоянной.

6. Сравните полученный результат с табличным:
 $a = 1350 \text{ Вт/м}^2$.

7. Сделайте вывод, запишите результат.

Литература

1. М о щ а н с к и й В.Н. Формирование мировоззрения учащихся при изучении физики. — М., 1989.
2. Д ж а н к о л и Д. Физика. — М., 1989. — Т.1.
- 2* Д ж а н к о л и Д. Физика. — М., 1989. — Т.2.
3. С у о р ц Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. — М., 1986. — Т.1.
- 3* С у о р ц Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений, — М., 1986. — Т.2.
4. О р и р Дж. Физика. — М., 1981. — Т.1.
- 4* О р и р Дж. Физика. — М., 1981. — Т.2.
5. М э р и о н Дж.Б. Физика и физический мир. — М., 1975.
6. М э р и о н Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. — М., 1986.
7. Элементарный учебник физики /Под ред. Г.С.Ландсберга. — М., 1985. — Т.1.
8. С т р е л к о в С.П. Сборник задач по общему курсу физики. Механика. — М., 1977.
9. М е л е д и н Г.В. Физика в задачах. — М., 1985.
10. К а ц Ц.Б. Биофизика на уроках физики. — М., 1988.
11. С и л и н А.А. Трение и мы. — М., 1987.
12. К и к о и н И.К., К и к о и н А.К. Физика: Учебник для 9 класса средней школы. — М., 1992.
13. Б е з д е н е ж н ы х Е.А., Б р и к м а н И.С. Физика в живой природе и медицине. — Киев., 1976.
14. Ш а х м а е в Н.М. Физика. Основы механики: Пробный учебник для 8 класса средней школы. — М., 1982.
15. М а т в е е в А.Н. Механика и теория относительности. — М., 1986.
- 15* М а т в е е в А.Н. Молекулярная физика. — М., 1981.
- 15** М а т в е е в А.Н. Электричество и магнетизм. — М., 1983.
- 15*** М а т в е е в А.Н. Оптика. — М., 1985.
16. Е н о х о в и ч А.С. Справочник по физике и технике. — М., 1989.
17. Т р и м б л В. Место человека во Вселенной // Современные проблемы астрофизики: Сб. ст. — М., 1978.
18. Г о л д с м и т Д., О у э н Т. Поиски жизни во Вселенной. — М., 1983.
19. М о ш е Д. Астрономия. — М., 1985.
20. Н о в и к о в И.Д. Как взорвалась Вселенная. — М., 1988.
21. М и л ю к о в В.К., С а г и т о в М.У. Гравитационная постоянная в астрономии. — М., 1985.
22. Щ е р б а к о в В.В. Маятник Фуко в школе // Физика в школе. — 1990. — № 6.
23. Популярная медицинская энциклопедия. — М., 1979.
24. Физика / Под ред. А.С. Ахматова. — М., 1965.
25. М а к о в е ц к и й П.В. Смотри в корень! Сборник любопытных вопросов и задач. — М., 1984.
26. С а е н к о П.Г. Физика: Учебник для 9 класса средней школы. — М., 1990.
27. Г а з е н к о О.Г., Безопасность и надежность человека в космических полетах // Наука и жизнь. — 1984. — № 3.
28. Сборник задач по общему курсу физики /Под ред. М.С.Цедрика. — М., 1989.
29. П и о т р о в с к и й М.Ю. Физика на открытом воздухе. — Пг., 1924.
30. Г о р д о н Дж.Э. Конструкции, или Почему не ломаются вещи. — М., 1980.
31. К и т т е л ь И., Н а й т У., Р у д е р м а н М. Механика. — М., 1975.
32. Ш к л о в с к и й И.С. Вселенная. Жизнь. Разум. — М., 1987.
33. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. — М., 1976.

