В.Н.Ланге

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАДОКСЫ, СОФИЗМЫ И ЗАНИМАТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Издательство «ПРОСВЕЩЕНИЕ» Москва 1967

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Опытный педагог не пренебрежет ни одной возможностью сделать свой урок более интересным и живым, поскольку интерес к изучаемому повышает внимание учащихся, способствуя этим более сознательному и прочному усвоению предмета.

Для активизации работы учащихся большое значение имеет рассмотрение различного рода занимательных задач, парадоксов и софизмов.

К сожалению, в преподавании физики занимательные задачи, парадоксы и софизмы используются недостаточно. В значительной мере это объясняется недостатком литературы.

Много занимательных парадоксов и софизмов опубликовал Я. И. Перельман в своих широко известных книгах «Занимательная физика», «Занимательная механика», «Знаете ли вы физику?». Широко пропагандировал софизмы и парадоксы А. В. Цингер, которому принадлежит бесспорный приоритет в отношении внедрения в педагогическую практику «метода парадоксов». Некоторые из приведенных ниже задач заимствованы из его книги «Задачи и вопросы по физике». Однако специального сборника физических парадоксов и софизмов в библиотеке учителя пока не было, если не считать вышедшей в 1898 г. небольшой брошюры Волжина.

Настоящая работа является попыткой создания именно такого сборника. В нем приводятся физические парадоксы и софизмы, различные по тематике и степени трудности. Некоторые из них известны уже давно, другие публикуются впервые. Не все помещенные в книге задачи одинаково интересны, однако автор надеется, что из предлагаемого материала сможет отобрать что-либо полезное для себя каждый учитель.

Сборник предназначен в качестве учебного пособия учителям физики средних школ. Вместе с тем он сможет заинтересовать учащихся старших классов, а также студентов техникумов и первых курсов институтов, в особенности педагогических, и, наконец, просто любителей занимательной физики.

Для более удобного пользования сборник разбит на две части. В первой из них приводятся тексты задач, а во второй помещены краткие решения, снабженные, где нам казалось уместным, некоторыми методическими указаниями.

Число указаний невелико, и они нигде не носят категорического характера — за учителем остается полная свобода использовать сборник по своему усмотрению в зависимости от педагогического мастерства, подготовленности учащихся и других обстоятельств.

Не пытаясь предусмотреть все возможные случаи, мы хотели бы, опираясь на собственный опыт, дать несколько советов о применении помещенных в сборнике задач.

Часто приходится наблюдать, как при решении задачи о баллистическом маятнике и подобных ей не только школьники, но и студенты первого курса института пытаются определить скорость системы после неупругого соударения, применяя закон сохранения лишь механической энергии. Нам кажется полезным, столкнувшись на уроке с такой ошибкой, здесь же, в классе, разобрать задачу № 31 сборника («Нарушение» закона сохранения энергии»). Вряд ли после анализа этого софизма аналогичные ошибки будут повторяться.

Задачи № 1, 9, 16, 43, 46, 56, 69, 99 можно использовать, составляя викторину для вечера занимательной физики, а более сложные, такие, как № 2, 4, 13, 87, 90, 117, можно дать на физической олимпиаде. Пользуясь случаем, автор выражает глубокую признательность П. А. Рымкевичу, А. П. Рымкевичу, Т. И. Ланге, Л. Н. Богдановскому и многим учителям Ленинградской области и Приморского края за ряд ценных советов и указаний.

Неоценимую помощь в работе над книгой автору оказала обстоятельная рецензия Д. И. Сахарова, безвременная кончина которого лишила нас возможности искренне поблагодарить его.

* * *

Первое издание книги было встречено с интересом и быстро разошлось. Во втором издании в тексты и решения задач внесены некоторые изменения и дополнения, увеличено также число задач.

Поскольку с 1963 г. в Советском Союзе введен новый стандарт ГОСТ 9867-61 на единицы измерений физических величин, согласно которому в литературе должна преимущественно применяться система единиц СИ, в настоящем издании большинство численных примеров приведено в единицах этой системы, за исключением тех случаев, когда внесистемные единицы оказываются по тем или иным соображениям удобнее.

Выполняя приятный долг, автор благодарит всех лиц, приславших свои отзывы и замечания на первое издание книги. Дальнейшие пожелания просьба присылать по адресу: Кишинев, проспект Ленина, 168, кафедра физики Кишиневского политехнического института.

Автор

I МЕХАНИКА

1. ИЗМЕНИЛОСЬ ЛИ ВРЕМЯ ПУТЕШЕСТВИЯ ИЗ МОСКВЫ В АСТРАХАНЬ И ОБРАТНО ПОСЛЕ ПОСТРОЙКИ ВОЛЖСКИХ ГЭС ИМЕНИ В. И. ЛЕНИНА И ИМЕНИ XXII СЪЕЗДА КПСС?

Пусть теплоход, имеющий собственную скорость v, плывет вниз по реке, скорость течения которой равна c. Прибыв на конечный пункт своего путешествия, отстоящий от начального на расстоянии l, теплоход поворачивает и движется обратно.

Так как течение направлено теперь навстречу, то весь выигрыш во времени по сравнению с движением в неподвижной воде, полученный при путешествии вниз по реке, теряется, ибо увеличение скорости теплохода в первом случае равно, естественно, ее убыли во втором. Поэтому течение реки, казалось бы, никак не должно сказаться на времени движения теплохода от Москвы до Астрахани и обратно. Также не повлияет, по-видимому, на длительность такого путешествия появление на Волге Куйбышевского и Волгоградского морей.

Правилен ли такой вывод?

2. УДИВИТЕЛЬНЫЕ ПРИКЛЮЧЕНИЯ ПАССАЖИРА МЕТРО.

Один из жителей Москвы каждое утро отправлялся на работу в метро. Хотя рабочий день его в учреждении начинался ежедневно в одни и те же часы, время его прихода на станцию могло, разумеется, несколько различаться в разные дни. Для простоты можно считать время прихода совершенно случайным.

При этих условиях кажется на первый взгляд правдоподобным предположить, что число дней, когда после его прихода на станцию первым придет поезд нужного пассажиру направления, будет примерно равно числу дней, когда первым прибудет поезд противоположного направления.

Каково же было удивление пассажира, когда он обнаружил, что нужные ему поезда приходят на станцию первыми в два раза реже, чем встречные! Решив выяснить причины непонятного явления, он стал отправляться на работу с другой станции, расположенной несколько дальше от его дома. Наблюдения, произведенные здесь, заставили его изумиться еще больше, так как на этой станции дело обстояло совершенно иначе — нужные поезда приходили первыми в 3 раза чаще!

Помогите пассажиру разобраться в причинах столь странного поведения поездов метро.

3. БУДУТ ЛИ ДВИГАТЬСЯ АЭРОСАНИ?

Предположим, что на конвейерной ленте установлена модель аэросаней, приводимая в движение, как обычно, воздушным винтом толкающего типа. Какова будет скорость модели относительно Земли, если конвейер и сани одновременно придут в движение в противоположных направлениях, то есть будут ли сани оставаться на одном месте или пойдут в какую-либо сторону?

4. КАКОВА СКОРОСТЬ ЛОДКИ?

Стоящий на берегу человек подтягивает лодку, выбирая с некоторой постоянной скоростью $v_в$ привязанную к носу лодки веревку. Разложим скорость $v_в$ так, как показано на рисунке 1. Тогда для скорости лодки $v_л$ получим:

$$v_л = v_в \cdot \cos\alpha.$$

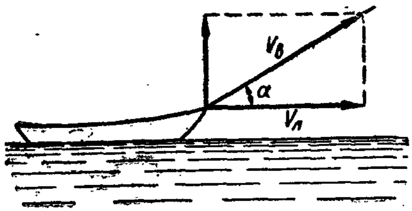

Рис. 1.

Из этой формулы следует, что, чем больше угол α, то есть чем ближе лодка к берегу, тем скорость ее меньше. На самом же деле наоборот — по мере приближения лодки к берегу ее скорость возрастает, в чем легко убедиться на опыте. Достаточно привязать к карандашу нитку и потянуть за нее так, как тянули лодку.

В чем же причина разногласий между теорией и опытом?

5. ЧЕМУ РАВНА СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ?

Из точки A в точку B мотоциклист двигался со скоростью 60 *км/ч*; обратный путь был им проделан со скоростью 40 *км/ч*. Определить среднюю скорость мотоциклиста за все время движения. Временем остановки в пункте B пренебречь.

6. ТИШЕ ЕДЕШЬ — СКОРЕЕ ПРИЕДЕШЬ!

Пусть необходимо определить начальную скорость брошенного вертикально вверх камня, оказавшегося спустя 4 *сек*. после броска на высоте 6 *м*.

Разрешим уравнение пути равнопеременного движения относительно начальной скорости

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

и вычислим полученное выражение при заданных выше условиях, полагая ускорение свободного падения равным для простоты -10 *м/сек*^{2} (знак минус означает, что ускорение направлено в сторону, противоположную той, в которую отсчитывается перемещение):

$$v_0 = \frac{2\cdot 6\ м + 10\ \frac{м}{сек^2}\cdot 16\ сек^2}{2\cdot 4\ сек} = 21{,}5\ \frac{м}{сек}.$$

Зададим вопрос, как должна измениться начальная скорость, чтобы на той же высоте (6 *м*) камень оказался через вдвое меньшее время? Необходимость ее увеличения кажется совершенно очевидной. Однако не будем спешить!

Предположив, что на высоте 6 *м* камень будет не через 4 *сек*, а через 2 *сек*, получим:

$$v_0' = \frac{2\cdot 6\ м + 10\ \frac{м}{сек^2}\cdot 4\ сек^2}{2\cdot 2\ сек} = 13\ \frac{м}{сек}.$$

Вот уж воистину как в поговорке: «Тише едешь — дальше будешь!»

7. «ВОПРЕКИ» ЗАКОНУ ИНЕРЦИИ.

Первый закон механики может быть сформулирован следующим образом: всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока воздействие других тел не заставит его изменить это состояние.

Почему же в таком случае мы часто наблюдаем, как пассажиры, стоящие в вагоне подходящей к станции электрички, наклоняются в момент остановки не вперед, как того требует закон инерции, а в противоположную сторону?

8. ВЕС ТЕПЛОВОЗА РАВЕН ВЕСУ ВАГОНОВ.

Если бы трение между ведущими колесами тепловоза и рельсами отсутствовало, то тепловоз не был бы в состоянии сдвинуть поезд с места. Согласно третьему закону Ньютона сила тяги, развиваемая при равномерном движении, в точности равна силе трения между его ведущими колесами и рельсами:

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{тр}} = k_1 \cdot P_1,$$

где k_1 — коэффициент трения колес тепловоза, которые мы все считаем для простоты ведущими, о рельсы и P_1 — вес тепловоза.

Также на основании третьего закона Ньютона при равномерном движении сила тяги должна быть равна той силе, против которой локомотив производит работу, то есть силе трения колес вагонов о рельсы:

$$F_{\text{тяги}} = k_2 \cdot P_2,$$

где k_2 — коэффициент трения колес вагонов о рельсы и P_2 — общий вес всех вагонов.

Сравнивая эти выражения, находим:

$$k_1 \cdot P_1 = k_2 \cdot P_2.$$

Сокращая на $k_1 = k_2$ (трение стали о сталь), получим явную нелепость:

$$P_1 = P_2,$$

то есть вес тепловоза равен весу вагонов?!

9. ПОЧЕМУ КОНЦЫ ОСЕЙ, ЛЕЖАЩИЕ В ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКАХ, ЗАТАЧИВАЮТ «НА КОНУС»?

Сила трения, как известно, определяется только коэффициентом трения, зависящим от рода соприкасающихся поверхностей, и силой нормального давления, но практически не зависит от площади трущихся поверхностей. Почему же в таком случае концы осей, лежащие в опорных подшипниках, затачивают «на конус», а концы осей, закрепленные в подшипниках скольжения, стремятся делать возможно тоньше (рис. 2)? В некоторых книгах утверждается, что эти меры способствуют уменьшению силы трения.

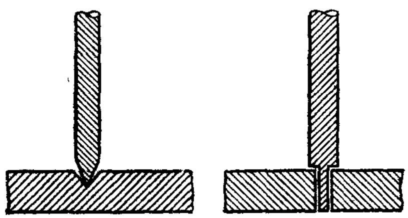

Рис. 2.

10. ТРЕНИЕ И ИЗНОС СТЕНОК ЦИЛИНДРА.

Внимательный осмотр достаточно долго прослужившего двигателя внутреннего сгорания показывает, что наибольший износ стенок его цилиндров сосредоточен в местах A и B, где происходит остановка и изменение направления движения поршня на противоположное (рис. 3).

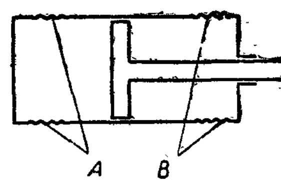

Рис. 3.

Казалось бы, этот факт противоречит «здравому смыслу», согласно которому износ должен быть особенно велик в тех местах, где скорость движения поршня максимальна. Ведь силы жидкого трения прямо пропорциональны величине скорости или даже (при больших скоростях) ее квадрату.

11. ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ ДОЛЖНО РАВНЯТЬСЯ НУЛЮ.

Начнем задачу несколько издалека. Пусть на горизонтальной площадке стоит прямоугольный брусок, имеющий высоту b и ширину a (толщина несущественна). Приложим к нему на высоте h направленную параллельно площадке силу F. Одновременно появится сила трения Q, равная F, если последняя не превышает максимального значения силы трения покоя $Q_{\text{макс}}=k\cdot P$ (рис. 4, a).

Поскольку силы F и Q не лежат на одной прямой, они создают момент $F\cdot h$, стремящийся опрокинуть брусок по часовой стрелке. Чем больше сила F и чем выше она приложена, тем больше опрокидывающий момент. Если бы существовала только пара сил F и Q, брусок опрокидывался бы при сколь угодно

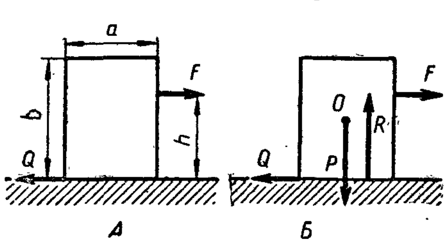

Рис. 4.

малой приложенной силе F. На самом деле, чтобы опрокинуть брусок, сила F должна иметь определенную величину. Следовательно, существует момент, препятствующий опрокидыванию. Происхождение момента легко понять.

Момент пары сил F и Q стремится приподнять левый край бруска и плотнее прижать к площадке его правую половину. В результате сила реакции опоры R, приложенная вертикально вверх к основанию бруска и равная его весу P, уже не будет проходить через центр нижней грани и центр тяжести бруска, а сместится несколько вправо (рис. 4, *б*). Чем больше величина силы F, тем больше опрокидывающий момент, тем дальше вправо должна сместиться сила R, чтобы брусок не опрокинулся. В зависимости от соотношения между величинами a, b, h и F могут быть два случая:

1. Сила F достигнет значения $Q_{\text{макс}} = k \cdot P$ прежде, чем R выйдет за пределы контура опоры. Тогда брусок придет в движение по плоскости, не опрокинувшись.

2. До того как F сравняется с $k \cdot P$, реакция опоры подойдет к правой границе нижней плоскости бруска. После этого момент пары сил R и P уже не сможет больше компенсировать момента пары F и Q, и брусок опрокинется.

Отсюда вытекает, между прочим, несложный способ определения коэфициента трения между бруском и поверхностью, на которой он стоит.

Приложим силу F, чуть-чуть превышающую $k \cdot P$, почти у самой нижней грани бруска. Он придет тогда в равномерное движение. Будем постепенно поднимать точку приложения силы F (все это легко проделать, вооружившись коробкой из-под туфель). Тогда при некоторой высоте брусок, не приходя в движение, начнет опрокидываться.

Запишем «граничные условия», при которых наблюдается переход от одного случая к другому, то есть равенство сил и моментов (последние будем определять относительно оси, проходящей через центр тяжести бруска и перпендикулярной плоскости рисунка, считая положительными моменты, вращающие брусок по часовой стрелке, и отрицательными — стремящиеся повернуть его в противоположном направлении):

$$R - P = 0$$
$$Q - F = 0$$
$$(F = k \cdot P)$$
$$F\left(h - \frac{b}{2}\right) + Q \cdot \frac{b}{2} - Ra - P \cdot 0 = 0.$$

Отсюда определяем коэффициент трения:

$$k = \frac{a}{h}.$$

Из последнего выражения видно, что не со всяким бруском опыт удастся: необходимо, чтобы высота бруска удовлетворяла условию $b > \frac{a}{k}$. Для куба, например, $\frac{a}{b} = 1$, и определить коэффициент трения «методом опрокидывания» нельзя, так как во всех реальных случаях коэффициент трения меньше единицы. Однако с прямоугольным бруском опыт чаще всего можно произвести, ориентировав грани соответствующим образом.

Сформулируем теперь софизм. Пусть на горизонтальной площадке помещен не брусок, а шар. Он имеет с площадкой единственную точку соприкосновения. Поэтому сила реакции опоры и вес всегда должны проходить через нее. Значит, момент пары сил R и P (или сумма моментов этих сил относительно точки соприкосновения) равен нулю. Следовательно, любая, даже очень малая, сила, приложенная к шару, должна привести его во вращение. Иными словами, коэффициент трения качения всегда должен равняться нулю! На самом же деле он, хотя и значительно меньше коэффициента трения скольжения, однако нулю все же не равен.

Где же ошибка в наших рассуждениях?

12. СПРАВЕДЛИВ ЛИ ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ ДЕЙСТВИЯ СИЛ!

Закон независимости действия сил заключается в следующем: если к телу приложено одновременно несколько сил, то действие каждой из них таково, как если бы других не существовало вообще. Посмотрим, к какому нелепому выводу приводит иногда этот принцип.

Пусть к телу приложена сила такой величины, что ее действие равно нулю, то есть она оставляет тело в состоянии покоя. Тогда и две такие силы не сдвинут тело с места. Следовательно, и сколь угодно большое число таких сил не приведет тело в движение.

Но это неверно, так как противоречит опыту. В чем же ошибка приведенного выше рассуждения?

13. С КАКОЙ СИЛОЙ ДАВЯТ НОЖКИ СТОЛА?

На рисунке 5 изображен стол, покоящийся на наклонной плоскости. Разложим его вес P, приложенный к центру тяжести стола C, на две параллельные составляющие F_1 и F_2, проходящие через концы ножек стола — точки A и B, как это показано в левой части рисунка. Известно,

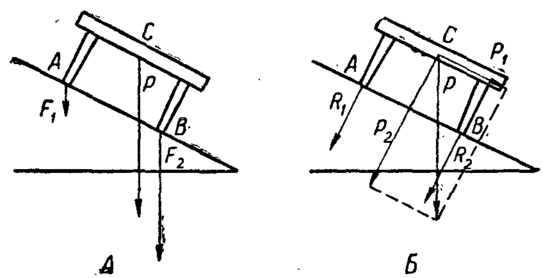

Рис. 5.

что силы F_1 и F_2 должны в сумме давать силу P и относиться обратно пропорционально расстояниям точек A и B до направления силы P. Произведя при точках A и B не показанное на рисунке разложение сил F_1 и F_2 на составляющие, перпендикулярные и параллельные наклонной плоскости, можно убедиться, что давления, производимые ножками A и B на наклонную плоскость, оказываются различными.

Однако можно поступить так, как показано на правой части рисунка: вначале разложить вес P на составляющие P_1 и P_2. Составляющая P_1 стремится привести стол в движение вниз по наклонной плоскости и, поскольку стол находится в покое, компенсируется силой трения. Разложив силу P_2 на составляющие R_1 и R_2, проходящие через точки A и B, убеждаемся, что эти силы (силы давления ножек стола на наклонную плоскость) равны.

Таким образом, давление ножок стола оказалось зависящим не только от веса стола, но и от способа разложения сил, что противоречит как здравому смыслу, так и жизненному опыту. Следовательно, в одном из рассуждений имеется ошибка.

В каком же именно?

14. ЗАГАДОЧНЫЙ РЫЧАГ.

Пусть рычаг (рис. 6) уравновешен силами F_1 и F_2. Обычно считают, что сила F_3, приложенная к концу рычага

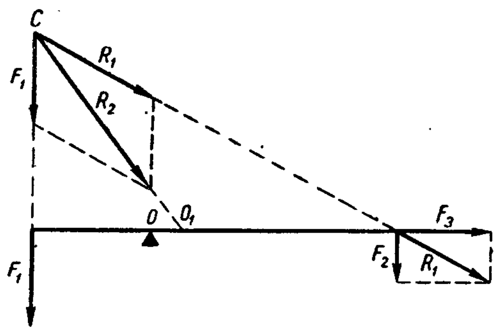

Рис. 6.

в направлении его длины, не нарушит равновесия. Но можно «доказать», что это не так!

Продолжим направление силы R_1, являющейся равнодействующей сил F_2 и F_3, и силу F_1 до взаимного пересечения в некоторой точке C и сложим их. Тогда сила R_2 явится равнодействующей всех трех сил: F_1, F_2 и F_3.

Из чертежа видно, что плечо силы R_2 относительно оси вращения рычага O не равно нулю. Поэтому рычаг, вероятно, должен прийти во вращение в направлении часовой стрелки.

Справедливо ли это заключение?

15. КАПРИЗНАЯ КАТУШКА.

От лиц, занимающихся рукоделием, можно слышать интересный рассказ о причудливом поведении катушки с нитками, закатившейся под диван, стол или шкаф. Если пытаться вытянуть катушку за нить, держа последнюю горизонтально, то катушка послушно выкатывается из своего убежища. Но попробуйте тянуть за наклонную нить, и вы станете свидетелем любопытного явления: вместо того, чтобы следовать за нитью, катушка спрячется еще дальше.

Чем объяснить причуды катушки?

П р и м е ч а н и е. При экспериментальной проверке следует брать катушку, с которой смотано еще не очень много ниток, а угол наклона выбирать не слишком малым.

16. ПРАВ ЛИ БЫЛ АРИСТОТЕЛЬ?

Жившего в IV веке до нашей эры (384—322 гг.) знаменитого греческого ученого Аристотеля недаром называют «отцом наук». Его вклад в развитие наук о природе, в том числе и в физику, огромен. Однако не всегда взгляды и умозаключения Аристотеля совпадали с принятыми в настоящее время. Рассмотрим для примера одно рассуждение, принадлежащее ему.

Камень под действием собственного веса падает с определенной скоростью. Если положить на него еще один такой же камень, то лежащий сверху будет подталкивать нижний, в результате чего скорость нижнего возрастет.

Между тем сейчас твердо установлено, что все тела, независимо от их массы, падают с одним и тем же ускорением, то есть за одинаковые промежутки времени увеличивают скорость на одну и ту же величину.

В чем же заключается допущенная Аристотелем ошибка?

17. СДВИНЕТСЯ ЛИ С МЕСТА БРУСОК?

Рассмотрим два бруска с массами M_1 и M_2, покоящиеся на горизонтальной идеально гладкой поверхности (рис. 7). Приложим к левому бруску силу F, которая через него будет действовать и на правый брусок. По третьему закону Ньютона второй брусок должен действовать на первый с равной по величине и противоположно направленной силой $-F$. Поскольку трение отсутствует (поверхность идеально гладкая), результирующая сила R, действующая на левый брусок, равна сумме приложенной силы F и силы реакции $-F$ второго бруска:

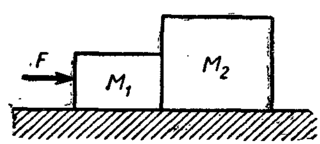

Рис. 7.

$$R = F + (-F) = 0.$$

Откуда ускорение левого бруска

$$a_1 = \frac{R}{M_1} = 0.$$

Таким образом, как бы ни была велика сила F, она никогда не сдвинет с места брусок M_1?!

18. ДВЕ ТЕЛЕЖКИ.

Второй закон Ньютона гласит, что одинаковые силы сообщают телам равных масс равные ускорения. Почему же в таком случае тележка, изображенная в верхней

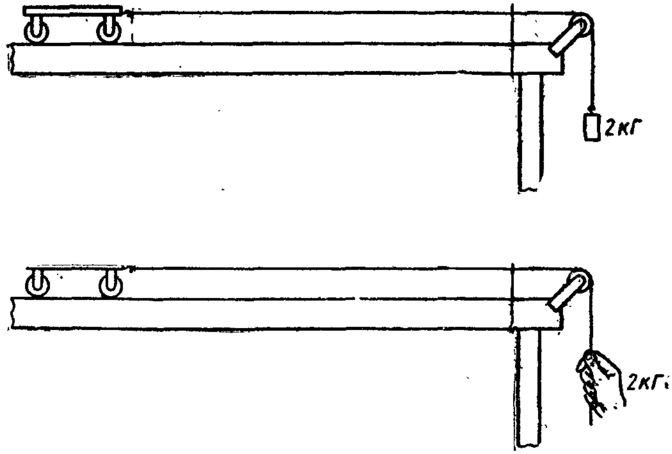

Рис. 8.

части рисунка 8, набирает скорость медленнее, чем тележка, показанная в нижней части того же рисунка, хотя массы тележек равны?

19. С КАКОЙ СИЛОЙ БУДУТ ТЯНУТЬ ЛОШАДИ?

Во втором номере журнала «Знание — сила» за 1933 год была опубликована следующая задача.

Одна лошадь, впряженная в повозку, тянет ее с силой 500 *н*. С какой силой будут тянуть повозку 5 таких лошадей, запряженных вместе?

В следующем номере журнала автор, приводя решение, пишет, что общая тяга увеличивается не до 2500 *н*, а примерно в 3,5 раза, поскольку лошади будут тянуть несогласованно, то есть несколько мешать друг другу.

Согласны ли вы с этим решением?

20. АВТОМОБИЛЬ НА ЛУНЕ.

По своей массе Луна в 81 раз меньше Земли, а ее диаметр составляет около четверти земного. В соответствии с этим все тела весят на Луне примерно в шесть раз меньше, чем на поверхности нашей планеты. Это позволит будущим межпланетным путешественникам проявлять на Луне чудеса акробатического искусства, прыгая в шесть раз выше, чем в земных условиях.

Отсюда следует вывод, что на Луне одинаковые силы приблизительно вшестеро «эффективнее» по сравнению с их действиями на Земле. Не следует ли из этого, что при неизменной силе тяги автомобиль должен набирать на Луне скорость в шесть раз быстрее, чем на Земле?

21. КАКОВО УСКОРЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ?

Три одинаковых шарика M_1, M_2 и M_3 подвешены на невесомых пружинах I и II один под другим так, что расстояния AB и BC между ними равны, как это показано на рисунке 9, и центр тяжести системы совпадает с центром шарика M_2. Если разрезать нить, удерживающую шарик M_1, вся система начнет падать под действием силы тяжести.

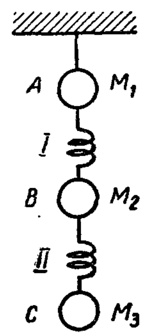

Рис. 9.

Как известно, ускорение силы тяжести системы можно найти, поделив сумму внешних сил, приложенных к системе, на ее массу:

$$a = \frac{M_1 g + M_2 g + M_3 g}{M_1 + M_2 + M_3} = \frac{3Mg}{3M} = g.$$

Однако приведенные ниже соображения как будто бы опровергают этот вывод.

Действительно, пружина I тянет шарик M_2 вверх сильнее, чем пружина II тянет его вниз, так как их натяжения и перед разрезанием нити и сразу же после него равны соответственно:

$$f_{\mathrm{I}} = 2\,Mg \text{ и } f_{\mathrm{II}} = Mg.$$

Следовательно, шарик M_2 (центр тяжести системы) должен падать с ускорением, меньшим g.

Как объяснить полученное противоречие?

22. СТРЕМИТЕЛЬНЫЙ ВЕЛОСИПЕДИСТ.

Велосипедист без особого труда может развить силу тяги 100 *н*. Считая силу трения постоянной и равной 50 *н*, а массу велосипедиста вместе с велосипедом 100 *кг*, найдем ускорение:

$$a = \frac{100\ н - 50\ н}{100\ кг} = 0{,}5\,\frac{м}{сек^2}.$$

Тогда скорость через 20 минут после начала движения станет

$$v = 0{,}5\,\frac{м}{сек^2}\cdot 1200\ сек = 600\frac{м}{сек}.$$

Но ведь это же скорость винтовочной пули!

23. ЧТО ПРЕДСТАВЛЯЕТ ОПАСНОСТЬ — СКОРОСТЬ ИЛИ УСКОРЕНИЕ?

В своей книге «Искусственные спутники» А. А. Штернфельд пишет: «Во время... космического путешествия недомогания могут быть вызваны главным образом нарушением нормального ощущения силы тяжести. Прежде всего заметим, что нет такой скорости, которой человеческий организм не мог бы перенести, если только движение не сопровождается чрезмерным ускорением. В самом деле, тревожит ли нас, хотя бы в малейшей мере, вращение Земли вокруг своей оси? А ведь на экваторе окружная скорость предметов, находящихся на поверхности Земли, достигает 1675 *км/ч*. Беспокоит ли нас движение Земли вокруг Солнца, скорость которого превышает 100 000 *км/ч*? ...Имея в виду эти факты, мы можем утверждать, что человеческий организм в состоянии переносить любую скорость».

Посмотрим, согласуется ли это с нашим жизненным опытом? При прыжке вниз опасность возрастает с высотой: мы безбоязненно прыгаем с высоты 1—2 *м*, но не рискнем без особой надобности совершить прыжок уже со второго этажа. В первом случае перед приземлением человек будет иметь относительно Земли скорость

4—6 *м/сек*, а во втором — около 10—13 *м/сек*, тогда как ускорение в обоих случаях одинаково и равно 9,8 *м/сек*^{2}.

Так что же представляет опасность — скорость или ускорение?

24. ЧТО ПОКАЖЕТ ДИНАМОМЕТР?

Известно, что сумма двух равных по величине и противоположно направленных сил равна нулю. На основании третьего закона Ньютона можно заключить, что, с какой силой лошадь тянет телегу, с такой же силой телега воздействует на лошадь, причем направления этих сил противоположны.

Казалось бы, что равнодействующая этих сил должна равняться нулю, а потому динамометр, включенный между лошадью и телегой, не должен ничего показывать.

Между тем силу тяги измеряют именно таким способом.

25. ПО ПРИМЕРУ МЮНХГАУЗЕНА.

Мы от души смеемся, читая рассказ, как барон Мюнхгаузен вытащил себя вместе с лошадью из болота за волосы. Но разве примерно не так поступает велосипедист, желая въехать на тротуар? Ведь в тот момент, когда переднее колесо велосипеда подходит к кромке тротуара, он подтягивает руль к себе. При этом передняя часть велосипеда приподнимается, и он без толчка въезжает с проезжей части улицы на тротуар.

Почему же то, что не могло удасться Мюнхгаузену, выполняет велосипедист?

26. КАК ОПРЕДЕЛИТЬ МАССУ, НАХОДЯСЬ НА СПУТНИКЕ?

Представьте, что вам необходимо определить массу какого-то тела. На Земле сделать это нетрудно — к услугам экспериментатора рычажные или пружинные весы. Но как определить массу тела, находясь на спутнике?

Ведь в условиях невесомости ни тот, ни другой тип весов работать не может. Неужели задача невыполнима? Оказывается, массу тела, во всяком случае приближенно, можно определить с помощью весов и в условиях невесомости.

Попробуйте ответить, какие весы (пружинные или рычажные) следует взять с собой и как ими нужно воспользоваться?

27. ЗАГАДКА СИЛ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ.

Закон всемирного тяготения записывается следующим образом:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Анализируя это соотношение, легко прийти к любопытным выводам: при неограниченном уменьшении расстояния между телами сила их взаимного притяжения должна возрастать также неограниченно, становясь бесконечно большой при нулевом расстоянии.

Почему же в таком случае мы без особого труда поднимаем одно тело с поверхности другого (например, камень с земли), встаем со стула и т. д.?

28. КАКИЕ ПРИЛИВЫ ДОЛЖНЫ БЫТЬ СИЛЬНЕЕ?

Приливы и отливы в морях и океанах вызываются, как известно, притяжением вод Солнцем и Луной. Солнце расположено от Земли в 390 раз дальше Луны, его масса в 27 000 000 раз превышает лунную, так что все земные предметы притягиваются к Солнцу в

$$\frac{27 \cdot 10^6}{390^2} = 180 \text{ раз}$$

сильнее, чем к Луне.

Казалось бы, что солнечные приливы должны быть поэтому значительно сильнее лунных. Однако на самом деле приливы, вызываемые Луной, несколько заметнее.

Чем же объяснить этот парадокс?

29. КАК ЗАВИСИТ РАБОТА ОТ СИЛЫ И ПУТИ!

Тот факт, что величина A связана с величиной B прямой пропорциональной зависимостью, принято записывать так:

$$A = k \cdot B,$$

где величина k носит название коэффициента пропорциональности.

Величина работы A, произведенной силой F на пути s, пропорциональна как силе, так и пути. Должны, следовательно, выполняться следующие два равенства:

$$A = k_1 \cdot F \qquad (1)$$

и

$$A = k_2 \cdot s. \qquad (2)$$

Перемножим эти равенства почленно:

$$A^2 = k_1 \cdot k_2 \cdot F \cdot s. \qquad (3)$$

Произведение $k_1 \cdot k_2$ обозначим через k_3^2. Тогда равенство (3) можно переписать в следующем виде:

$$A^2 = k_3^2 \cdot F \cdot s.$$

Извлекая из обеих частей равенства квадратный корень, получаем:

$$A = k_3 \cdot \sqrt{F \cdot s}, \qquad (4)$$

то есть работа пропорциональна корню квадратному из произведения силы на пройденный путь.

Но это еще не все! Ведь можно поступить иначе. Поделим почленно равенство (2) на равенство (1):

$$1 = \frac{k_2 \cdot s}{k_1 \cdot F}.$$

Обозначив отношение $\frac{k_2}{k_1}$ через k_4, получаем:

$$F = k_4 \cdot s. \qquad (5)$$

Физически это означает, что сила становится тем больше, чем больший путь пройден под ее действием.

Как объяснить эти несуразности?

30. СИЛА ТЯГОТЕНИЯ В РОЛИ ДВИГАТЕЛЯ.

Предположим, что в меридиональном направлении построена идущая строго горизонтально дорога. Поскольку Земля сплюснута с полюсов, ее экваториальный радиус примерно на 21 *км* превышает полярный. Значит, при перемещении с юга на север от экватора путешественник будет на этой дороге приближаться к центру Земли на 2,1 *м* после каждого километра пройденного пути. Следовательно, при достаточно малом коэффициенте трения, не превышающем 0,0021, автомобиль на такой дороге покатился бы с юга на север с выключенным мотором.

Можно ли воспользоваться силой тяжести в роли дарового двигателя?

31. «НАРУШЕНИЕ» ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.

Рассмотрим следующее рассуждение, как будто противоречащее закону сохранения энергии.

Пусть в покоящуюся тележку массой m попадает и застревает в ней снаряд с такой же массой, как и тележка, летевший перед тем горизонтально со скоростью v по направлению продольной оси тележки. От толчка тележка с застрявшим в ней снарядом придет в движение, начальную скорость которого можно найти из закона сохранения количества движения:

$$v_1 = \frac{mv}{2m} = \frac{v}{2}.$$

Следовательно, кинетическая энергия тележки с застрявшим в ней снарядом равна:

$$W_1 = \frac{2m\left(\frac{v}{2}\right)^2}{2} = \frac{mv^2}{4}.$$

Но перед попаданием в тележку снаряд имел кинетическую энергию

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

то есть в два раза большую. Таким образом, после соударения половина энергии бесследно исчезла.

Не могли бы вы сказать куда?

32. ТАИНСТВЕННОЕ ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЭНЕРГИИ.

Поднимая ведро с углем на 4-й этаж, мы увеличиваем энергию угля примерно на 800 *дж* (вес угля около 80 *н* и высота, на которую он поднят, приблизительно 10 *м*). Куда исчезает эта дополнительная потенциальная энергия после того, как уголь сгорит в печке?

33. ГДЕ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ?

Чтобы поднять какое-либо тело над земной поверхностью, необходимо совершить работу по увеличению его потенциальной энергии. Эта работа совершается в разных случаях за счет различных источников. Мотор лифта, например, черпает энергию из электросети; самолет поднимается за счет энергии, выделяющейся при окислении (сгорании) топлива в его двигателе и т. д.

Но за счет какой энергии поднимаются вверх стратостаты и метеорологические шары-зонды, не имеющие двигателей?

34. ПАРАДОКС РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Современные жидкостные реактивные двигатели, приводящие в движение ракеты, развивают силу тяги примерно 2000 *н* (около 200 *кГ*), если ежесекундно сгорает килограмм смеси топлива с окислителем. При минимальной скорости, необходимой для запуска искусственного спутника Земли (примерно 8 *км/сек* — первая космическая скорость), на каждый килограмм сгоревшей смеси развивается, следовательно, мощность:

$$N = F \cdot v = 2000\ н \cdot 8000 \frac{м}{сек} = 16 \cdot 10^6 \frac{дж}{сек} = 16\,000\ квт.$$

Между тем теплота сгорания часто применяемой в качестве горючего смеси керосина и азотной кислоты составляет примерно 6300 $\frac{кдж}{кг}$ (около 1500 $\frac{ккал}{кг}$), то есть при сгорании килограмма смеси должна была бы развиваться мощность «только» 6300 *квт* или в 2,5 раза меньше, чем нами получено выше.

Чем же объяснить, что при первой космической скорости топливо дает в 2,5 раза больше энергии, чем «полагается»?

35. ОБРУЧ И ГОРКА.

После того как обруч скатится с горки высотой H, его потенциальная энергия уменьшится; если при этом трение пренебрежимо мало, то ровно настолько же возрастет кинетическая энергия.

Исходя из закона сохранения энергии, имеем:

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

откуда конечная скорость обруча

$$v = \sqrt{2\,gH}.$$

Полагая высоту горки H равной 4,9 *м*, найдем

$$v = \sqrt{2\cdot 9{,}8\frac{м}{сек^2}\cdot 4{,}9\ м} = 9{,}8\frac{м}{сек}.$$

Однако опыт даст для скорости обруча, скатившегося с горки такой высоты, примерно 6,9 *м/сек*, то есть почти в полтора раза меньше. Такое большое расхождение с теорией отнести за счет трения никак нельзя. В чем же тогда причина?

36. КАК ПРАВИЛЬНО?

Для вычисления центростремительного ускорения можно пользоваться следующими выражениями:

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

и

$$a = \omega^2 R.$$

Из первого равенства вытекает, что центростремительное ускорение обратно пропорционально расстоянию движущейся точки от оси вращения, а из второго приходится сделать противоположный вывод: зависимость между ускорением и радиусом вращения прямая. Но ведь верным, по-видимому, должно быть что-то одно?!

37. ОСУЩЕСТВИМ ЛИ ТАКОЙ ДВИГАТЕЛЬ?

Пусть по изогнутой трубке (рис. 10) протекает вода. Поскольку ее движение происходит по дуге окружности, существует центростремительная сила, действующая со стороны стенок трубки на воду. В свою очередь в соответствии с третьим законом Ньютона должна существовать противоположно направленная и равная по величине сила, называемая иногда центробежной, приложенная со стороны воды к стенкам трубки. На рисунке эта сила обозначена буквой R.

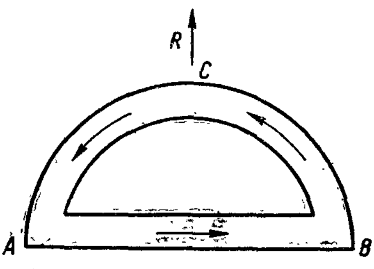

Рис. 10.

Придет ли система в движение под действием силы R?

38. В КАКУЮ СТОРОНУ ДОЛЖЕН ОПРОКИДЫВАТЬСЯ ПРИ РЕЗКОМ ПОВОРОТЕ АВТОМОБИЛЬ?

Чем более крутой поворот должен совершить автомобиль, мотоцикл или велосипед, тем большая по величине центростремительная сила для этого нужна и тем чаще, к сожалению, происходит опрокидывание. Можно сказать, что, чем больше величина центростремительной силы на повороте, тем больше вероятность аварии.

Но не кажется ли вам странным, что опрокидывание всегда происходит в сторону, противоположную направлению центростремительной силы,— поворачивая круто налево, автомобиль, как правило, опрокидывается в правую сторону и наоборот?

Как объяснить это противоречие?

39. ПРОСТОЙ ВЫВОД ФОРМУЛЫ МАЯТНИКА.

В школьном учебнике физики формула для периода колебания математического маятника приводится без доказательства. Между тем можно предложить простой вывод зависимости периода колебания маятника от его длины и ускорения силы тяжести, не требующий для понимания большой математической подготовки. Этот вывод мы и предлагаем вниманию читателей.

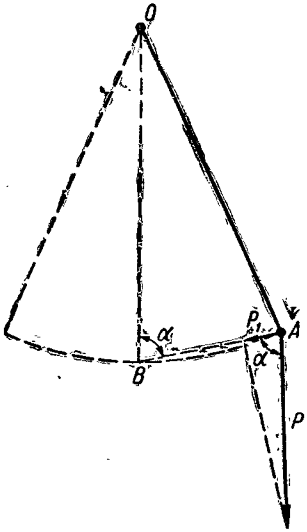

Рис. 11.