34. Д о у л С. Планеты для людей. — М., 1974.
35. Б о г д а н о в К.Ю. Физик в гостях у биолога. — М., 1986.
36. С а х а р о в Д.И. Сборник задач по физике. — М., 1967.
37. С и в у х и н Д.В. Общий курс физики: Механика. — М., 1979.
- 37* С и в у х и н Д.В. Общий курс физики: Термодинамика и молекулярная физика. — М., 1979.
- 37** С и в у х и н Д.В. Общий курс физики: Электричество. — М., 1983.
- 37*** С и в у х и н Д.В. Общий курс физики: Оптика. — М., 1980.
38. Т а р а с о в Л.В. Физика в природе. — М., 1986.
39. Х о л л и ч е р В. Человек в научной картине мира. — М., 1971.
40. П а л е й А.Б. Анатомия, или Почему плохо жилось динозаврам // Природа.— 1990. — № 7.
41. Политехнический словарь. — М., 1989.
42. В а н к е В.А., Л е с к о в Л.В., Л у к ь я н о в А.В. Космические энергосистемы. — М., 1990.
43. П и о т р о в с к и й М.Ю. Физика для биологов. — М.; —Л., 1936.
44. А в д у е в с к и й В.С., О с и п ь я н Ю.А., Л е с к о в Л.В., П о л е ж а е в В.И., С е р е б р о в А.Л. Невесомость: от физики к технологии // Наука и жизнь.— 1985. — № 2.
45. Г о ф м а н Ю.В. Законы, формулы, задачи физики: Справочник. — Киев, 1977.
46. С у р д и н В.Г. Приливные явления во Вселенной. — М., 1986.
47. М а т ю ш и н Г.Н. Три миллиона лет до нашей эры. — М., 1986.
48. У л у б е к о в А.Т. Богатства внеземных ресурсов. — М., 1984.
49. Д а в и д о в и ч В.Е., А б о л и н а Р.Я. Кто ты, человечество? Теоретический портрет. — М., 1975.
50. З и г г е л ь Ф.Ю. Занимательная космонавтика. — М., 1970.
51. Ш м и д т - Н и е л ь с е н К. Размеры животных: почему они так важны? — М., 1987.
52. Б а л а н д и н Р.К., Б о н д а р е в Л.Г. Природа и цивилизация. — М., 1988.
53. Легкая атлетика и ускоренное передвижение. — Л., 1977.
54. П л у ж н и к о в М.С., Р я з а н ц е в С.В. Среди запахов и звуков. — М., 1991.
55. К о р о л ю к И.П., Ц ы б А.Ф. Беседы о ядерной медицине. — М., 1988.
56. О с и п о в А.И. Самоорганизация и хаос. — М., 1986.
57. Ф и а л к о в Ю.Я. Не только в воде. — Л., 1989.
58. З и с м а н Г.А., Т о д е с О.М. Курс общей физики. — М., 1964. — Т.1.
59. М и л а н т ь е в В.П., Т е м к о С.В. Физика плазмы. — М., 1983.
60. Б е л о в К.П., Б о ч к а р е в Н.Г. Магнетизм на Земле и в космосе. — М., 1983.
61. М а н о й л о в В.Е. Электричество и человек. — Л., 1975.
62. Д о л и н П.А. Справочник по технике безопасности. — М., 1985.
63. Г у м и н с к и й А.А., Л е о н т ь е в Н.Н., М а р и н о в а К.В. Руководство к лабораторным занятиям по общей и возрастной физиологии. — М., 1990.
64. Г о л ь д ф а р б Н.И. Сборник вопросов и задач по физике. — М., 1975.
65. Р о д и к о в В.Е. Приключения радиолуча. — М., 1988.
66. В а в и л о в С.И. Глаз и солнце. — М., 1976.
67. А г а п о в Б.Т., М а к с ю т и н Г.В., О с т р о в е р х о в П.И. Лабораторный практикум по физике. — М., 1982.
68. Р ы м к е в и ч А.П. Сборник задач по физике для 8—11 классов средней школы. — М., 1990.
69. Задачи, упражнения и лабораторные работы по физике/ Под ред. Н.Д. Глухова. — М., 1989.
70. К р а у ф о р д Ф. Волны. — М., 1974.