При малых углах отклонения (а только при этих условиях справедлива приводимая обычно формула маятника) дугу AB (рис. 11) можно заменить хордой AB. Из равнобедренного треугольника AOB для длины хорды AB имеем значение:

$$AB = 2 \cdot OB \cdot \cos\alpha = 2\,l \cdot \cos\alpha.$$

Движение маятника по этому пути можно рассматривать как равноускоренное, так как на маятник в направлении движения, то есть в направлении хорды AB, действует составляющая сила тяжести

$$P_1 = P \cdot \cos\alpha = mg \cdot \cos\alpha,$$

сообщающая ему, следовательно, ускорение

$$a = g \cdot \cos\alpha.$$

При равноускоренном движении путь, время и ускорение связаны зависимостью

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

Подставляя сюда значение ускорения при движении по хорде AB и ее длину, а также учитывая, что период в четыре раза больше времени, необходимого для прохождения пути AB, получим для искомой величины

$$T = 8 \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Почему же в приводимой в учебниках формуле перед квадратным корнем стоит коэффициент 2π, то есть примерно 6,28?

40. ВОЗМОЖНЫ ЛИ ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ?

В учебнике физики написано, что «продольные волны могут распространяться как в твердых, так и в жидких и газообразных телах, так как у всех этих тел при изменении объема возникают силы упругости. В газах и жидкостях при изменении формы силы упругости не возникают, поэтому упругие поперечные волны распространяться не могут».

Между тем в том же учебнике несколько раньше утверждалось, что «если бросить камень в пруд, то можно видеть, как от места падения камня в воде будут распространяться круговые поперечные волны» (*разрядка наша*).

Таким образом, автор учебника, вступая в противоречие с самим собой, вначале приводит пример поперечных волн в жидкостях, а затем возможность их существования отрицает.

Какое же из двух утверждений правильно?

41. НАБЛЮДАЕТСЯ ЛИ В ЭТОМ ОПЫТЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЗВУКА?

В одном из учебников физики описывается такой опыт. Если медленно вращать вокруг продольной оси поднесенный к уху звучащий камертон, то отчетливо будут слышны периодические усиления и ослабления звука. В учебнике утверждается, что наблюдаемый эффект может быть объяснен интерференцией волн, приходящих от различных ветвей звучащего камертона. Рассмотрим, так ли это.

Чтобы в результате интерференции звуковых волн, приходящих от разных ветвей камертона, возникло ослабление звука, колебания должны подходить, имея разность хода полволны. При частоте камертона 440 *гц*, например, и скорости звука 340 *м/сек* такая разность хода может возникнуть на расстоянии примерно 0,4 *м*. Между тем одну ветвь от другой отделяет расстояние всего в 2—3 *см*.

Можно ли отсюда сделать вывод, что наблюдаемое явление не имеет ничего общего с интерференцией?

42. ПОЧЕМУ УСИЛИВАЕТСЯ ЗВУК?

Обычно издаваемый камертоном звук настолько слаб, что слышен лишь на небольшом расстоянии. Однако, если камертон закреплен на резонаторе — прямоугольном деревянном ящике, его звук хорошо слышен в сравнительно большой аудитории.

Откуда берется во втором случае «лишняя» энергия? Не сталкиваемся ли мы здесь с нарушением закона сохранения энергии?

43. ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ ПЛОТНОСТЬ?

Плотность тела можно определить, разделив массу какого-либо тела, состоящего из интересующего нас вещества, на объем этого тела:

$$D = \frac{m}{V},$$

где m — масса тела, V — его объем и D — интересующая нас плотность.

Из написанного выражения видно, что плотность вещества обратно пропорциональна объему тела. Другими словами говоря, взяв при определении плотности тело вдвое большего объема, мы получим для искомой величины вдвое меньшее значение.

Как это совместить с тем фактом, что плотность является постоянной характеристикой вещества?

44. БУДЕТ ЛИ ДВИГАТЬСЯ ВАГОНЕТКА?

Пусть вагонетка, форма которой показана на рисунке 12, наполнена водой или какой-либо другой жидкостью, лучше всего тяжелой, например ртутью. Среднее давление на правую и левую стенки вагонетки одинаково, так как оно зависит только от высоты столба жидкости и ее удельного веса. Но площадь правой стенки больше, поэтому больше и сила давления, действующая на нее. Кажется поэтому, что вагонетка должна прийти в движение в направлении слева направо.

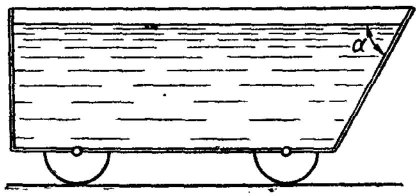

Рис. 12.

Не означает ли это осуществимость дарового двигателя?

45. ПОЧЕМУ ВОДА НЕ ВЫЛИВАЕТСЯ ИЗ ЧАЙНИКА?

Жидкость, налитая в чайник, весит гораздо больше, чем небольшая часть ее, заполняющая носик. Почему же жидкость не выливается из носика чайника? Не следует ли носик чайника делать такого же объема, что и сам чайник, чтобы чай из него не вытек под действием собственного веса?

46. ПУД ЖЕЛЕЗА И ПУД ПУХА.

На одной чашке рычажных весов лежит пудовая гиря, а на второй — кипа пуха. Стрелка весов стоит против нулевого деления, что означает равенство сил давления на чашки весов. Поскольку тела одинакового веса имеют одинаковые массы, мы делаем заключение о равенстве масс железной гири и кипы пуха. Однако на самом деле масса пуха несколько больше.

Не могли бы вы объяснить почему?

47. ДОЛЖНА ЛИ ВОДА ОКАЗЫВАТЬ ДАВЛЕНИЕ НА ДНО СОСУДА?

Лишь немногие знают, что Галилео Галилей (1564—1642 гг.) до конца своих дней сомневался в существовании атмосферного давления. Честь открытия последнего принадлежит Эванджелисте Торричелли (1608—1647 гг.) — замечательному ученику гениального физика.

В подтверждение своего мнения Галилей приводил следующее рассуждение.

На некоторый мысленно выделенный внутри объем воды (или любой иной жидкости) действуют две противоположно направленные силы — сила притяжения к Земле и выталкивающая сила. Согласно закону Архимеда эти силы равны по величине. Поэтому рассматриваемый объем пребывает в равновесии, то есть не всплывает и не тонет. *Можно сказать, что вода в воде ничего не весит.* Но как может оказывать давление на нижележащие слои то, что само не имеет веса?!

Так и воздух в воздухе, говорил Галилей, «не имея веса» сам, не может давить на расположенные ниже слои и в конечном счете на земную поверхность *.

Где же ошибка в рассуждениях Галилея?

48. ОШИБКА ФИЗИКА.

«Человеку свойственно ошибаться» — гласит латинская пословица. И действительно, ошибаются даже великие люди, как об этом свидетельствует пример, приведенный в предыдущей задаче. А вот еще один.

В начале нашего века дирижабли и воздушные шары наполнялись водородом. Во время сражений первой мировой войны они становились удобным объектом обстрела, так как малейшее попадание пули и снаряда почти всегда приводило к взрыву водорода и гибели шара

* Мы поставили в этой фразе кавычки, так как употребили выражение не в буквальном смысле: Галилей не сомневался в весомости воздуха. Более того, он был первым, кому удалось (в 1637 г.) определить его плотность. Но, как ни странно, он не верил в существование атмосферного давления.

вместе с экипажем. Потери были настолько велики, что воюющие стороны были вынуждены вскоре отказаться от использования воздушных шаров для военных целей.

Но однажды над Лондоном появился необычайный дирижабль: он получил множество попаданий, однако катастрофы вслед за этим не последовало. Оказывается, с 1918 г. немцы стали применять для наполнения дирижаблей гелий.

Когда об этом стало известно, один физик сказал: «Гелий вдвое тяжелее водорода, следовательно, подъемная сила шаров должна уменьшиться вдвое». На самом же деле подъемная сила осталась практически неизменной. Как это объяснить?

49. ЗАГАДКА ЧЕРДАЧНЫХ ОКОН.

Вот что сообщил в редакцию журнала «Знание — сила» один из читателей.

«У нас в селе осенью и зимой дуют такие сильные ветры, что с крыш срывается черепица.

Задумались мы, как спасти черепицу, а один старик говорит: — Надо на фронтонах домов делать чердачные окна.

Удивились мы этому совету, но стали проверять. И что же: где есть окна — цела черепица. Где нет — летит с крыш. В чем тут дело?»

Попробуйте и вы объяснить «секрет» чердачных окон.

50. ПОЧЕМУ СКОРОСТИ РАЗЛИЧНЫ?

Мы не удивляемся, если скорости плывущих по реке в одном направлении пароходов различны,— это можно объяснить различием в их конструкции и мощности двигателей.

Но почему с разной скоростью плывут по реке не имеющие собственных двигателей плоты? Замечено даже, что, чем сильнее загружен плот, тем более быстроходным он становится.

С чем это связано?

II ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

51. ДОСТИГАЮТ ЛИ ДНА ЗАТОНУВШИЕ КОРАБЛИ?

Все тела под воздействием давления сжимаются: сильнее всего — газы, много меньше — жидкости и больше всего сопротивляются попыткам уменьшить их объем твердые тела.

Не вытекает ли отсюда, что тонущие на глубоком месте корабли никогда не достигают дна, поскольку на больших глубинах вода сжата так сильно, что ее удельный вес превышает удельный вес металла, из которого изготовлен корпус судна?

Профессор Аронакс, герой романа Жюля Верна «Двадцать тысяч лье под водой», утверждал, что во время пребывания на подводной лодке «Наутилус» ему удалось наблюдать такие корабли-призраки, висящие между поверхностью и дном океана.

Может ли так быть?

52. КАКОВА ТЕМПЕРАТУРА НА БОЛЬШОЙ ВЫСОТЕ?

Уже первые воздухоплаватели, поднимавшиеся сравнительно невысоко над земной поверхностью, отметили понижение температуры воздуха. На высоте нескольких километров, где проложены трассы современных пассажирских реактивных самолетов, господствует такой сильный мороз, что пассажиры попросту бы замерзли, если бы кабины самолета не отапливались.

Однако при дальнейшем подъеме наблюдается так называемая и н в е р с и я, то есть температура начинает возрастать, и на высоте нескольких сотен километров молекулы воздуха обладают скоростями, которым соответствуют температуры в несколько тысяч градусов!

Почему же в таком случае не плавятся и не сгорают летающие именно на таких высотах в течение длительного времени искусственные спутники Земли?

53. НЕОБЫЧНЫЙ МЕТЕОРИТ.

В 1860 г. в Индии упал метеорит. Прочертив на небе огненный след, раскаленное добела тело упало в болото. Каково же было удивление подбежавших людей когда на месте падения метеорита они обнаружили глыбу... льда. Итак, «небесный огонь» принес в знойную Индию лед!

Как объяснить этот парадокс природы?

54. ВОПРЕКИ ТЕПЛОВЫМ ЗАКОНАМ.

Имеются три одинаковых дьюаровских сосуда *А*, *Б* и *В*. В первых двух налито по одному литру воды при температуре 80 и 20°С соответственно. Имеется также еще один пустой сосуд *Г* с абсолютно теплопроводными стенками. Размеры сосуда *Г* позволяют свободно помещать его внутрь дьюаровских сосудов.

Можно ли, оперируя всеми четырьмя сосудами, нагреть при помощи горячей воды холодную так, чтобы конечная температура ее стала выше конечной температуры горячей? Смешивать воду *А* и *Б* при этом не разрешается.

Обычно задачу считают невыполнимой на том основании, что переход тепла «сам собой» происходит лишь от тел более нагретых к телам с меньшей температурой и прекращается, как только температуры обоих тел сравняются. Однако задача все же имеет решение.

Попробуйте его отыскать.

55. КАК БЫСТРЕЕ?

Я очень тороплюсь, но перед уходом из дому хочу выпить стакан чаю со сливками. Как поступить, чтобы скорее остудить горячий чай: сразу долить в него холодные сливки, а затем выждать пять минут или вначале подождать пять минут, а после добавить сливки?

Если считать, что «от перемены слагаемых сумма не меняется», можно поступать как угодно. Однако всегда ли конечный результат не зависит от последовательности действий?

56. КАКАЯ ШКАЛА ВЫГОДНЕЕ?

В некоторых странах при измерении температур до сих пор пользуются шкалой, предложенной в 1730 г. французским физиком Реомюром. В этой шкале точка плавления льда, как и в шкале Цельсия, принята за 0°, но считается, что вода при нормальном давлении закипает при 80°.

Рассчитаем количество тепла, необходимого, чтобы вскипятить 100 *г* воды, взятой при температуре таяния льда.

Вычисления, выполненные в системе СИ по шкале Цельсия, дают

$$Q = 0{,}1\ \textit{кг}\cdot 4{,}19\,\frac{\textit{кдж}}{\textit{кг}\cdot\textit{град}}\cdot 100\ \textit{град} = 41{,}9\ \textit{кдж}.$$

Те же вычисления, произведенные в градусах шкалы Реомюра, приводят к значению только

$$Q' = 0{,}1\ \textit{кг}\cdot 4{,}19\,\frac{\textit{кдж}}{\textit{кг}\cdot\textit{град}}\cdot 80\ \textit{град} = 33{,}5\ \textit{кдж},$$

то есть, пользуясь второй шкалой, мы, казалось бы, затрачиваем на нагревание воды на 8,4 *кдж* меньше тепла. Так ли это?

57. ЗА СЧЕТ ЧЕГО СОВЕРШАЕТСЯ РАБОТА?

Чтобы система совершила работу, к ней, на основании закона сохранения энергии, необходимо подвести соответствующее количество энергии. Так, чтобы газ, находящийся под поршнем в цилиндре, расширяясь, поднимал поршень, необходимо газ подогревать.

Но иногда тех же результатов можно добиться, действуя противоположным образом. Нальем воду в чугунный шар доверху и герметически закупорим его. Если теперь охладить шар ниже 0°С, отняв у него тепло, то замерзающая вода разорвет чугун, то есть совершит работу.

Где же источник энергии, разрушившей шар?

58. СНОВА ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЭНЕРГИИ.

Согнув стальную полоску, мы сообщаем ей некоторый запас энергии. Поместим полоску в согнутом состоянии в стакан так, чтобы стенки стакана не давали пружине возможности распрямиться, и наполним стакан крепкой серной кислотой. Сталь постепенно растворится в кислоте, и вместе с пружиной бесследно исчезнет запасенная в ней энергия.

Но разве возможно исчезновение энергии?

59. КУДА ИСЧЕЗАЕТ ЭНЕРГИЯ ТОПЛИВА, СГОРЕВШЕГО В РАКЕТЕ?

Представим установленную вертикально ракету. Сила тяги, развиваемая ее двигателями, может меняться в очень широких пределах. Регулируя подачу топлива, можно, в частности, создать тягу, в точности равную весу ракеты. В таком случае она, уподобившись «гробу Магомета», который, по представлению мусульман, висит ни на что не опираясь, повиснет над поверхностью Земли неподвижно, не падая, но и не поднимаясь.

Создается кажущееся парадоксальным положение: в двигателях сгорает топливо, развивается большая тяга, но производимая работа, в согласии с формулой

$$A = F \cdot s,$$

равна нулю, так как перемещение под действием силы отсутствует.

Куда же в таком случае девается энергия сжигаемого топлива?

60. МОЖНО ЛИ ПОВЫСИТЬ ТЕМПЕРАТУРУ ТЕЛА, НЕ СООБЩАЯ ЕМУ ТЕПЛА!

На первый взгляд поставленный в заголовке вопрос звучит совершенно нелепо, примерно так, как если бы спросили: «Можно ли нагреть тело, не нагревая его?» Однако, несмотря на кажущуюся абсурдность, на вопрос следует ответить утвердительно.

Попробуйте привести пример повышения температуры тела, не участвовавшего в теплообмене с окружающими телами!

61. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ДЛИНА.

Линейные размеры тела связаны с температурой следующим образом:

$$l_t = l_0(1 + \alpha t).$$

Положим, что температура понизилась до значения, равного:

$$t = -\frac{1}{\alpha}.$$

Подставляя эту температуру в первое выражение, получим:

$$l_t = l_0\left(1 - \alpha \cdot \frac{1}{\alpha}\right) = 0!$$

А если температуру понизить еще больше? Неужели размеры тела станут отрицательными?

62. ВСЕГДА ЛИ СПРАВЕДЛИВ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ?

На рисунке 13 изображены две трубки, отличающиеся только тем, что раздутия в них расположены на различной высоте. Если откачать из трубок воздух, погрузить их открытые концы в чашку со ртутью и открыть краны, то атмосферное давление загонит ртуть в трубки. При этом будет совершена работа, равная, как известно из курса физики,

$$A = P \cdot V,$$

где P — величина атмосферного давления, V — объем трубок, заполненный ртутью. Если внутренние объемы трубок вместе с полостями равны, то должны быть равными и работы по подъему ртути в трубки.

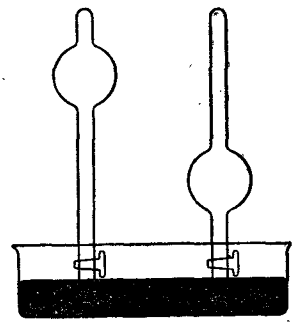

Рис. 13.

Однако в левой трубке основная масса ртути окажется выше, чем в правой. Отсюда следует, что при одинаковых совершенных работах потенциальная энергия в трубках изменилась на различную величину, что, как кажется на первый взгляд, находится в явном противоречии с законом сохранения энергии.

Где же ошибка в приведенном рассуждении?

63. ЗАГАДКА КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ.

Погрузив в воду достаточно тонкую (капиллярную) трубку из стекла, можно наблюдать, как вверх по трубке поднимется столбик воды. Высота подъема зависит от диаметра трубки, находясь с ним в обратно пропорциональной зависимости. Никаких видимых изменений ни с трубкой, ни с водой не происходит.

За счет какого же источника энергии возможны капиллярные явления?

64. УМНЫЕ СПИЧКИ.

Налейте в хорошо вымытую тарелку чистой воды (если нет дистиллированной, подойдет для этой цели и хорошо прокипяченная) и набросайте на ее поверхность несколько спичек.

Если теперь коснуться воды в промежутке между спичками кусочком сахара, то спички, словно желая полакомиться сладким, подплывают к сахару поближе. Но стоит коснуться воды мылом, как спички стремительно «разбегаются» во все стороны.

Как объяснить столь «разумное» поведение неразумных предметов?

65. СВЕРХПРОЧНАЯ НИТЬ.

Разрыв нити при растяжении происходит там, где ее прочность минимальная («Где тонко, там и рвется» — гласит русская пословица). Следовательно, совершенно однородная, не имеющая дефектов нить не может быть разорвана вообще никакой силой!

66. КАК ПРОИЗВОДИТСЯ ВОЛОЧЕНИЕ?

На рисунке 14 схематически представлен процесс волочения, в результате которого из толстой проволоки получается более тонкая. Как видно из рисунка, после прохождения через волочильный глазок сечение заготовки уменьшается. Возникает естественный вопрос: почему несмотря на то, что ей приходится передавать большие усилия, необходимые для осуществления процесса волочения, тонкая часть проволоки, прошедшая через глазок, не разрывается, тогда как толстая деформируется?

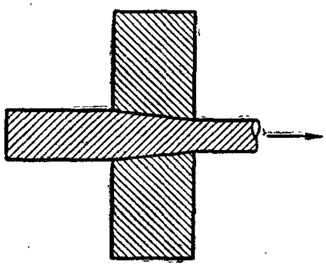

Рис. 14.

67. ОТЧЕГО ИСПАРЯЕТСЯ ВОДА?

Переход тепла от одного тела к другому происходит только в том случае, если между ними существует разность температур. Поэтому совершенно непонятно, почему постепенно испаряется налитая в блюдце или стакан вода, имеющая температуру окружающего воздуха. Ведь для испарения каждого грамма жидкости необходимо определенное количество тепла, которое вода из окружающего воздуха получить не может, так как имеет с ним, по условиям опыта, одинаковую температуру.

Как же все-таки происходит испарение?

68. ВОПРОС СТУДЕНТКЕ.

Одной итальянской студентке на экзамене был задан следующий вопрос: «Как вам известно, точка кипения прованского масла выше, чем точка плавления олова. Как вы объясните, почему можно жарить пищу на прованском масле в луженой оловом кастрюле?» (Лучшая посуда в Италии — медная с оловянной полудой.)

Что должна была ответить студентка?

69. КАК ВЫГОДНЕЕ КИПЯТИТЬ ВОДУ?

Известно, что с понижением давления температура кипения воды также уменьшается. Почему бы в таком случае не устраивать в кухонных кастрюлях отсасывание воздуха? Ведь это позволило бы сэкономить большое количество топлива.

70. МОЖНО ЛИ ОБЖЕЧЬСЯ ЛЬДОМ И РАСПЛАВИТЬ ОЛОВО В ГОРЯЧЕЙ ВОДЕ?

Как это ни парадоксально на первый взгляд звучит, возможно и то, и другое. Не можете ли вы объяснить, при каких условиях это возможно?

71. СКОЛЬКО ТОПЛИВА СЭКОНОМИТСЯ?

Некто узнал о трех изобретениях: применение первого из них обещало экономию топлива 30%, второе позволяло надеяться на 25% экономии, а от внедрения в практику третьего ожидали экономию 45%. Этот человек решил построить такую машину, в которой применялись бы все три изобретения, рассчитывая сэкономить $30\% + 25\% + 45\% = 100\%$ топлива. Правильны ли расчеты «изобретателя»?

72. ПОЧЕМУ НЕ ПОСТРОЯТ ТАКУЮ МАШИНУ?

Понятно, по каким причинам до сих пор не построена машина, которая совершала бы работу «сама собой», не имея источников энергии. Невозможность осуществления «вечного двигателя» непосредственно вытекает из закона сохранения энергии, справедливость которого подтверждена многовековым опытом всего человечества.

Почему, однако, никому не удалось сконструировать устройство, работающее только за счет охлаждения океанских вод? Ведь это сулит исключительно заманчивые перспективы! Нетрудно подсчитать, что при охлаждении Мирового океана только на 1°С выделилось бы такое гигантское количество энергии, что при нынешних нормах потребления его хватило бы человечеству на десятки тысяч лет. Практически такое гипотетическое устройство явилось бы своеобразным «вечным двигателем». В науке его так и принято называть «вечным двигателем второго рода». Заметим, между прочим, что постройка вечного двигателя второго рода не противоречит закону сохранения энергии.

73. КОГДА К.П.Д. АВТОМОБИЛЯ БОЛЬШЕ?

Максимально возможный при данном нагревателе и холодильнике коэффициент полезного действия тепловой машины можно рассчитать, пользуясь формулой:

$$\text{к.п.д.} = \frac{T_{\text{нагрев}} - T_{\text{холод}}}{T_{\text{нагрев}}},$$

где $T_{нагрев}$ и $T_{холод}$ — абсолютные температуры нагревателя и холодильника соответственно.

Из этого выражения видно, что при неизменной температуре нагревателя к.п.д. растет при понижении температуры холодильника.

Почему же в таком случае автомобиль (также являющийся тепловой машиной) потребляет зимой значительно больше бензина, чем летом? Ведь температура атмосферного воздуха, играющего роль холодильника, зимой ниже, тогда как температура образующихся при сгорании бензина газов практически одинакова и зимой, и летом.

74. ВОЗМОЖЕН ЛИ «ДЕМОН» МАКСВЕЛЛА?

Анализ предыдущих двух софизмов позволил установить, что для работы тепловой машины необходимо наличие двух тел с разной температурой — нагревателя и холодильника. Если нет разности температур, тепловой двигатель работать не будет, что формально вытекает также из формулы, приведенной в тексте задачи № 73.

Но нельзя ли сконструировать такую установку, где бы разность температур возникала «сама собой», автоматически, в результате действия самой машины? Такое устройство впервые было предложено в середине прошлого века выдающимся английским физиком Д. К. Максвеллом (1831—1879 гг.).

Пусть, рассуждал Максвелл, камера, заключающая некоторый газ, разделена на две равные половинки с дверцей (см. рис. 15). Дверца имеет механизм управления (Максвелл назвал его «демоном»), способный различать среди молекул более быстрые и более медленные. Если «демон» начнет открывать и закрывать дверцу так, чтобы пропускать быстрые молекулы только справа налево, а более медленные лишь в противоположном направлении, то некоторое время спустя все быстрые молекулы окажутся в левой половине камеры, а все мед-

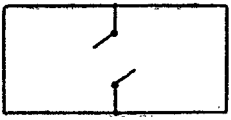

Рис. 15.

ленные — в правой. Тогда температуры слева и справа окажутся различными, так как температура определяется скоростями молекул.

Но там, где есть разность температур, может работать тепловой двигатель. После того как в результате его действия температуры в обеих частях камеры сравняются, процесс сортировки молекул по скоростям можно повторить, и так без конца, пока не износятся детали машины.

Таким образом, мы все же получили вечный двигатель?!

III ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

75. ДОЛЖЕН ЛИ ТЕЧЬ ТОК ЧЕРЕЗ ПРОВОДНИК, ЗАМЫКАЮЩИЙ ПОЛЮСА БАТАРЕИ?

Рассмотрим две электрические схемы, показанные на рисунке 16. Если ток не течет по проводнику *А1В*, то его не будет и в проводнике *А2В*, присоединенном к тем же точкам *А* и *В*, что и проводник *А1В*.

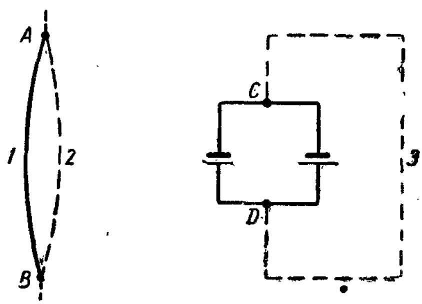

Рис. 16.

С другой стороны, если соединить два одинаковых гальванических элемента параллельно, то как во «внешнем», так и во «внутреннем» участках образовавшейся цепи, то есть ни в первом, ни во втором элементах, тока не будет. Таким образом, между точками *С* и *D* ток отсутствует, как и между точками *А* и *В* в первом случае. Рассуждая по аналогии, следует заключить, что ток должен отсутствовать и в проводнике *C3D*, присоединенном к полюсам батареи — точкам *С* и *D*.

Не противоречит ли это заключение нашему жизненному опыту?

76. СИЛА ТОКА В ОТВЕТВЛЕНИИ РАВНА СИЛЕ ТОКА В НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЧАСТИ ЦЕПИ?!

Пусть две электрические лампы включены в сеть так, как показано на рисунке 17. Обозначив ток в лампе $Л_1$ через I_1 и ток в лампе $Л_2$ через I_2, можем записать

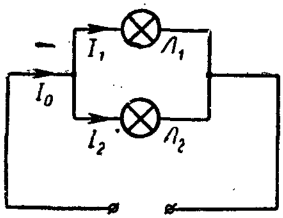

Рис. 17.

$$I_1 + I_2 = I_0,$$

где I_0 — сила тока в неразветвленной части цепи. Помножив обе части равенства на $I_0 - I_1$, получим:

$$I_1 I_0 - I_1^2 + I_0 I_2 - I_1 I_2 = I_0^2 - I_0 I_1.$$

Перенесем из левой части равенства третий член в правую часть

$$I_1 I_0 - I_1^2 - I_1 I_2 = I_0^2 - I_0 I_1 - I_0 I_2$$

и вынесем за скобки слева I_1, а справа I_0

$$I_1(I_0 - I_1 - I_2) = I_0(I_0 - I_1 - I_2).$$

Поделив обе части полученного равенства на выражение, заключенное в скобки, будем иметь

$$I_1 = I_0\,!$$

Если исходное равенство умножить не на $I_0 - I_1$, а на $I_0 - I_2$, можно получить аналогичным образом, что

$$I_2 = I_0\,!$$

В чем же дело?

77. КАКОЙ ТОК МОЖЕТ ДАТЬ АККУМУЛЯТОР?

На кислотном аккумуляторе, обладающем внутренним сопротивлением 0,1 *ом*, имеется надпись: «Электродвижущая сила 4 *в*, максимальный разрядный ток 4 *а*».

Между тем, замкнув аккумулятор проводником с сопротивлением хотя бы тоже 0,1 *ом*, получим ток

$$\frac{4\,в}{0{,}1\ ом + 0{,}1\ ом} = 20\ а,$$

то есть больше обозначенного в пять раз.

В чем же причина расхождения?

78. ЧЕМУ РАВНО СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛАМПОЧКИ?

Определяя сопротивление стоваттной электрической лампочки с помощью омметра, ученик получил значение 35 *ом*. Для проверки полученного результата он решил вычислить сопротивление по мощности и указанному на цоколе номинальному напряжению, оказавшемуся равным 220 *в*.

Воспользовавшись формулой $R = \frac{U^2}{N}$, ученик к собственному удивлению, получил величину 484 *ом*, то есть примерно в 14 раз больше, чем в первом случае.

Как объяснить столь значительную разницу результатов?

79. ЧТО ПОКАЖЕТ ВОЛЬТМЕТР?

Разность потенциалов между двумя какими-то точками электрической цепи можно определить с помощью вольтметра, подключенного к этим точкам. С другой стороны, эту величину можно определить, пользуясь законом Ома, для чего следует перемножить сопротивление участка цепи, заключенного между этими точками, и силу тока, протекающего по нему.

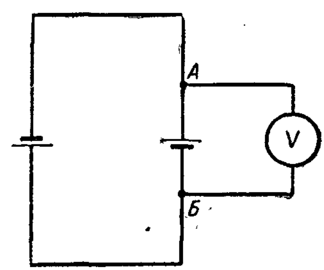

Рис. 18.

Рассмотрим цепь, состоящую из двух совершенно одинаковых гальванических элементов, соединенных так, как показано на рисунке 18. Обозначив элетродвижущую силу элементов через E, а их внутренние сопротивления через R, получим для силы тока в цепи:

$$I = \frac{2E}{2R} = \frac{E}{R}.$$

Казалось бы, что вольтметр, присоединенный к точкам A и $Б$, покажет разность потенциалов

$$\varphi_А - \varphi_Б = I \cdot R = E,$$

поскольку по цепи течет ток силой $\frac{E}{R}$, а сопротивление участка, параллельно которому включили вольтметр, равно R.

На самом же деле вольтметр покажет ноль. Создается парадоксальная и кажущаяся на первый взгляд невероятной ситуация: по участку течет ток, а разность потенциалов на его концах равна нулю.

Почему это возможно?

80. ПОГОВОРКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА.

Среди электромонтеров широко распространено выражение: «Горячая пайка всегда холодная, а холодная пайка всегда горячая».

Как следует понимать эту профессиональную поговорку?

81. КАКИМ ДОЛЖНО БЫТЬ СОПРОТИВЛЕНИЕ?

Рассмотрим изображенную на рисунке 19 схему. Обозначив сопротивление потребителя тока через R, а сопротивление источника тока через r, получим после очевидных преобразований следующее выражение для коэффициента использования электроэнергии:

$$k = \frac{N_{\text{использ}}}{N_{\text{полн}}} = \frac{I^2R}{I^2(R+r)} = \frac{R}{R+r}.$$

Эту формулу можно представить в виде:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}.$$

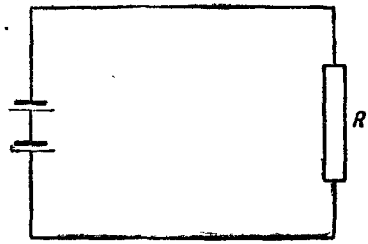

Рис. 19.

Из последнего выражения видно, что, чем больше R превышает r, тем коэффициент использования электроэнергии, иначе говоря коэффициент полезного действия всей установки, выше.

Почему же в таком случае потребитель и источник тока подбираются так, чтобы их сопротивления были по возможности равными, хотя при этом достигается к.п.д. только 50%?

82. КАКОЙ ТОК ПОТРЕБЛЯЕТ ПРИБОР?

В сеть с напряжением 120 *в* через дополнительное сопротивление 40 *ом* включен прибор, потребляющий мощность 50 *вт*. Вычислим по этим данным силу тока, текущего по прибору.

Для решения задачи заметим, что напряжение на приборе в сумме с напряжением на дополнительном сопротивлении должно равняться сетевому, то есть

$$U_{\text{приб}} + U_{\text{сопр}} = U_{\text{сети}}.$$

Выражая первое слагаемое в левой части равенства в виде частного от деления мощности, потребляемой прибором, на силу текущего по нему тока и второе — как произведение величины дополнительного сопротивления на тот же самый ток, получим следующее уравнение, в котором все величины, кроме тока, известны:

$$\frac{N}{I} + I \cdot R = U_{\text{сети}}.$$

Подставляя сюда численные значения известных величин, имеем

$$\frac{50}{I} + 40\,I = 120$$

или

$$40\,I^2 - 120\,I + 50 = 0.$$

Решив это квадратное уравнение, получим для силы тока два значения $I_1=0{,}5$ *а* и $I_2=2{,}5$ *а*.

Какой же ток течет через прибор на самом деле?

83. ЕЩЕ РАЗ О ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.

Пусть емкость каждого из изображенных на рисунке 20 конденсаторов C_1 и C_2 равна 20 *мкф*. Пусть далее переключатель *П* находится вначале в положении *1*. Тогда конденсатор C_2 окажется подключенным к батарее *Б*. Если ее электродвижущая сила равна 100 *в*, то конденсатор C_2 запасет энергию

$$W_1=\frac{C\cdot U^2}{2}=\frac{20\cdot 10^{-6}\,\text{ф}\cdot(100\,\text{в})^2}{2}=0{,}1\ \text{дж}.$$

Если затем переключатель передвинуть в положение *2*, то конденсаторы окажутся соединенными параллельно, образуя батарею емкостью $2\cdot 20$ *мкф*$=40$ *мкф*. Разность потенциалов на зажимах батареи будет составлять 50 *в*, то есть половину того напряжения, которое раньше было на конденсаторе C_2, так как заряд, первоначально находившийся на нем одном, теперь распределен на две равные части.

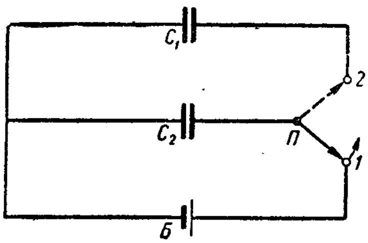

Рис. 20.

Воспользовавшись этими данными, рассчитаем по приведенной выше формуле энергию, запасенную батареей

$$W_2=\frac{40\cdot 10^{-6}\,\text{ф}\cdot(50\,\text{в})^2}{2}=0{,}05\ \text{дж}.$$

Это составляет всего только половину той энергии, которой обладал вначале конденсатор C_2.

Куда же делась вторая половина?

84. ПОЧЕМУ ЭНЕРГИЯ КОНДЕНСАТОРА УВЕЛИЧИВАЕТСЯ?

Плоский конденсатор емкостью $C_1 = 1$ *мкф*, в котором в качестве диэлектрика использована тонкая стеклянная пластина с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{отн} = 5$, заряжен до разности потенциалов $U_1 = 100$ *в*.

Пользуясь формулой, приведенной в условии предыдущей задачи, получаем для энергии, накопленной в конденсаторе, значение:

$$W_1 = \frac{1 \cdot 10^{-6} ф \cdot 10^4 в^2}{2} = 0{,}005 \text{ дж}.$$

После того как экспериментатор удалил стекло, емкость конденсатора уменьшилась в ε раз и стала равной $C_2 = \frac{C_1}{\varepsilon} = 0{,}2$ *мкф*. Поскольку заряд на конденсаторе остался неизменным, разность потенциалов между его обкладками возросла во столько раз, во сколько уменьшилась емкость ($q = C \cdot U$), т. е. до $U_2 = 500$ *в*.

Отсюда для энергии конденсатора после удаления диэлектрика получаем величину

$$W_2 = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-6} ф \cdot 25 \cdot 10^4 в^2}{2} = 0{,}025 \text{ дж}.$$

За счет чего же произошло увеличение энергии? Ведь конденсатор не был подключен к источнику тока.

85. МАГНИТ С ОДНИМ ПОЛЮСОМ.

Обычно считают обязательным наличие у магнита двух полюсов. Однако приведенное ниже рассуждение как будто бы опровергает это мнение.

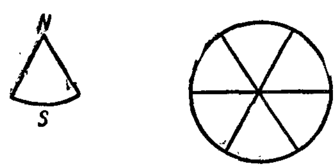

Рис. 21.

Возьмем стальной шар и разрежем его от поверхности к центру на пирамидальные дольки. После этого намагнитим образовавшиеся части так, чтобы вершины их оказались одноименными, а затем вновь составим шар, как показано на рисунке 21.

Тогда, очевидно, на поверхности останется только один полюс. Следовательно, можно получить магнит и с одним полюсом?!

86. ГДЕ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ МАГНИТА?

Поднесем к железному предмету сверху магнит. Если вес куска железа и расстояние до магнита не очень велики, железо притянется к магниту. Обозначим вес предмета через P, а расстояние до магнита, считая по вертикали, через H. Тогда работа магнита против сил тяжести равна $A=P\cdot H$.

В каждом отдельном случае величина произведенной работы может быть и не очень большой, но ведь опыт можно повторить сколь угодно большое число раз, причем никаких видимых изменений с магнитом не происходит и его «магнитная сила» нисколько не ослабевает.

Не противоречит ли это закону сохранения энергии?

87. СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЮБЫХ ПРОВОДНИКОВ РАВНЫ!

Пусть металлическое кольцо (рис. 22) помещено в переменное магнитное поле. Тогда в кольце возникнет индукционный ток, силу которого в некоторый момент мы обозначим через I.

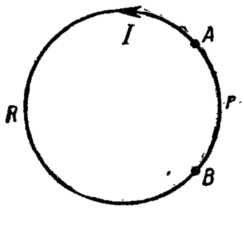

Рис. 22.

Возьмем на кольце совершенно произвольно точки A и B и сопротивление большей части кольца, заключенной между ними, обозначим через R, а сопротивление меньшей — через r.

Тогда разность потенциалов на концах участка ArB на основании закона Ома можно выразить через сопротивление участка и силу тока, по нему протекающего, следующим образом:

$$\varphi_A - \varphi_B = I \cdot r.$$

На том же основании для участка BRA можно записать:

$$\varphi_B - \varphi_A = I \cdot R.$$

Поскольку участки имеют своими концами одни и те же точки, то левые части обоих равенств должны быть равными, так как каждая точка может иметь в данной конкретной ситуации только о д н о значение потенциала. Из этого заключаем, что должны быть равными и правые части написанных выше выражений, то есть

$$I \cdot r = I \cdot R.$$

Сокращая на силу тока I, получаем явную нелепость:

$$r = R.$$

Примечание. Было бы, разумеется, более логичным, приравнивая правые части равенств, брать их с различными знаками. Но окончательный результат от этого стал бы еще только более абсурдным:

$$r = -R.$$

88. МЕНЯЕТСЯ ЛИ КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ НА ТРАНСФОРМАТОР?

При подключении к трансформатору большей нагрузки мощность, потребляемая трансформатором из электросети, возрастает. Увеличивается, следовательно, и сила тока в первичной обмотке. Больший ток должен сильнее намагничивать сердечник трансформатора, и если прежде максимальное значение магнитного потока было равно, допустим, Φ_1, то после увеличения нагрузки оно составит $\Phi_2 > \Phi_1$.

Известно, что электродвижущая сила, индуцируемая во вторичной обмотке, определяется числом витков, а также скоростью изменения магнитного потока со временем:

$$E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

В первом случае за четверть периода магнитный поток менялся от 0 до Φ_1, а во втором — за то же самое время он возрастает от 0 до Φ_2. Поскольку $\Phi_2 > \Phi_1$, скорость изменения магнитного потока во втором случае больше. Поэтому должна возрасти и индуцируемая во вторичной обмотке э. д. с.

На самом же деле коэффициент трансформации практически не зависит от нагрузки. Значит, в наши рассуждения вкралась ошибка. Где же именно?

89. ПРИ КАКОМ НАПРЯЖЕНИИ ЗАГОРАЕТСЯ НЕОНОВАЯ ЛАМПА?

Для определения потенциала зажигания неоновой лампы была собрана установка, схема которой приведена на рисунке 23. Если установку включить в сеть переменного тока и перемещать ползунок потенциометра, постепенно увеличивая подаваемое на лампу напряжение, она загорится в тот момент, когда вольтметр (электромагнитной системы) покажет 50 *в*. Если же опыт повторить на постоянном токе, то лампочка вспыхивает, когда стрелка вольтметра стоит около цифры 70 *в*.

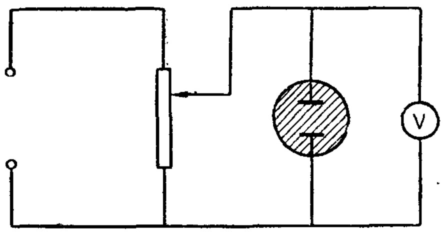

Рис. 23.

Каков же потенциал зажигания неоновой лампы на самом деле?

90. ПОКАЗАНИЯ КАКОГО АМПЕРМЕТРА ПРАВИЛЬНЫ?

При сборке схемы, показанной на рисунке 24, один из амперметров был взят магнитоэлектрической системы, а второй — электродинамической. Оба прибора только что были проверены в контрольной лаборатории, и сомнений в их исправности быть не может.

После включения схемы в сеть переменного тока оказалось, однако, что показания второго амперметра примерно в полтора раза превышают показания первого.

Не могли бы вы указать причину расхождения?

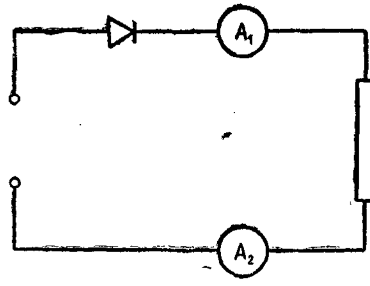

Рис. 24.