71. Зеленкова Л.В. К изучению инфракрасного излучения// Физика в школе. — 1992. — № 1—2.
72. Ребане К.К. Энергия, энтропия, среда обитания. — М., 1985.
73. Кабардин О.Ф., Кабардина С.И., Шефер Н.И. Факультативный курс физики: 9 класс. — М., 1978.
74. Безденежных Е.А., Верна Н.Е., Игнатович Ю.В., Равикович С.Д., Черныш Е.П. Лабораторные работы по физике. — Киев, 1963.
75. Беркенблит М.Б., Глаголева Е.Г. Электричество в живых организмах. — М., 1988.
76. Карпенко М. Вселенная разумная. — М., 1992.
77. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. — М., 1979.
78. Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М., 1959.
79. Хоровиц Н. Поиски жизни в Солнечной системе. — М., 1988.
80. Николов Т. Долгий путь жизни. — М., 1986.
81. Радиация: Дозы, эффекты, риск. — М., 1988.
82. Кабардин О.Ф. Ядерные излучения и жизнь. // Физика в школе. — 1993. — № 2.
83. Сколько человеку требуется полезных ископаемых? // Природа. — 1990. — № 3.
84. Савельев И.В. Сборник задач и вопросов по общей физике. — М., 1982.
85. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. — М., 1979.
86. Булат В.Л. Оптические явления в природе. — М., 1974.
87. Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких. — М., 1989.

Оглавление

Предисловие	5
Глава 1. Физические основы кинематики	
§ 1. Физика. Человек. Окружающий мир	8
§ 2. Материальная точка. Система отсчета	17
§ 3. Перемещение. Скорость при прямолинейном равномерном движении. Сложение скоростей	23
§ 4. О системах единиц	29
§ 5. Средняя и мгновенная скорости. Ускорение	31
§ 6. Свободное падение тел	37
§ 7. Движение тела, брошенного под углом к горизонту	39
§ 8. Равномерное движение по окружности	43
Глава 2. Физические основы динамики	
§ 9. Законы Ньютона	46
§ 10. Закон всемирного тяготения	56
§ 11. Сила тяжести. Вес. Невесомость	61
§ 12. Сила упругости	72
§ 13. Сила трения	80
§ 14. Импульс. Закон сохранения импульса	90
§ 15. Реактивное движение	99
Глава 3. Работа. Энергия. Мощность	
§ 16. Механическая работа	105
§ 17. Кинетическая энергия	108
§ 18. Потенциальная энергия упругодеформированного тела	113
§ 19. Потенциальная энергия тел, взаимодействующих посредством тяготения	116
§ 20. Мощность	124
§ 21. Закон сохранения энергии	129
Глава 4. Вращательное движение	
§ 22. Динамика и энергетика вращательного движения	141
§ 23. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса	144
Глава 5. Статика	
§ 24. Элементы статики	151
Глава 6. Молекулярная физика	
§ 25. Температура	167

§ 26. Давление воздуха	173
§ 27. Вода. Давление в жидкости	183
Глава 7. Термодинамика	
§ 28. Первое начало термодинамики	200
§ 29. Второе начало термодинамики	208
Глава 8. Электростатика. Постоянный ток	
§ 30. Электромагнитное взаимодействие. Электрическое поле Земли . .	215
§ 31. Электрические свойства воды и живых клеток	220
§ 32. Электрические свойства тела человека. Поражение электрическим током	226
Глава 9. Магнетизм	
§ 33. Магнитные поля в природе	232
§ 34. Магнитное поле и живые организмы	240
Глава 10. Колебания и волны	
§ 35. Маятники	244
§ 36. Биоритмы	245
§ 37. Звук	249
§ 38. Радиоволны	261
Глава 11. Оптика	
§ 39. Глаз и зрение	267
§ 40. Фотометрия. Распространение света	284
Глава 12. Квантовая физика	
§ 41. Тепловое излучение	290
Глава 13. Физика ядра. Радиоактивность	
§ 42. Происхождение элементов. Химический состав живых организмов	296
§ 43. Свойства атомов и жизнь. Радиоактивность	300
§ 44. Роль мутаций в происхождении человека	304
Заключение. Физика и антропный принцип	307
Приложение. Лабораторные работы	309
Литература	331

Учебное издание

**Чандаева
Светлана Александровна**

ФИЗИКА И ЧЕЛОВЕК

**Редактор *В.А. Обменина*
Технический редактор *А.С. Латышков***

ЛР № 090015 от 22.08.91 г.

Подписано в печать 20.07.94. Формат 60 × 90^{1/16}.

Бумага офсетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 21,00. Тираж 5000 экз. Заказ № 731.

АО «Аспект Пресс». 111398, г. Москва, ул. Плеханова, 23, корп. 3.

**Отпечатано с оригинал-макета на Можайском полиграфкомбинате
Комитета Российской Федерации по печати.**

143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.