91. ПОЧЕМУ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ОСТАЛОСЬ НЕИЗМЕННЫМ?

В одной лаборатории исследовалось поведение полупроводников в переменном магнитном поле. Для создания магнитного поля было решено намотать на картонный каркас катушку и пропускать по ней переменный ток от сети. Тогда внутри катушки появится переменное магнитное поле, в которое можно поместить исследуемый образец.

Поскольку для опыта было желательным поле возможно большей напряженности, лаборант намотал одну на другую *три одинаковые* катушки, рассчитывая получить при их параллельном соединении поле втрое большей напряженности.

Опыт показал, однако, что магнитное поле трех катушек было примерно таким же, как поле одной. Руководитель лаборатории, к которому обратился лаборант, разъяснил причину явления. Вместе с тем он заметил, что включение трех катушек все же имеет смысл.

Почему оставалось неизменным поле и почему три катушки тем не менее предпочтительнее одной?

92. КАК ПРОВЕРЯТЬ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ?

В квартире № 19, где я жил, неожиданно погас свет. С помощью контрольной лампы удалось выяснить, что прекратилась подача электроэнергии к квартирному щитку. В поисках повреждения я вышел на лестничную площадку, не забыв захватить с собой контрольную лампочку, и, открыв групповой щиток, стал проверять с ее помощью установленный там на фазе предохранитель. (В нашем доме осуществлена четырехпроводная система питания, схема которой приведена на рисунке 25.)

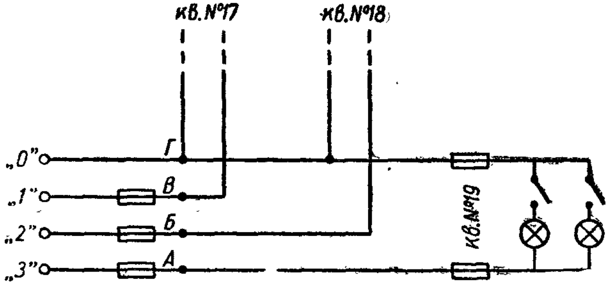

Рис. 25.

«Чтобы удостовериться в исправности предохранителя,— рассуждал я,— достаточно включить контрольную лампу между точками *А* и *Г*». Однако сделать это мне не удалось, так как доступ к нулевому проводу был тщательно замотан изоляционной лентой, снимать которую мне не хотелось.

«Ну что же,— решил я,— в таком случае нужно включить контрольную лампу между точками *А* и *Б* или *А* и *В*. Она будет гореть только в том случае, если целы оба предохранителя — на фазах *3* и *2* или *3* и *1* соответственно».

К моему искреннему удивлению, лампа горела в обоих случаях. Она горела также и тогда, когда я присоединил ее к точкам *Б* и *В*, хотя в такой проверке никакой надобности, конечно, уже не было.

«Все ясно,— подумал я.— Обрыв внутри проводки от группового щитка в нашу квартиру!» Однако на пути в свою комнату я заново проверил свои рассуждения и... Впрочем подумайте и вы вместе со мной.

93. ПОЧЕМУ ЗАГОРАЛИСЬ ЛАМПЫ!

Лабораторные занятия должны были проходить в двух смежных комнатах. Прозвенел звонок, и учащиеся заняли свои места. Один из них быстро собрал схему и, показав ее преподавателю, включил в сеть. Однако схема не работала. Пока ученик проверял правильность соединений, собрали и включили свои установки в электросеть и другие учащиеся, но ни одна из схем не заработала. Удалось быстро выяснить, что прекратилась подача электроэнергии. Потом неожиданно ток появился, но напряжение его было несколько выше номинального. Попытки обнаружить причину неисправности привели к неожиданному открытию: оказалось, что напряжение появляется в том случае, когда в соседней аудитории включается в сеть электрическая плитка; стоило плитку выключить, как ток прекращался. Ученик, работавший с плиткой, заметил, между прочим, что она горела с недокалом.

Не могли бы вы помочь ученикам разобраться в причинах этих явлений?

94. ПОЧЕМУ ПОКАЗАНИЯ ВОЛЬТМЕТРА РАЗЛИЧНЫ!

Вольтметр электромагнитной системы, включенный в сеть переменного тока непосредственно, показал напряжение 125 *в*. Затем тот же вольтметр включили в сеть через выпрямляющий элемент (например, селеновый столбик или германиевый диод) по схеме, показанной на рисунке 26, *б*.

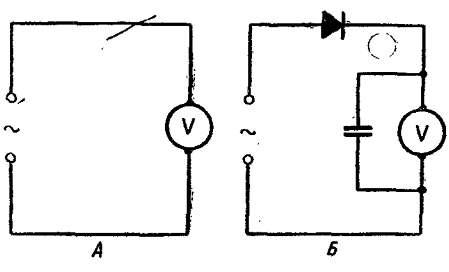

Рис. 26.

Поскольку выпрямитель пропускает ток лишь в одном направлении, то есть 50% всего времени, то показания вольтметра, казалось бы, должны были уменьшиться примерно в два раза. На самом же деле включенный таким образом вольтметр показал около 175 *в*!

Чем это объяснить?

95. ШЕСТЬ ГЕКТОВАТТ «РАВНЫ» ШЕСТИДЕСЯТИ КИЛОВАТТАМ!

Известно, что

$$2\ гвт = 200\ вт$$

и

$$3\ гвт = 300\ вт.$$

Перемножив эти равенства почленно, получаем:

$$6\ гвт = 60\,000\ вт,$$

или

$$6\ гвт = 60\ квт!?$$

96. ПАСПОРТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.

На табличке, прикрепленной к электродвигателю переменного тока, выбиты следующие данные:

$$U = 220\ в, \qquad I = 5\ а, \qquad N = 0{,}9\ квт.$$

Если, как это обычно делается для определения мощности, перемножить два первых числа, получится 1,1 *квт*. Почему же на табличке для мощности двигателя приведено другое значение?

97. ЗАРЯДИТСЯ ЛИ КОНДЕНСАТОР?

Попытки построить вечный двигатель не прекращаются и в настоящее время. Сотрудники Комитета по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР рассказывают, что в Комитет поступает в среднем восемь проектов перпетуум мобиле в месяц. Среди проектов встречаются иногда и очень интересные.

Вот один пример. Известно, что даже в отсутствие электрического поля электроны в каждом проводнике находятся в состоянии непрерывного движения. Вследствие полной хаотичности может оказаться, что в некоторые моменты времени в верхней части проводника, изображенного на рисунке 27, окажется больше электронов, чем в нижней. Речь здесь идет о так называемых флуктуациях электронной плотности. Флуктуация описанного выше характера приведет к возникновению разности потенциалов между концами проводника, с помощью которой можно зарядить конденсатор. Имеющийся в схеме детектор будет препятствовать разрядке конденсатора при изменении знака разности потенциалов на концах проводника. Заряженный конденсатор можно использовать затем в качестве источника даровой энергии. Мощность его будет, разумеется, мала, но важна ведь принципиальная сторона вопроса!

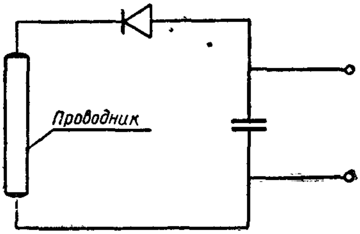

Рис. 27.

98. СТРАННЫЙ СЛУЧАЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА.

В 1827 г. французский ученый Савари (1791—1841 гг.) обнаружил, что после разряда лейденской банки через намотанную на железную спицу проволоку спица часто оказывается намагниченной. Удивительным казалось то, что на одном и том же конце спицы в различных случаях оказывался то северный, то южный полюс, хотя ток при разрядке всегда шел одного направления, так как банка все время заряжалась одинаково.

Явление впервые объяснил немецкий физик Г. Герц (1857—1894 гг.).

Каким образом это удалось ему сделать?

IV ОПТИКА И СТРОЕНИЕ АТОМА

99. ПРОСТОЙ СПОСОБ ПУТЕШЕСТВОВАТЬ В ПРОШЛОЕ.

В одном из своих научно-фантастических рассказов французский астроном и популяризатор Камиль Фламмарион (1842—1925 гг.) предложил следующий способ заглянуть в прошлое.

Лучи света доносят до нас зрительные образы внешнего мира хотя и очень быстро, но все же не мгновенно, как долгое время об этом думали. Предположим, что наблюдатель удаляется от Земли. Пока его скорость невелика, световые волны будут догонять экспериментатора, и он увидит картины тех событий, которые произошли на Земле уже после его отъезда. Однако при достаточно большой скорости путешественник начнет перегонять световые волны. В его глаз заново попадут ранее прошедшие мимо и обогнавшие его волны. События развернутся перед ним в обратной последовательности — он увидит сцены своего отлета с Земли, будет «присутствовать» при собственном рождении, сможет наблюдать события далекого прошлого, «познакомиться» со многими давно умершими великими людьми.

Нетрудно представить, какую неоценимую помощь может оказать такое путешествие исследователям прошлого нашей планеты — историкам, археологам, палеонтологам и другим специалистам, изучающим сейчас прошлое лишь по книгам и немногим дошедшим до нашего времени памятникам былых времен.

Важно иметь для осуществления этого проекта, конечно, достаточно сильный телескоп и мощные двигатели, способные сообщить ракете необходимые чудовищные скорости.

Не кажется ли вам, что в наш век овладения атомной энергией и покорения космоса настало время всерьез подумать о снаряжении экспедиции в прошлое? Остается лишь пожалеть, что предложенная «машина времени» не сможет, в отличие от уэллсовской, показать нам будущее!

100. ОДЕЖДА МЕТАЛЛУРГОВ.

В трудных условиях приходится работать сталеварам, имеющим дело с расплавленным металлом,— его горячее дыхание буквально обжигает человека. Казалось бы, что для облегчения условий труда костюмы доменщиков, мартенщиков и других металлургов должны изготовляться из материалов с низкой теплопроводностью. Между тем на самом деле спецодежда металлургов часто покрывается тонким слоем металла — великолепного проводника тепла.

С какой целью так поступают?

101. ГДЕ ПОМЕСТИТЬ ЗЕРКАЛО?

Чем ближе мы стоим к окну, тем больший участок улицы доступен нашему наблюдению. Было бы естественно предположить, кажется, что при пользовании зеркалом дело будет обстоять аналогичным образом. На самом же деле не так.

Если в висящем вертикально на стене зеркале мы видим свою фигуру только до колен, то все попытки увидеть больше, подойдя ближе к зеркалу или, наоборот, отойдя подальше, останутся безуспешными.

Чем отличаются оба случая?

102. ПОЧЕМУ БЫВАЕТ РАДУГА?

При объяснении причин возникновения радуги принимается, что попавший в дождевую каплю луч испытывает на ее задней стенке полное отражение, а затем выходит через переднюю. Каждый переход из одной среды в другую сопровождается дисперсией, в результате чего и возникает радуга.

Однако легко показать, что если луч испытывает полное отражение однажды, то он вообще никогда не сможет выйти из капли в воздух.

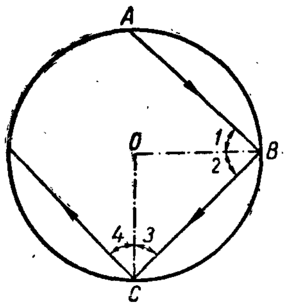

Рис. 28.

В самом деле, пусть попавший в каплю луч распространяется по такому направлению *AB*, что угол падения *1* на заднюю стенку капли, образованный лучом *AB* и радиусом *OB*, превышает предельный (см. рис. 28). Тогда при точке *B* произойдет полное отражение, после чего луч пойдет по направлению *BC*. Поскольку треугольник *COB* равнобедренный (стороны *CO* и *BO* в нем равны как радиусы), то угол *3* равен углу *2*, который в свою очередь равен углу *1* на основании первого закона отражения. Таким образом, если угол *1* превышает предельный, то то же самое следует сказать относительно угла *3*. Другими словами, в точке *C* также должно наблюдаться полное отражение! Эти рассуждения можно, разумеется, продолжить и далее.

Как же в таком случае объяснить возникновение радуги?

103. МОЖНО ЛИ ПОЛУЧИТЬ УВЕЛИЧЕНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ?

Перпендикулярно параллельному пучку лучей поставлены собирающая линза и экран. Передвигая линзу, можно получить на экране круглое пятно различного диаметра. Естественно, что с изменением площади пятна освещенность в его пределах меняется.

Обозначив освещенность, создаваемую пучком на поверхности линзы через $E_л$, а диаметр линзы — через *AB* (рис. 29), получим для проходящего через линзу светового потока значение

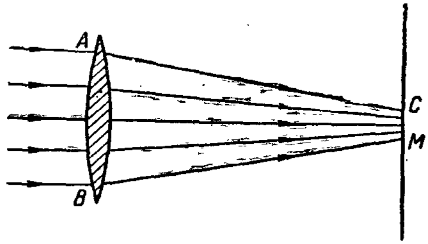

Рис. 29.

$$\Phi = E_л \cdot \frac{\pi \cdot AB^2}{4}.$$

Поскольку на экране этот поток распределяется по площади круга диаметром CM, то освещенность внутри пятна составит

$$E_п = \Phi : \frac{\pi \cdot CM^2}{4} = E_л \cdot \frac{AB^2}{CM^2}.$$

Из этого выражения видно, что при диаметре пятна, меньшем диаметра линзы, освещенность на экране будет больше освещенности, создаваемой пучком лучей непосредственно.

А можно ли получить увеличение освещенности с помощью рассеивающей линзы?

104. КОГДА НУЖНА БО́ЛЬШАЯ ВЫДЕРЖКА!

Вначале человек был сфотографирован во весь рост, а затем более крупным планом — только одно лицо. Хотя освещенность павильона осталась неизменной, фотограф счел необходимым несколько увеличить выдержку.

Зачем он это сделал?

105. ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ ГЛАЗ.

Через прозрачную воду вы прекрасно видите дно. Но стоит нырнуть с открытыми глазами, как контуры всех предметов на дне становятся расплывчатыми, нерезкими — глаза человека обладают слишком малой преломляющей способностью, чтобы хорошо видеть в воде.

Наоборот, рыбы имеют почти сферический хрусталик, благодаря которому они хорошо видят под водой, но становятся слишком близорукими на воздухе.

А можно ли придумать такой глаз, который бы видел достаточно далеко расположенные предметы одинаково хорошо как на воздухе, так и под водой?

На первый взгляд задача кажется невыполнимой, однако при некоторых условиях глаз, обладающий таким свойством, возможен. Не можете ли вы указать при каких?

106. ПОЧЕМУ КОЛЕСА ВРАЩАЮТСЯ «НЕ В ТУ СТОРОНУ»?

На экранах кинотеатров часто можно наблюдать забавную картину: колеса движущегося экипажа вращаются в сторону, соответствующую перемещению в противоположном фактическому направлении.

Как объяснить этот парадокс кино?

107. КАК РАБОТАЕТ ТЕЛЕСКОП-РЕФРАКТОР?

При постройке телескопа-рефрактора в качестве объектива применяется длиннофокусная линза, а окуляром служит короткофокусная. Поскольку наблюдаемые в телескоп светила удалены от Земли на чрезвычайно большие расстояния, их изображения получаются фактически в фокальной плоскости объектива.

Изображение светила, даваемое объективом, служит объектом для окуляра. При этом окуляр располагается так, чтобы его передний фокус совпадал с задним фокусом объектива.

Поскольку объект расположен в фокальной плоскости окуляра, то его изображения получаться не должно, так как лучи выйдут из окуляра параллельным пучком (точнее, лучи образуют изображение на бесконечности).

Как же в таком случае астрономы ведут наблюдения?

108. НУЖНЫ ЛИ АСТРОНОМАМ ТЕЛЕСКОПЫ?

Под увеличением телескопа понимается отношение, показывающее, во сколько раз угол, под которым видно светило в телескоп, больше угла, под которым оно наблюдается невооруженным глазом.

Ввиду чрезвычайно большой удаленности звезд (напомним, что даже от ближайшей звезды свет, имеющий скорость 300 000 *км/сек*, идет около четырех лет!) угол, под которым видны звезды невооруженным глазом, практически равен нулю. Поэтому даже в самые сильные телескопы звезды представляются наблюдателю светящимися точками, не имеющими площади.

Следует ли из этого, что телескопы имеет смысл применять только для наблюдения сравнительно близко расположенных объектов, например планет, а звезды с равным успехом можно наблюдать и невооруженным глазом?

109. ВОЗМОЖНА ЛИ ПОСТРОЙКА ГИПЕРБОЛОИДА?

Петр Гарин, герой романа Алексея Толстого «Гиперболоид инженера Гарина», так рассказывал Зое Монроз о сущности своего изобретения:

«Это просто, как дважды два. Весь секрет в гиперболическом зеркале *А*, напоминающем формой зеркало обыкновенного прожектора, и в кусочке шамонита *В*, сделанном также в виде гиперболической сферы. Закон гиперболических зеркал таков:

Лучи света, падая на внутреннюю поверхность гиперболического зеркала, сходятся все в одной точке, в фокусе гиперболы. Это известно. Теперь вот что неизвестно: я помещаю в фокусе гиперболического зеркала вторую гиперболу (очерченную, так сказать, навыворот — гиперболоид вращения, выточенную из тугоплавкого, идеально полирующегося минерала — шамонита, залежи его на севере России неисчерпаемы). Что же получается с лучами?

Лучи, собираясь в фокусе зеркала *А*, падают на поверхность гиперболоида *В* и отражаются от него математически параллельно, иными словами, гиперболоид *В* концентрирует все лучи в один луч, или «лучевой шнур»

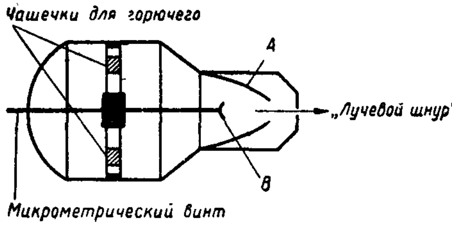

Рис. 30.

любой толщины. Переставляя микрометрическим винтом гиперболоид B, я по желанию увеличиваю или уменьшаю толщину «лучевого шнура». При этом я могу довести «шнур» (практически) до толщины иглы. В природе не существует ничего, что могло бы сопротивляться силе «лучевого шнура». Здания, дредноуты, воздушные корабли, скалы, горы, кора земли — все пронижет, разрушит, разрежет мой луч».

Схема гиперболоида Гарина, взятая из романа, приведена на рисунке 30. Можно ли ей воспользоваться для постройки такого аппарата? Точнее говоря, будет ли он таким всемогущим, как утверждал герой романа?

110. ИЗМЕНИТСЯ ЛИ ЦВЕТ!

Длина волны λ связана со скоростью распространения света c в данной среде и показателем преломления n следующим образом:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1}{c_2} = n_{1,2}.$$

Из написанного равенства нетрудно заметить, что при переходе из одной среды в другую длина световых волн меняется. Так, например, если в воздухе длина волны равнялась 0,65 *мк*, то в воде, показатель преломления которой относительно воздуха равен 1,33, длина волны будет иметь значение

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n_{1,2}} = \frac{0{,}65\ мк}{1{,}33} = 0{,}49\ мк.$$

Длина волны 0,65 *мк* соответствует красному свету, а 0,49 *мк* — голубому.

Не означает ли это, что ныряльщику, находящемуся под водой, лучи красного фонаря будут казаться голубыми?

111. КАКОВ ИСТИННЫЙ ЦВЕТ?

Цвет тела, покрытого слоем цинковых белил, воспринимается как белый. Если в качестве краски использовать берлинскую лазурь, цвет предмета станет голубым. В обоих случаях тело кажется какого-то одного определенного цвета.

Однако иногда цвет тела охарактеризовать не так уж легко, и это можно показать на простом примере.

Наблюдения за курильщиками показывают, что дым представляется нам либо голубоватым, либо приобретает красновато-желтый оттенок, в зависимости от расположения наблюдателя по отношению к курильщику, облаку дыма и источнику света.

Почему же цвет дыма зависит от «точки зрения» наблюдателя?

112. ФРАНЦУЗСКИЙ ФЛАГ.

Французский национальный флаг состоит из трех продольных полотнищ — синего, белого и красного цвета.

Чем объяснить, что до недавнего времени законом предписывалось полотнища делать такими, чтобы их ширина находилась в отношении 30 : 33 : 37?

113. СЛУЧАЙ С ВУДОМ.

Замечательный американский физик-оптик Р. Вуд (1868—1955 гг.) был большим шутником и любителем быстрой езды.

Однажды он ехал в своем автомобиле по городу и, не сумев затормозить, выехал на перекресток в тот момент, когда на светофоре загорелся красный свет. Нарушителя движения остановил полицейский, и между ними состоялся следующий разговор:

«— Я не виноват,— защищался Вуд.— Меня подвел эффект Допплера.

— Что, что? — переспросил удивленный полицейский.

— Эффект Допплера,— ответил Вуд и пояснил.— Вы, вероятно, обращали внимание, как повышается тон гудка движущегося навстречу вам паровоза или автомобиля. Это происходит потому, что в ухо попадает за единицу времени больше звуковых волн. Аналогичное явление наблюдается и для света. Если источник света приближается к вам или вы приближаетесь к нему, то свет вам покажется другого оттенка, его цвет смещается к синему концу спектра. Я ехал довольно быстро и красный огонь светофора показался мне зеленым!»

Неизвестно, чем кончился разговор Вуда с полицейским (утверждают, что полицейский все же оштрафовал Вуда за быструю езду), нас интересует другое — имел ли Вуд право ссылаться на эффект Допплера?

114. ПОЧЕМУ ПО-РАЗНОМУ СВЕТЯТСЯ ОДИНАКОВО НАГРЕТЫЕ ТЕЛА?

Чем объясняется следующий парадокс: железо, нагретое до 800°С, светится очень ярко, тогда как свечение кусочка кварца (с несколько меньшим успехом опыт можно проделать и со стеклом), имеющего ту же температуру, еле заметно?

115. КОГДА НА ЗЕМЛЕ НЕ ОСТАНЕТСЯ РАДИЯ?

Период полураспада радия составляет 1590 лет. Это означает, что через такой промежуток времени от имеющегося в наличие в настоящий момент некоторого количества радия останется половина. Можно ли заключить, что через 3180 лет на Земле вообще не останется радия?

116. СКОЛЬКО РАДИЯ БЫЛО НА ЗЕМЛЕ В «ДЕНЬ ЕЕ РОЖДЕНИЯ»?

Допустим, что в настоящее время на Земле имеется всего 1 *кг* радия — цифра, конечно, более чем скромная, так как в лабораториях и больницах мира хранится гораздо больше. Однако будем оперировать этим числом для определенности и простоты дальнейших расчетов.

Как мы уже знаем из условия предыдущей задачи, период полураспада радия 1590 лет. Значит, столько лет тому назад на Земле было ровно в два раза больше радия, чем сейчас, то есть два килограмма. 3180 лет назад имелось 4 килограмма и так далее. Можно записать следующую таблицу, при составлении которой возраст Земли принят равным 10^{10} лет, что согласуется с последними данными геологии и астрономии:

Число лет тому назад	Число периодов полураспада тому назад	Масса радия, *кг*
0	0	$1=2^0$
1590	1	$2=2^1$
3180	2	$4=2^2$
4770	3	$8=2^3$
6360	4	$16=2^4$
....	....	....
10^{10}	$10^{10}:1590$	$2^{10^{10}:1590}$

Исходя из приведенных в таблице данных, рассчитаем количество радия на Земле 10 миллиардов лет назад:

$$M=2^{10^{10}:1590}\ кг = 2^{6,28\cdot 10^6}\ кг.$$

Логарифмируя обе части равенства, получим:

$$\lg M = 6,28\cdot 10^6\cdot \lg 2 = 1\,890\,000.$$

Отсюда для массы радия, бывшей на Земле в момент ее возникновения, получаем:

$$M = 10^{1\,890\,000}\ кг!$$

Как это согласовать с тем фактом, что масса всей Земли в настоящий момент составляет «всего лишь» примерно $6\cdot 10^{24}$ *кг*?!

117. КАК ВОЗНИКАЮТ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ?

В начале текущего столетия было обнаружено, что из окружающего нас межзвездного пространства на земную поверхность непрерывно обрушивается поток космических лучей — быстрых протонов и α-частиц. Их энергия достигает колоссальных (конечно, с точки зрения микромира) значений, 10^{19} *эв*, тогда как в наиболее совершенных современных ускорителях заряженные частицы разгоняются до энергий порядка 10^{10} *эв*. Для ответа на вопросы, откуда приходят к нам космические лучи и каким образом частицы в них ускоряются до столь высоких энергий, знаменитый итальянский физик Энрико Ферми (1901—1951 гг.) выдвинул следующую гипотезу, считающуюся в настоящее время наиболее вероятной.

Астрофизические наблюдения свидетельствуют о наличии во Вселенной движущихся облаков межзвездного газа и связанных с ними магнитных полей, рожденных движением зарядов в облаках. По гипотезе Ферми встреча космических частиц с блуждающими магнитными полями и приводит к ускорению частиц.

Однако мы знаем, что сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд (так называемая сила Лоренца), направлена перпендикулярно вектору скорости частицы и может изменить, следовательно, лишь направление вектора скорости, но никак не численное его значение.

Как же в таком случае гипотеза Ферми объясняет процесс ускорения?

118. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАССЫ.

Открытый в 1932 г. нейтрон неустойчив и со временем распадается на протон и электрон. Уравнение распада можно записать в следующем виде:

$$ {}_0n^1 = {}_1p^1 + {}_{-1}e^0, $$

где n, p и e — символические обозначения нейтрона, протона и электрона соответственно. Индексами сверху обозначена масса частиц, а индексами снизу — их заряд (и то, и другое в атомных единицах).

Обнаружены также процессы, при которых протон превращается в нейтрон и позитрон. Уравнение соответствующей «ядерной реакции» имеет вид:

$$ {}_1p^1 = {}_0n^1 + {}_{+1}e^0. $$

Таким образом, в результате этих двух реакций нейтрон «возродился» и, кроме того, возникли две новые частицы — электрон и позитрон.

Как это можно согласовать с законом сохранения массы?

119. АДДИТИВНА ЛИ МАССА?

Для определения массы некоторой системы тел достаточно сложить массы компонентов, образующих систему:

$$M_{\text{сист}} = M_1 + M_2 + M_3 + \ldots + M_n.$$

Величины, значение которых для всей системы равно сумме значений для отдельных ее элементов, в физике называются аддитивными (от латинского *additio* — сложение), и масса — типичный пример аддитивной величины.

Не все величины, с которыми приходится сталкиваться в жизни, аддитивны. Температуру тела, например, нельзя получить, измерив и сложив ее значения у отдельных частей тела. Полученная таким образом величина была бы лишена какого-либо физического смысла.

Но действительно ли аддитивна масса? Рассмотрим следующий пример.

Массу ядра атома изотопа кислорода O^{16} можно определить, разделив массу килограмм-атома на число Авогадро (число атомов в килограмм-атоме). Получим:

$$M_{\text{ядра}} = \frac{A}{R} = \frac{16\ \text{кг}}{6{,}023 \cdot 10^{26}} = 26{,}576 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}.$$

Попробуем получить то же самое число, исходя из соображений об аддитивности массы.

Как известно из протонно-нейтронной теории строения атомного ядра, высказанной впервые советским ученым Д. Д. Иваненко и немецким физиком В. Гейзенбергом, ядро атома изотопа O^{16} состоит из восьми протонов, обладающих массой $1{,}6755 \cdot 10^{-27}$ *кг* каждый, и восьми нейтронов массой по $1{,}6768 \cdot 10^{-27}$ *кг*. Выполнив умножение и сложение, получим:

$$M'_{\text{ядра}} = 8 \cdot 1{,}6755 \cdot 10^{-27}\ \text{кг} + 8 \cdot 1{,}6768 \cdot 10^{-27}\ \text{кг} = 26{,}8184 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}.$$

Таким образом, два способа определения массы одного и того же ядра привели к разным результатам.

Чем же объясняется различие — неаддитивностью массы или иными причинами?

Примечание. Вычисления можно было бы проделать не в *кг* — единицах массы в системе СИ, а в атомных единицах массы (см. текст предыдущей задачи). В этих единицах масса ядра изотопа O^{16} равна 16*, масса протона 1,00813 и масса нейтрона 1,00893. Получаем:

$$8 \cdot 1{,}00813 + 8 \cdot 1{,}00893 = 16{,}13648 \neq 16.$$

120. ЗАГАДКА АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ.

После того как дрова в печи прогорят, остается зола, которую в качестве источника энергии использовать уже нельзя.

А вот с атомным горючим дело обстоит иначе. В некоторых атомных реакторах после их работы обнаруживают больше атомного горючего, чем было заложено вначале. Именно это обстоятельство является дополнительным доводом в пользу быстрейшего запрещения атомной энергии в военных целях, который выдвигают советские представители на переговорах о запрещении ядерного оружия,— это надо сделать как можно быстрее, пока в мире еще сравнительно мало делящихся материалов, пригодных для изготовления атомных и водородных бомб.

Почему возможно размножение атомного горючего?

* По определению.

РЕШЕНИЯ

I МЕХАНИКА

1

Воспользовавшись приведенными в тексте задачи обозначениями, вычислим время, затрачиваемое теплоходом на путешествие из одного пункта в другой. При движении вниз по реке скорость теплохода увеличивается на c — скорость движения воды в реке, при движении в противоположном направлении она на столько же уменьшается. Поэтому

$$t_1 = \frac{l}{v+c} + \frac{l}{v-c} = \frac{2\,lv}{v^2 - c^2}.$$

В то же время рейс из одного пункта в другой и обратно в стоячей воде, на море например, имел бы длительность

$$t_2 = \frac{2\,l}{v}.$$

Поделив почленно первое выражение на второе, получим:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{v^2}{v^2 - c^2}.$$

Поскольку знаменатель полученной дроби меньше числителя, путешествие в стоячей воде при прочих равных условиях всегда короче. Разница тем больше, чем выше скорость течения реки.

Если скорость течения реки равна собственной скорости теплохода, то отношение времен, как это видно из последнего равенства, равно бесконечности. Физически это означает, что, спустившись вниз по течению, корабль никак не сможет подняться вверх по реке. Когда скорость течения еще больше, корабль и при движении вверх будет снесен водой в обратном направлении.

Таким образом, после постройки гидроэлектростанций и появления на Волге участков с практически неподвижной водой длительность путешествий по ней несколько сократилась.

2

Поезда метро, как известно, следуют строго по расписанию и приходят на станцию через определенное время один за другим. Воспользуемся этим для графического решения задачи.

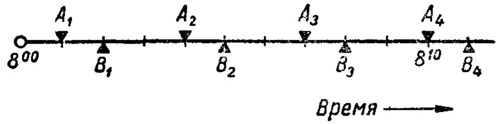

Рис. 31.

На рисунке 31 изображена ось времени, началом которой выбрано 8 часов утра. На оси треугольниками снизу обозначены моменты прихода поездов нужного пассажиру направления, а треугольниками сверху — время прихода поездов встречного направления. Частота следования выбрана равной одному поезду за три минуты для обоих направлений.

Так как время прихода пассажира, по условию задачи, совершенно случайно, то это событие может произойти как в интервале A_1B_1, так и в интервале B_1A_2 (или соответственно в интервалы A_2B_2 и B_2A_3; A_3B_3 и B_3A_4 и так далее). Если пассажир приходит в интервал типа AB, то первым на станцию после его прихода прибудет поезд нужного направления, а для интервала BA сначала подойдет встречный поезд. Поскольку длительность интервалов второго типа в два раза больше, то вдвое большей оказывается вероятность, что пассажир придет на станцию во время него и первым встретит встречный поезд. На другой станции и в другое время суток соотношения могут оказаться иными.

Эта задача хорошо иллюстрирует плодотворность графического метода в решении задач.

3

Этой задаче обычно даются самые противоречивые решения. По мнению одних, сани будут оставаться на месте, другие полагают, что они должны все-таки двигаться вперед.

Между тем правильный ответ таков — при данной формулировке задача вообще не имеет решения.

Действительно, рассмотрим два крайних случая. Пусть трение между лентой конвейера и лыжами саней отсутствует совсем. Тогда движение ленты совершенно не скажется на величине скорости аэросаней, приводимых в движение пропеллером. Сани будут как бы лететь над дорогой, и ее движение никак не повлияет на состояние движения саней, как оно не может повлиять на скорость парящего над дорогой самолета.

Во втором предельном случае очень сильного сцепления дороги с лыжами аэросаней последние можно считать жестко связанными с конвейером. Тогда, безусловно, сани будут двигаться в том же направлении и с той же скоростью, что и конвейерная лента.

В промежуточных случаях возможны различные значения скорости саней. Может оказаться, в частности, что положение аэросаней относительно окружающих предметов останется со временем неизменным, то есть они будут стоять на месте. Это будет в том случае, когда сила тяги воздушного винта будет равна силе трения (сопротивление воздуха не учитывается). Однако такое состояние будет неустойчивым, поскольку даже небольшой толчок в сторону движения или навстречу ему, вызванный, например, неровностями на конвейерной ленте, приведет сани в движение относительно земной поверхности в направлении воздействия.

4

Поскольку лодка движется не в направлении действия веревки, значит, она участвует в сложном движении. Результирующей скоростью этого движения является скорость лодки, а скорость вытягивания веревки — это лишь одна из составляющих. Каково же направление второй составляющей?

Направление второй составляющей скорости надо выбирать так, чтобы движение вдоль него оставляло

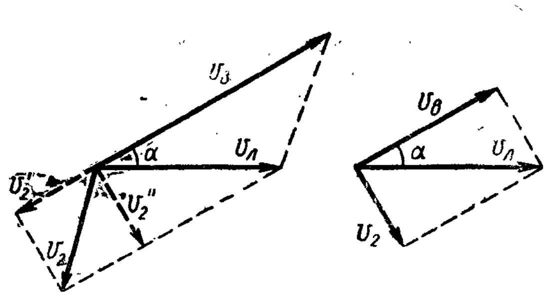

Рис. 32.

абсолютное значение вектора скорости веревки $v_в$ постоянным, изменяя лишь его направление. Нетрудно видеть, что это будет только в том случае, если направление второй составляющей будет образовывать с веревкой прямой угол. В противном случае всегда возможно вторую составляющую v_2 разложить, как это показано в левой части рисунка 32, еще раз так, что одна из вновь появившихся составляющих v_2' будет изменять величину $v_в$.

Из сказанного следует, что параллелограмм скоростей в данном конкретном случае должен являться прямоугольником, в котором результирующая направлена горизонтально, а одна из составляющих совпадает по направлению с веревкой. Сделав соответствующий чертеж (правая часть рис. 32), находим

$$v_л = \frac{v_в}{\cos\alpha},$$

что и является правильным решением задачи.

Таким образом, хотя всякий вектор можно разложить по любым направлениям, не всякое разложение будет иметь смысл. Разложение, показанное на рисунке 1, лишено физического смысла, поскольку результирующим является движение не вдоль веревки, а по горизонтальному направлению, и разложению надо подвергать именно его.

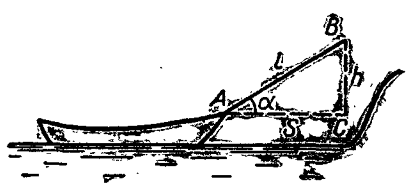

Рис. 33.

Особенно просто задача решается методами дифференциального исчисления.

Из треугольника ABC (рис. 33) имеем:

$$AB^2 = BC^2 + AC^2.$$

Продифференцируем это выражение по времени, полагая для краткости записи $AB=l$, $BC=h$ и $AC=s$. Поскольку h постоянно, имеем:

$$2l\frac{dl}{dt} = 2s\frac{ds}{dt}.$$

Учитывая, что

$$\frac{s}{l} = \cos\alpha,$$

получим:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{ds}{dt}\cdot\cos\alpha.$$

Но $\frac{dl}{dt}$ является скоростью вытягивания веревки $v_в$, тогда как $\frac{ds}{dt}$ представляет собой скорость лодки $v_л$. Поэтому

$$v_в = v_л \cdot \cos\alpha,$$

или

$$v_л = \frac{v_в}{\cos\alpha}.$$

5

Напрашивающийся и обычно даваемый ответ, 50 *км/ч*, не является правильным. В самом деле, обозначим расстояние между пунктами A и B через s. Тогда время, затрачиваемое на переезд из A в B, будет равно

$$t_1 = \frac{s}{v_1}.$$

Обратный переезд потребует времени

$$t_2 = \frac{s}{v_2}.$$

А на весь путь туда и обратно будет затрачено

$$t = t_1 + t_2 = \frac{s}{v_1} + \frac{s}{v_2} = \frac{s(v_1 + v_2)}{v_1 \cdot v_2}.$$

После этого средняя скорость

$$v_{\text{ср}} = \frac{2s}{t} = \frac{2s}{\frac{s(v_1+v_2)}{v_1 \cdot v_2}} = \frac{2\,v_1 \cdot v_2}{v_1+v_2}.$$

Подставляя сюда значения скоростей v_1 и v_2, получим для средней скорости значение 48 *км/ч*.

Формулу для вычисления средней скорости можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{v_{\text{ср}}} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}\right).$$

Величина $v_{\text{ср}}$, определяемая таким образом, носит название среднего гармонического величин v_1 и v_2.

Средняя скорость равна среднему арифметическому начальной и конечной скоростей только для равнопеременного движения (движения с постоянным ускорением); для данного же случая средняя скорость выражается как среднее гармоническое скоростей v_1 и v_2.

6

Проверим полученные решения, вычислив время, необходимое для подъема на высоту 6 *м* при начальной скорости 21,5 *м/сек* и 13 *м/сек* соответственно.

Из выражения

$$t = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 + 2as}}{a}$$

имеем два значения времени для начальной скорости 21,5 *м/сек:*

$$t_1 = 0{,}3\ \textit{сек} \ \text{и}\ t_2 = 4\ \textit{сек},$$

и два значения для скорости 13 *м/сек:*

$$t_1 = 0{,}6\ \textit{сек} \ \text{и}\ t_2 = 2\ \textit{сек}.$$

Таким образом, для любой начальной скорости, удовлетворяющей, разумеется, условию

$$v_0 > \sqrt{2 \cdot 10\,\frac{\textit{м}}{\textit{сек}^2} \cdot 6\ \textit{м}} \approx 11\,\frac{\textit{м}}{\textit{сек}},$$

камень побывает на высоте 6 *м* дважды: при подъеме вверх и на обратном пути. Чем больше начальная скорость, тем дольше будет подниматься камень до наивысшей точки своей траектории, тем позже, опускаясь оттуда, он вторично окажется на заданной высоте.

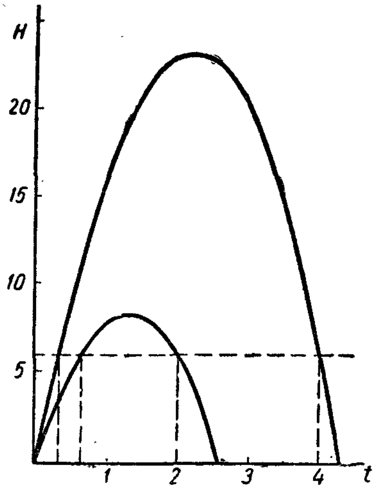

Рис. 34.

Приведенные в текстах задач значения времени специально подобраны так, чтобы соответствовать спуску.

Все сказанное хорошо иллюстрируется рисунком 34, где представлены графики движения тела для обоих случаев. Верхняя парабола выражает зависимость высоты от времени для начальной скорости 21,5 *м/сек*, а нижняя — для скорости 13 *м/сек*. (На рисунке 34 H дано в метрах, а t — в секундах.)

7

Во время торможения вагона тело пассажира, сохраняя прежнюю скорость, наклоняется вперед. Стремясь воспрепятствовать падению, человек инстинктивно напрягает мускулы ног. При остановке пассажир не успевает сразу же расслабить мышцы, и они толкают его назад. Такую же роль, как и мышцы человека, играют рессоры экипажа.

При экстренном торможении мускулы человека не успевают приспособиться к обстановке, и он наклоняется вперед в полном соответствии с законом инерции.

8

Когда-то, между прочим, так и считали, что паровоз не может приводить в движение состав, вес которого превышает вес паровоза. Поэтому авторы первых проектов снабжали паровозы чем-то вроде ног для отталкивания от земли (паровоз Брунтона, 1813 г.) или предлагали ведущие колеса и рельсы делать зубчатыми (паровоз Блекинсона, 1811 г.).

Ошибка этих изобретателей, как и приведенного в тексте софизма, состоит в том, что коэффициенты трения колес вагонов о рельсы и ведущих колес паровоза о рельсы принимались равными совершенно необоснованно.

Все дело состоит в том, что точки колес локомотива и вагонов, соприкасающиеся с рельсами, в момент соприкосновения неподвижны. Значит, в обоих случаях мы имеем дело не с динамическим, а со статическим трением, коэффициент трения которого не является какой-то строго определенной величиной, а меняется от нуля до некоторого максимального значения, когда происходит срыв и начинается движение. Поскольку вращение колес происходит без «юза» (то есть колеса не заблокированы и вращаются свободно), то и для колес тепловоза, и колес вагонов коэффициент трения меньше максимального, но неодинаков: у ведущих колес локомотива он велик и меньше у колес вагонов. Произведение веса (точнее, сцепного веса) локомотива на большой коэффициент трения при равномерном движении равно произведению веса состава на малый коэффициент трения. Коэффициенты трения k_1 и k_2 могут различаться во много раз, и приравнивать их, как это сделано в условии софизма, конечно, нельзя. Впервые это экспериментально показал инженер Хедлей, построивший в 1813 г. свой паровоз «Пыхтящий Билли». Однако полностью проблема паровозостроения была разрешена несколько позже Стефенсоном.

9

Сила трения от этого, конечно, не уменьшается. Однако для вращательного движения важна не столько сама сила, сколько ее момент. Нетрудно видеть, что с уменьшением радиуса трущейся части уменьшается момент тормозящей силы трения, а вместе с тем и потери на работу против сил трения.

10

В верхней и нижней мертвых точках поршень работающего двигателя на очень короткое время останавливается, меняя направление движения. В эти моменты времени масло выдавливается из промежутка между поршнем и стенками цилиндра, и некоторое время после этого движение происходит почти «в сухую», пока поршень не попадет на смазанную поверхность. Естественно, что износ сухих поверхностей значительно больше, чем смазанных.

11

Часть задачи, относящаяся к бруску, не содержит ошибок. Была бы справедливой и вторая часть задачи, если бы мы могли изготовить абсолютно твердый шар и обладающую таким же свойством поверхность. Однако все реальные тела под действием нагрузок (в том числе и веса шара) в той или иной степени деформируются, а это приводит к тому, что шар и плоскость будут соприкасаться не в точке, но по некоторой площадке, в пределах которой реакция опоры может несколько смещаться и компенсировать момент пары приложенной силы и силы трения. Однако деформации обычно не очень велики, и реакция опоры не может иметь значительного момента. В результате шар приводится в движение значительно легче, чем брусок.

12

Если бы не существовало силы трения, то любая, сколь угодно малая, сила привела бы тело в движение. Действие еще одной такой же силы свелось бы к увеличению ускорения в два раза и так далее.

Поскольку в реальном случае сила трения всегда существует, действие приложенных сил будет равно нулю, пока они не превысят максимального значения силы трения покоя, то есть одна сила, оказавшаяся меньше силы трения покоя, может иметь действие, равное нулю, но несколько таких сил, превысив в общей сложности силу трения, приведут тело в движение.

Здесь слова «действие равно нулю» приводятся в том смысле, что тело будет оставаться в покое. Вообще же действие любой, даже малой силы никогда не бывает равно нулю. Если нет перемещения под действием силы, есть деформация, обусловленная появлением статического трения.

Узнать, какое рассуждение ошибочно и какое справедливо, можно экспериментально. Для этого достаточно поставить модель стола на два демонстрационных динамометра (удобно пользоваться динамометрами «часового» типа) так, чтобы ножки стола оказались на различной высоте. Показания динамометров окажутся разными — больше там, где ножки расположены ниже. Если модель установлена так, что перпендикуляр, опущенный из центра тяжести на горизонтальную плоскость, проходит через ножки B (см. рис. 5), то показания левого динамометра вообще будут равны нулю.

К выводу, что давления должны быть различными, приводит и следующее несложное рассуждение.

Стол будет находиться в покое на наклонной плоскости только в том случае, если равны нулю алгебраические суммы действующих сил (условие отсутствия поступательного перемещения) и их моментов (условие отсутствия вращательного движения). Поскольку вращения, например, относительно оси, проходящей через центр тяжести стола, нет, алгебраическая сумма моментов веса P, сил трения F_1 и F_2, действующих на ножки стола, и сил реакций опоры R_1 и R_2 равна нулю (обозначения всех сил приведены на рисунке 35). Считая моменты сил, вращающих по часовой стрелке вокруг оси, проходящей через центр тяжести стола C, положительными, а моменты сил, вращающих в противоположном направлении, отрицательными, получаем следующее равенство:

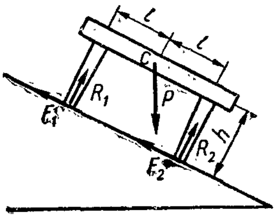

Рис. 35.

$$F_1 \cdot h + F_2 \cdot h + R_1 \cdot l - R_2 \cdot l + P \cdot 0 = 0.$$

Отсюда

$$R_2 \cdot l - R_1 \cdot l = F_1 \cdot h + F_2 \cdot h,$$

или

$$R_2 - R_1 = (F_1 + F_2) \cdot \frac{h}{l} > 0,$$

то есть

$$R_2 > R_1.$$

Если трение целиком отсутствует, то во время скольжения стола по наклонной плоскости

$$F_1 + F_2 = 0$$

и тогда получаем, что

$$R_1 = R_2,$$

то есть давления ножек A и B на наклонную плоскость одинаковы.

14

Продолжим R_1 до пересечения с продолжением F_1 и заменим ее в точке пересечения C силами F_2 и F_3, как это показано на рисунке 36, после чего рассмотрим полученную картину.

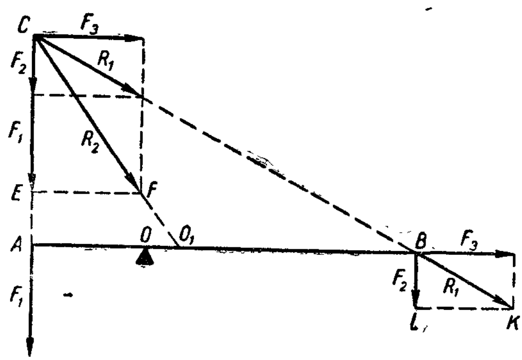

Рис. 36.

Треугольник ABC подобен треугольнику BLK. На основании этого запишем пропорциональность сходственных сторон:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{LK}{LB}, \text{ или } \frac{AB}{AC} = \frac{F_3}{F_2}.$$

Аналогичным образом из подобия треугольников AO_1C и EFC имеем:

$$\frac{AO_1}{AC} = \frac{EF}{EC}, \text{ или } \frac{AO_1}{AC} = \frac{F_3}{F_1+F_2}.$$

Разделив эти равенства почленно, получим:

$$\frac{AB}{AO_1} = \frac{F_1+F_2}{F_2}, \text{ или } \frac{AO_1 + O_1B}{AO_1} = \frac{F_1+F_2}{F_2}.$$

После приведения к общему знаменателю и некоторых других преобразований последнему равенству можно придать следующую форму:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{AO_1}{O_1B}.$$

Таким образом, точка O_1 делит расстояние AB обратно пропорционально силам F_1 и F_2, то есть должна совпадать с точкой O. Значит, рисунки 6 и 36 выполнены неверно.

15

Поскольку в каждый данный момент точки катушки, соприкасающиеся с полом, неподвижны, линию соприкосновения можно рассматривать как мгновенную ось вращения.

Как видно из рисунка 37, горизонтально направленная сила F_1 имеет относительно этой оси момент, стремящийся повернуть катушку в направлении *1* против часовой стрелки. В результате этого катушка будет двигаться к экспериментатору.

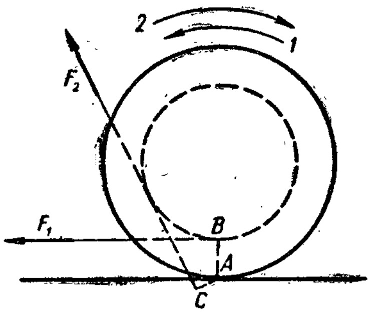

Рис. 37.

При достаточно большом наклоне нити момент силы F_2 относительно той же оси вращает катушку в направлении *2* по часовой стрелке и катушка убегает от лица, производящего опыт. В связи с этим парадоксом полезно порекомендовать учащимся прочитать в «Занимательной физике» Я. И. Перельмана статью «Есть ли в движущемся поезде неподвижные точки?».

16

Аристотель предполагал, что роль положенного сверху камня сводится лишь к тому, чтобы подталкивать нижний. На самом же деле ему нужно не только (вернее, не столько) приводить в движение нижний камень, сколько самого себя.

Другими словами, одновременно с увеличением в два раза силы, приводящей камни в движение (веса камней), ровно во столько же раз увеличивается приводимая в движение масса, а ускорение остается неизменным в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$a = \frac{F}{M}.$$

17

Ошибочность приведенного в тексте задачи рассуждения заключается в необоснованности предположения, что сила F передается через брусок M_1 полностью бруску M_2. Это совершенно не вытекает из законов механики. Разумнее предположить, что на брусок M_2 действует какая-то другая сила $F' \neq F$. Тогда к бруску M_1 будет приложена сила $R = F - F'$. После этого второй закон Ньютона дает:

$$a_1 = \frac{F - F'}{M_1} \quad \text{и} \quad a_2 = \frac{F'}{M_2}.$$

Поскольку бруски постоянно соприкасаются, их ускорения должны быть равными

$$a_1 = a_2 = a,$$

то есть

$$\frac{F - F'}{M_1} = \frac{F'}{M_2}.$$

Отсюда видно, что

$$F' = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \cdot F.$$

Таким образом, к бруску M_2 приложена не вся сила F, а только $\frac{M_2}{M_1 + M_2}$-я часть ее. Подставляя значение F' в любое выражение для ускорения (проще во второе), получаем:

$$a = \frac{F}{M_1 + M_2}.$$

Этот же результат получается, если просто разделить приложенную силу на общую массу обоих брусков.

18

В обоих случаях сила, приводящая в движение, равна двум килограммам. Но в первом случае вес гири приводит в движение не только тележку, но и самое гирю, тогда как во втором — сила сообщает ускорение только тележке.

19

Всего естественнее предположить, что повозку нужно привести в равномерное движение. Поэтому работа в обоих случаях будет производиться против силы трения, которая остается постоянной, так как определяется только весом повозки и коэффициентом трения. Следовательно, не должна измениться и сила тяги, так как в соответствии с третьим законом Ньютона при равномерном движении она равна той силе, против которой производится работа.

Таким образом, приведенный ответ неверен. Правильное решение таково: в обоих случаях сила тяги составит 500 *н*.

Нужно добавить, что впоследствии автор задачи пришел к тому же заключению и формулировал задачу по-другому: одна лошадь может тянуть с силой 500 *н*, какое усилие могут развить пять таких лошадей, запряженных вместе? Здесь уже не говорится, что лошади в обоих случаях должны тянуть одну и ту же повозку, и первоначальное решение (1750 *н*) будет правильным.

20

Увеличение скорости со временем определяется ускорением движущегося тела, которое в свою очередь зависит от величины силы, приводящей тело в движение, и массы (но не веса!) тела. Как первая, так и вторая величина остаются неизменными, а поэтому не изменится и ускорение автомобиля.

Однако этот ответ верен, по-видимому, лишь «в первом приближении», и более внимательное рассмотрение приводит к заключению, что небольшое увеличение ускорения должно все же наблюдаться, но совсем по иным причинам.

На основании второго закона Ньютона имеем

$$a = \frac{F_т - F_{тр}}{M},$$

где $F_т$ — сила тяги, постоянная по условию, $F_{тр}$ — сила трения, препятствующая движению автомобиля на Луне, и M — масса автомобиля. Сила трения может быть выражена как произведение коэффициента трения k колес автомобиля о поверхность Луны на его «лунный» вес P:

$$F_{тр} = k \cdot P.$$

Если считать поверхность Луны не очень отличающейся от земной (во всяком случае мы всегда можем соорудить там такую же дорогу, что и на Земле), то коэффициент трения k остается неизменным. В то же время вес автомобиля, а следовательно, нормальное давление, прижимающее его к поверхности Луны, уменьшается примерно в шесть раз. Поэтому уменьшается и сила трения, а разность сил $F_т - F_{тр}$ увеличивается, что сопровождается ростом ускорения. Наконец, есть и еще одна причина, по которой ускорение автомобиля на Луне будет больше — отсутствие воздуха, препятствующего движению.

21

Найдем вначале ускорения всех шариков сразу же после разрезания нити. Считая силы и ускорения, направленные вниз, положительными, получим для ускорений следующие выражения:

$$a_1 = \frac{M_1 g + f_{\rm I}}{M_1} = \frac{Mg + 2Mg}{M} = 3\,g;$$

$$a_2 = \frac{M_2 g - f_{\rm I} + f_{\rm II}}{M_2} = \frac{Mg - 2Mg + Mg}{M} = 0;$$

$$a_3 = \frac{M_3 g - f_{\rm II}}{M_3} = \frac{Mg - Mg}{M} = 0.$$

Таким образом, ускорение шарика M_2 и в самом деле не равно g. Но это тем не менее никак не противоречит утверждению, что при свободном падении центр тяжести системы должен двигаться с ускорением земного тяготения. Все дело в том, что центр тяжести системы совпадает с центром шарика M_2 лишь в состоянии покоя, что непосредственно вытекает из равенства масс шариков и расстояний AB и BC. Однако последнее равенство сразу же после разрезания нити нарушается. В самом деле, упругость пружины I, очевидно, больше упругости пружины II, так как при разных растягивающих силах они растянуты одинаково. Поэтому после разрезания нити первая пружина начнет сокращаться быстрее, чем вторая; расстояния AB и BC перестанут быть равными и центр тяжести системы начнет перемещаться вниз от шарика M_2. Для нахождения положения центра тяжести в некоторый момент времени t воспользуемся обычной формулой:

$$x_c = \frac{M_1x_1 + M_2x_2 + M_3x_3}{M_1 + M_2 + M_3} = \frac{M(x_1 + x_2 + x_3)}{3M} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}.$$

Совместим начало координат с центром шарика M_3 и направим ось x вертикально вниз. Поскольку начальные ускорение и скорость шарика M_3 равны нулю, то $x_3 = 0$. Тогда абсцисса x_2 шарика M_2 после разрезания нити будет равна постоянной величине $-l$ (l — длина пружины II), так как начальные скорость и ускорение для него также равны нулю. В то же время для шарика M_1 получаем:

$$x_1 = -\left(2l - \frac{a_1t^2}{2}\right) = -2l + \frac{3gt^2}{2}.$$

Подставляя эти значения в выражение для нахождения положения центра тяжести, получаем:

$$x_c = \frac{-2l + \frac{3gt^2}{2} - l + 0}{3} = -l + \frac{gt^2}{2}.$$

Мы получили уравнение, из которого видно, что центр тяжести системы, как и следовало ожидать, движется вниз (ускорение положительно, а начальная скорость равна нулю!) с ускорением g.

Обычно ошибку усматривают в том, что с ростом скорости увеличиваются силы сопротивления (трение и сопротивление воздуха), а результирующая сила и ускорение, следовательно, уменьшаются, в результате чего скорость больших значений приобрести не может.

Но в основном дело не в этом, так как мыслимы, по крайней мере в принципе, условия, когда силы сопротивления не будут зависеть от скорости. Таковы практически условия движения ракеты в космическом пространстве, где эти силы вообще отсутствуют или могут считаться пренебрежимо малыми.

Чтобы вскрыть ошибку, подсчитаем мощность, которую должен развивать велосипед в конце двадцатой минуты. Считая силу тяги равной 100 *н* и скорость 600 *м/сек*, получим по общеизвестной формуле

$$N = 100\ \textit{н} \cdot 600\ \frac{\textit{м}}{\textit{сек}^2} = 60\,000\ \frac{\textit{дж}}{\textit{сек}} = 60\ \textit{квт} \approx 81\ \textit{л. с.},$$

то есть опять-таки нелепый результат, так как такую мощность человек может развивать лишь на чрезвычайно короткое время, при прыжке например.

Но именно в этом и заключается разгадка парадокса: поскольку мощность должна оставаться в разумных границах, сила тяги, развиваемая велосипедистом, будет убывать с ростом скорости.

Итак, большая мощность не всегда означает большую силу тяги. Для проектируемых фотонных ракет, например, сила тяги предполагается равной всего лишь нескольким десяткам килограммов (для сравнения напомним, что двигатели современных реактивных самолетов развивают тяговые усилия в десятки тонн), но мощность их может быть очень большой, так как фотонные двигатели будут запускаться лишь после того, как ракета приобретет достаточно большую скорость за счет работы двигателей какого-либо другого типа, например, обычных реактивных, использующих реакцию вытекающей струи продуктов сгорания.

Ошибка допущена, конечно, не А. А. Штернфельдом, а автором софизма, и уже первые полеты советских космонавтов это убедительно показали.

В самом деле, болезненные ощущения, тем более тяжелые, чем больше высота, с которой совершен прыжок, испытываются человеком не во время падения, когда он обладает скоростью, а при ударе о землю, то есть именно в те моменты, когда скорость теряется.

Длительность удара исчисляется десятыми долями секунды, и за это время скорость человеческого тела должна уменьшиться от нескольких метров в секунду до нуля. Легко видеть, что при этом человек испытывает ускорение, во много раз превышающее ускорение свободного падения. Поэтому его тело испытывает опасные перегрузки.

Отметим, впрочем, что не всегда большое ускорение представляет опасность для пассажиров космического корабля (на это, между прочим, не обращают обычно внимания авторы популярных брошюр и научно-фантастических романов о межзвездных путешествиях).

Рассмотрим два примера: а) ракета падает на планету с такой массой, что вблизи нее ускорение в 100 раз превышает земное, и б) ракета движется с ускорением 100 g, полученным в результате интенсивной работы ее двигателей.

В обоих случаях с тем же ускорением, что и ракета, будут двигаться члены ее экипажа. Но если в первом случае ускоренное движение не вызовет у космонавтов никаких неприятных последствий (мы считаем, что удара о поверхность планеты им удастся, конечно, избежать, и не рассматриваем задачу борьбы с перегрузками при повороте и движении от планеты), то во втором — всем космонавтам угрожает гибель. Все дело в том, что в первом случае сила притяжения к планете действует одинаково на все материальные точки, находящиеся на ракете, и скорости всех частиц возрастают одновременно. При этом органы человеческого тела не давят друг на друга и никаких болей ощущаться не должно. Наоборот, это будет свободное падение, при котором все члены экипажа будут испытывать состояние невесомости, которое, как свидетельствует накопленный к настоящему времени опыт, хотя и не всеми переносится легко, однако не грозит жизни.

Во втором случае стенка ракеты непосредственно воздействует только на соприкасающиеся с ней части человеческого тела, которые передают воздействие на другие части тела. При этом происходит деформация органов, которая при больших ускорениях становится опасной.

24

Равнодействующая, по определению,—это сила, одна оказывающая такое же действие, как силы, которые она заменяет. Рассматриваемые в софизме силы приложены к двум различным телам, поэтому находить их равнодействующую бессмысленно, так как невозможно найти такую силу, которая бы оказывала на лошадь и на телегу такое же действие, как силы, о которых шла речь выше.

Динамометр, включенный между лошадью и телегой, служит фактически связующим звеном: он лишь, по выражению К. А. Путилова, передает силу, а потому натяжение его пружины равно тяге лошади или силе, с которой телега воздействует на лошадь.

25

Между Мюнхгаузеном и велосипедистом существует большая разница. Если верить рассказу, Мюнхгаузену «удалось» собственными усилиями (их можно назвать внутренними силами) поднять центр тяжести системы всадник — лошадь над поверхностью земли. Это противоречит физическим законам и поэтому невозможно. Велосипедист же, подтягивая руль на себя и приподнимая его над поверхностью земли, одновременно притягивает себя к рулю и приближается к земле. При этом центр тяжести системы велосипед — человек остается на прежней высоте.

26

Задание можно выполнить как с помощью рычажных, так и пружинных весов. Рассмотрим вначале первый вариант решения.

Если положить на одну чашку весов исследуемое тело массой M_1, а на вторую — гирю с массой M_2, весы останутся в состоянии безразличного равновесия. Однако равновесие нарушится, когда мы приведем весы в движение с ускорением a, так как, чтобы сообщить р а з н ы м по массе телам о д и н а к о в ы е ускорения, нужны различные силы

$$F_1 = M_1 \cdot a \text{ и } F_2 = M_2 \cdot a.$$

Нетрудно добиться, во всяком случае приблизительно, чтобы стрелка весов не отклонялась от первоначального положения и при ускоренном движении — для этого массы тела и гирь должны быть одинаковыми.

Можно воспользоваться и пружинными весами — динамометром. Подвесим к ним исследуемое тело и приведем систему в движение с некоторым п о с т о я н н ы м ускорением a_0. Указатель динамометра зафиксирует силу $F_1 = M_1 \cdot a_0$. Затем подвесим вместо исследуемого тела гирю с известной массой M_2 и вновь сообщим т о ж е с а м о е ускорение a_0. Весы покажут некоторую другую силу $F_2 = M_2 \cdot a_0$. Поделив два последних равенства почленно друг на друга, получим:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{M_1}{M_2}.$$

Откуда

$$M_1 = \frac{F_1}{F_2} \cdot M_2.$$

Необходимого в случае пружинных весов постоянства ускорения проще всего, по-видимому, достичь, вращая динамометр с подвешенным телом с постоянной угловой скоростью.

При решении этой задачи мы воспользовались тем обстоятельством, что в ускоренно движущихся системах как бы появляется искусственная сила тяжести. Эквивалентность гравитационных сил и сил, появляющихся в ускоренно движущихся системах, послужила одной из основ теории тяготения, развитой в общей теории относительности А. Эйнштейна (1879—1955 гг.).

27

Можно указать на несколько неточностей в приведенном в тексте софизма рассуждении. Во-первых, закон всемирного тяготения, записанный в форме

$$F = \gamma \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2},$$

относится только к точечным телам или к эллипсоидам и шарам. Во-вторых, если тела соприкасаются, это вовсе не означает, что равна нулю величина R, фигурирующая в формуле закона всемирного тяготения. Так, например, совершенно очевидно, что для двух соприкасающихся шаров с радиусами R_1 и R_2 нужно записать:

$$R = R_1 + R_2.$$

Однако главное состоит, пожалуй, в том, что законы физики имеют определенные границы применимости. В настоящее время доказано, что закон всемирного тяготения перестает быть справедливым как при очень малых, так и при очень больших расстояниях. Он верен лишь при

$$1\ \textit{см} < R < 5 \cdot 10^{24}\ \textit{см}.$$

Установлено, что небесные тела, разделенные расстоянием больше $5 \cdot 10^{24}$ *см*, как бы «не замечают» друг друга. В связи с изложенным полезно познакомиться со статьей Б. А. Воронцова-Вельяминова «Всемирен ли закон всемирного тяготения?», опубликованной в № 9 журнала «Техника — молодежи» за 1960 г.

28

В конечном счете величина приливов и отливов определяется не столько самой силой притяжения к Солнцу или Луне, сколько разностью сил, с которыми притягиваются к небесному светилу тело, находящееся вблизи центра Земли, и тело такой же массы, расположенное на ее поверхности. Если бы эти силы были равны, они сообщали бы Земле в целом и океанским водам одинаковое ускорение, так что они двигались бы, как единое целое, и приливные волны не возникали бы.

Однако центр Земли находится от Луны (или Солнца) несколько дальше, чем частицы воды в океане, расположенном на стороне, обращенной к Луне (Солнцу). Поэтому их ускорения будут различаться на величину (см. рис. 38):

$$\Delta a = \frac{\gamma M}{(d-R)^2} - \frac{\gamma M}{d^2} = \gamma M \cdot \frac{d^2 - (d-R)^2}{d^2(d-R)^2}.$$

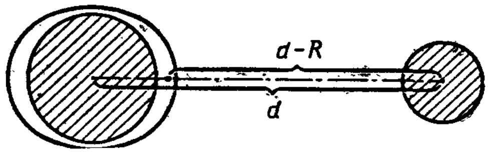

Рис. 38.

где M — масса небесного тела, d — расстояние от его центра до центра Земли, R — радиус Земли и γ — гравитационная постоянная.

Поскольку в обоих случаях $R \ll d$, то

$$\Delta a \approx \frac{\gamma M \cdot 2Rd}{d^2 \cdot d^2} = 2R \frac{\gamma M}{d^3}.$$

По отношению к «нормальному» ускорению силы тяжести g разница составит

$$\frac{\Delta a}{g} = 2R \frac{\gamma M}{d^3} : \frac{\gamma M_З}{R^2} = 2 \frac{M}{M_З} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^3,$$

где $M_З$ — масса Земли.

Для Луны

$$\frac{M}{M_З} = \frac{1}{81} \text{ и } \frac{R}{d} = \frac{1}{60}.$$

Отсюда для относительного уменьшения ускорения (и значит для относительного уменьшения силы тяжести на стороне, обращенной к Луне) получаем:

$$\frac{\Delta a}{g} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{2}{81 \cdot 60^3} \approx \frac{1}{9\,000\,000}.$$

Для Солнца

$$\frac{M}{M_З} = 332\,400 \text{ и } \frac{R}{d} = \frac{1}{23\,500}.$$

Из этих данных получаем

$$\frac{\Delta a}{g} = \frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{19\,000\,000}.$$

Таким образом, солнечные приливы должны быть действительно примерно в два раза слабее лунных.

Формула (1) выражает тот факт, что при **одном и том же пути** произведенная работа тем больше, чем больше сила, производящая работу. Аналогичным образом из выражения (2) следует, что для **одной и той же силы** работа растет с увеличением пройденного пути. (Следует добиться четкого понимания у учащихся, что работа с увеличением силы в два раза возрастает также вдвое только в том случае, когда путь в обоих случаях одинаков; или работа с возрастанием пути увеличивается **равным** образом, лишь если остается неизменной сила.) Таким образом, то, что считалось постоянным в формуле (1), оказывается переменным в выражении (2), и наоборот. Следовательно, в равенствах (4) и (5), полученных из (1) и (2) путем их почленного перемножения и деления, необходимо допустить возможность изменения как k_1, так и k_2. Отсюда вытекает, что k_3 и k_4 не являются постоянными коэффициентами. В самом деле, из смысла k_1 и k_2 следует, что

$$k_3 = \sqrt{F \cdot s} \quad \text{и} \quad k_4 = \frac{F}{s}.$$

Подставив эти значения коэффициентов k_3 и k_4 в равенства (4) и (5) соответственно, получим, очевидно, не вызывающие никаких сомнений выражения:

$$A = \sqrt{F \cdot s} \cdot \sqrt{F \cdot s} = F \cdot s \quad \text{и} \quad F = \frac{F}{s} \cdot s = F.$$

Приведенный софизм относится не только к формуле работы, но, разумеется, и ко всем формулам, аналитически выраженным одночленами.

Например, при равномерном движении пройденный путь пропорционален скорости и времени. Записав этот факт в виде двух формул:

$$s = k_1 v \quad \text{и} \quad s = k_2 t,$$

получим

$$s = k_3 \sqrt{vt}, \text{ где } k_3 = \sqrt{k_1 \cdot k_2} = \sqrt{v \cdot t}$$

или

$$v = k_4 \cdot t, \text{ где } k_4 = \frac{k_2}{k_1} = \frac{v}{t}.$$

30

Согласно условию дорога проложена горизонтально, то есть повсюду перпендикулярно вектору силы тяжести, так как горизонтальным, по определению, называется направление, образующее прямой угол с отвесным. Таким образом, сила направлена к линии перемещения под прямым углом, а потому работы производить не может, как это вытекает из формулы

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$

Следует, впрочем, отметить, что, если бы рассуждения в софизме и были правильными, постройка дороги все равно не разрешала бы проблемы движения автомобиля без мотора, так как, хотя с юга на север ехать по дороге приходилось бы «под гору», движение в обратном направлении шло бы «в гору», и в общей сложности никакого бы выигрыша энергии не происходило.

31

Ни о каком нарушении закона сохранения энергии, конечно, не может быть и речи. Этот закон, безусловно, выполняется во всех известных нам процессах. Следовало просто учесть, что соударение снаряда с тележкой носило неупругий характер, то есть часть энергии снаряда, а именно половина, была израсходована на преодоление сил сопротивления его движению внутри тележки и пошла в конечном счете на нагревание, и только оставшаяся часть привела в движение тележку (смотрите также предисловие к книге).

32

Если уголь сгорает на высоте четвертого этажа, то потенциальная энергия продуктов сгорания (вода, зола, углекислый газ, окись углерода, несгоревшие частицы угля) будет ровно на столько больше, на сколько была увеличена потенциальная энергия угля.

33

Воздушный шар вытесняет некоторый объем воздуха, вес которого больше веса шара, так как для заполнения оболочки выбирается газ с плотностью меньшей, чем у воздуха. При подъеме шара на высоту H его потенциальная энергия увеличивается на величину $V \cdot D \cdot g \cdot H$, где V — объем шара, D — его средняя плотность и g — ускорение силы тяжести.

В то же время на занимаемое им место опускается с той же самой высоты воздух, потенциальная энергия которого уменьшается на величину $V \cdot D' \cdot gH$, где V, g и H имеют тот же смысл, что и в первой формуле, а D' — плотность воздуха.

В результате потенциальная энергия системы атмосфера — воздушный шар уменьшается на величину

$$VgH(D' - D) > 0.$$

За счет этого выигрыша в энергии и поднимается шар. Значит, здесь действует та же причина, которая заставляет всплывать в воде куски дерева, пузырьки газа и т. п.,— стремление системы перейти в состояние с минимальным значением потенциальной энергии.

При решении задачи о шаре мы принимали для простоты плотность воздуха и газа постоянными. Фактически же плотность воздуха падает с высотой. Уменьшается при подъеме шара и плотность заполняющего его газа, так как он все сильнее растягивает оболочку шара, стремясь уравнять давление внутри шара с окружающим пространством. Однако плотность газа уменьшается не беспредельно, поскольку этому мешает оболочка. Поэтому на некоторой высоте плотность воздуха сравнивается со средней плотностью шара, и дальнейший подъем прекращается.

34

Топливо, находящееся в баках движущейся ракеты, обладает запасом кинетической энергии, полученной в результате разгона ракеты за счет ранее сгоревшего топлива. Поэтому энергия, заключенная в каждом килограмме оставшейся части горючего, будет складываться из теплоты сгорания, не зависящей от скорости ракеты, и все возрастающей кинетической энергии. При скорости порядка 3 *км/сек* кинетическая энергия килограмма горючего сравнивается с его теплотой сгорания — запасом химической энергии, а при достижении первой космической скорости кинетическая энергия топлива в три раза превышает теплоту сгорания. Это и объясняет парадокс.

35

Скатываясь с горки, обруч участвует одновременно в двух движениях: его центр тяжести перемещается поступательно, в то время как все точки обруча совершают, кроме того, вращательное движение, ось которого проходит через центр тяжести.

Поэтому правую часть написанного в условии задачи равенства, выражающего закон сохранения энергии, необходимо дополнить еще одним членом, представляющим кинетическую энергию вращательного движения:

$$mgH = W^{\text{кинет.}}_{\text{поступ.}} + W^{\text{кинет.}}_{\text{вращат.}}.$$

Рассматривая рисунок 39, нетрудно видеть, что точки обруча движутся относительно его центра с такой же скоростью, с какой центр движется относительно земной поверхности. Действительно, выберем на обруче точку B, соприкасающуюся в данный момент с землей, а поэтому неподвижную относительно нее. Если центр обруча обладает относительно земли скоростью v, то такой же скоростью он обладает относительно B. Но если центр A движется относительно B со скоростью v, то и точка B движется относительно A с такой же скоростью. Все точки обруча равноправны, и если одна из них движется относительно центра со скоростью v, то это же можно сказать и о других. На основании этого заключаем, что можно записать следующее равенство:

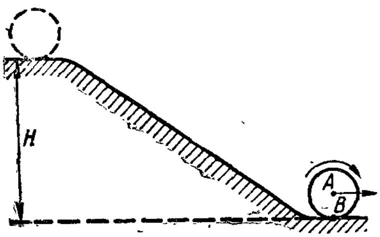

Рис. 39.

$$W^{\text{кинет.}}_{\text{поступ.}} = W^{\text{кинет.}}_{\text{вращат.}}.$$

Но

$$W^{\text{кинет.}}_{\text{поступ.}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Поэтому

$$mgH = mv^2.$$

Отсюда для скорости, приобретенной обручем, имеем:

$$v=\sqrt{gH}.$$

Подставляя сюда $H=4,9$ *м*, найдем:

$$v=\sqrt{9,8\,\frac{м}{сек^2}\cdot 4,9\,м}\approx 6,9\,\frac{м}{сек^2}.$$

Аналогичным образом следует решать задачи на вычисление скорости скатившихся с горки шара, диска и других тел. Но эти случаи сложнее, так как скорости точек, различно удаленных от центров диска, шара и т. п., различны, что сильно затрудняет вычисление кинетической энергии, связанной с вращательным движением. Для решения задач в подобных случаях приходится вводить понятие о моменте инерции, играющем в динамике вращательного движения такую же роль, как масса в поступательном движении. Если тело соскальзывает с наклонной плоскости, не вращаясь, то $W^{\text{кинет.}}_{\text{вращат.}}=0$ и скорость может быть вычислена по формуле, приведенной в тексте софизма.

Убедиться в справедливости изложенных здесь соображений нетрудно на опыте, сравнивая время скатывания с наклонной плоскости двух одинаковых бутылок, имеющих равный вес, наполненных одна водой, а другая — смесью песка и опилок.

При движении первой бутылки ее потенциальная энергия почти целиком превращается в кинетическую энергию поступательного движения, поскольку вода не принимает участия во вращении, за исключением весьма тонкого слоя, прилегающего к стенкам бутылки (массой самой бутылки в этом и следующем далее рассуждении мы для простоты пренебрегаем).

Смесь песка и опилок вращается вместе с бутылкой и значительная доля потенциальной энергии бутылки превращается в кинетическую энергию вращательного движения. Поэтому кинетическая энергия и, следовательно, скорость поступательного движения для второй бутылки оказывается меньше.

Показав этот легко воспроизводимый опыт, можно попросить учащихся попробовать объяснить его.

36

Оба утверждения одинаково справедливы, если считать третью из величин, входящих в каждую формулу, постоянной.

Действительно, рассмотрим на вращающемся диске две точки, расположенные на различном расстоянии от оси вращения. Тогда при одной и той же угловой скорости ω та из них будет обладать бо́льшим центростремительным ускорением, которая удалена от оси вращения дальше. Это легко показать на опыте, поставив на диск проигрывателя радиолы две фигурки: нетрудно подобрать для них такие положения, что более удаленная от центра упадет, а вторая останется стоять.

Наоборот, при одинаковой линейной скорости v вращающихся точек их центростремительные ускорения будут обратно пропорциональны радиусам вращения. Так обстоит, например, дело с ускорениями точек, расположенных по окружностям двух шкивов различного радиуса, соединенных ременной передачей. То же относится и к зубчатым колесам с разным числом зубцов.

Аналогичным образом одинаково справедливы две формулы для вычисления мощности, потребляемой некоторым участком электрической цепи:

$$N = I^2R \text{ и } N = \frac{U^2}{R}.$$

Если токи одинаковы (что бывает при последовательном соединении потребителей тока), мощности, рассеиваемые на участках, прямо пропорциональны их сопротивлениям. При параллельном соединении (примером которого может служить соединение бытовых электроприборов) одинаковым оказывается напряжение на приборах, и потребляемые мощности обратно пропорциональны сопротивлениям.

По поводу этой задачи смотрите также начало решения задачи № 29.

37

Предложенный двигатель, конечно, неосуществим. Но не потому, как это иногда утверждают, что сумма центробежной и центростремительной сил равна нулю. Такое объяснение неправильно, так как складывать силы, приложенные к различным телам, бессмысленно.

Изменение направления движения жидкости происходит не только по дуге *АСВ*, но и в «точках» *А* и *В*. Можно считать, что в этих точках жидкость движется по дугам очень малого радиуса. В соответствии с этим центробежные силы, действующие на стенки трубки, существуют также в точках *А* и *В*. Направление и величина их таковы, что векторная сумма их с силой *R* равна нулю.

Интересно отметить, что «применить центробежную силу к поднятию за атмосферу, в небесные пространства», пытался молодой К. Э. Циолковский—гениальный основоположник теории межпланетных полетов (1857—1935 гг.). Его машина «состояла из закрытой камеры или ящика, в котором вибрировали два перевернутых эластичных маятника с шарами в верхних концах. Они описывали дуги, и центробежная сила шаров должна была подымать кабину и нести ее в небесное пространство». Однако в тот же день Циолковский понял, что «будет трясение машины, и только. Ни на один грамм ее вес не уменьшится»*. Точно так же не уменьшается вес колеблющегося маятника, подвешенного на П-образную подставку.

При доказательстве неосуществимости всех подобных двигателей лучше и проще всего опираться на невозможность приведения в движение замкнутой системы одними лишь внутренними силами.

38

Здесь нет никакого противоречия, как его нет в том, что идущий человек, споткнувшись, падает вперед, хотя на его ноги подействовала тормозящая сила, направленная навстречу движению.

В обоих случаях в основу объяснения явления необходимо положить первый закон механики — закон инерции.

39

Обычно ошибку в приведенном «выводе» усматривают в замене дуги хордой. Между тем при малых углах от-

* К. Э. Циолковский, Моя жизнь, «Огонек», 1960, № 37, стр. 10.

клонения такая замена вполне законна и допустима, и ошибка заключается в другом.

Вычисляя время движения маятника по хорде AB, мы полагали ускорение в направлении движения все время постоянным и равным $a=g\cdot\cos\alpha$, где угол α соответствует наибольшему отклонению маятника от положения равновесия.

На самом же деле ускорение маятника в данном случае является переменной величиной, достигающей максимума в моменты наибольшего отклонения и обращающейся в нуль при прохождении положения равновесия. Иначе говоря, ошибка состоит в незаконном использовании формул равнопеременного движения, тогда как в гармоническом колебательном движении скорость, время, путь и ускорение связаны гораздо более сложными соотношениями.

40

Чаще всего, говоря о волнах, подразумевают процесс распространения упругих колебаний, которые действительно в жидкостях при малых частотах не возникают. Однако не всегда колебания вызываются силами упругости. В приведенном случае поперечные волны на поверхности пруда, например, обязаны своим появлением силе тяжести: опустившиеся под ударом камня вниз частицы воды вытесняются затем вверх весом соседних слоев. Однажды возбужденное колебание продолжается затем до тех пор, пока первоначально сообщенная энергия не израсходуется на преодоление сил жидкого трения и приведение в движение все больших участков поверхности жидкости. Нетрудно видеть, что поперечные колебания, поддерживаемые силой тяжести, могут существовать лишь на границе жидкости и газа. Причиной появления волн в жидкости, граничащей с газом, могут быть также капиллярные силы, вызывающие волны очень малой длины — рябь.

Нужно отметить, что при достаточно больших частотах жидкость обнаруживает упругость на сдвиг, то есть при большой частоте колебаний в жидкости возможны и упругие поперечные волны.

41

Ослабление звука, наблюдающееся в те моменты, когда обе ветви камертона располагаются на одной прямой с ухом, можно было бы объяснить только различной длиной путей, проходимых звуковыми волнами, лишь в том случае, если бы от источников звука они выходили в одинаковых фазах, точнее, с разностью фаз, кратной 2π. На самом же деле ветви камертона колеблются в противофазе: когда одна из них посылает к уху волну сжатия, от другой в этот момент начинает распространяться волна разрежения. В результате, когда ветви расположены на прямой, соединяющей камертон с ухом, звуковые волны начинают распространяться, уже имея противоположные фазы. При подходе к уху волны поэтому гасят друг друга, и мы слышим ослабленный звук. Несколько сантиметров, разделяющих ветви камертона, не играют существенной роли, так как разность хода, возникающая на таком пути, значительно меньше длины волны.

Когда ветви располагаются в плоскости, параллельной уху, мы слышим усиленный звук, ибо ветви камертона действуют фактически как один источник звука: при движении ветвей друг к другу из пространства между ними выталкивается воздух, и к уху идет импульс сжатия. При взаимном удалении ножек начинает распространяться импульс разрежения. Периодические импульсы сжатия и разрежения воспринимаются как звук.

42

Звук камертона постепенно затухает, так как энергия его колебаний постепенно излучается в окружающее пространство. Рассеяние усиливается и происходит быстрее, если камертон закреплен на резонаторе или просто соприкасается со столом, поскольку излучение энергии при этом происходит не только с ветвей камертона, но и с поверхности резонатора или стола. Таким образом, хотя во втором случае слышен более сильный звук, его длительность будет меньше, так что излученная энергия в обоих случаях будет одинаковой.

Если при определении плотности взять тело вдвое большего объема, то вдвое большей окажется и его масса, а отношение этих величин, интересующее нас, останется, естественно, неизменным.

При неизменяющейся температуре плотность является постоянной, зависящей только от рода вещества характеристикой. Поэтому говорить, что «плотность вещества прямо пропорциональна массе и обратно пропорциональна объему» не совсем правильно. Такая формулировка для двух порций одного и того же вещества приводит, как мы видели, к неправильному выводу.

Точно так же формулу закона Ома для участка цепи можно аналитически представить в следующем виде:

$$R = \frac{U}{I},$$

но из этого выражения не следует, что сопротивление проводника зависит от напряжения и силы тока (нагреванием за счет тепла Джоуля—Ленца мы пренебрегаем), так как для каждого конкретного проводника сопротивление имеет некоторое вполне определенное значение.

Можно привести следующий пример, обычно убедительно показывающий учащимся неправильность приведенного в софизме рассуждения.

Связь между длиной окружности и ее диаметром можно записать в следующем виде:

$$\pi = \frac{l}{R}.$$

Но отсюда нельзя сделать заключение, что «число π (то есть 3,141592...) прямо пропорционально длине окружности и обратно пропорционально величине ее диаметра».

В заключение следует отметить, что вполне правильны следующие формулировки: «при постоянном объеме плотность вещества прямо пропорциональна массе» и «при постоянной массе плотность вещества обратно пропорциональна объему», так как здесь молчаливо подразумевается, что мы сравниваем плотности различных веществ, которые, вообще говоря, различны (см. также решения задач № 29 и 36). Что же касается отношения длины окружности к ее диаметру, то оно для всех окружностей, проведенных на **плоской** поверхности, одинаково и равно π.

44

Невозможность осуществления вечного двигателя является следствием универсального закона сохранения энергии, справедливого во всех случаях. В тексте софизма намеренно не обращается внимания на тот факт, что сила давления, как и само давление, направлена всегда перпендикулярно к поверхности, на которую она действует. Поэтому в направлении возможного перемещения, то есть горизонтально, действует не вся сила давления, а лишь ее горизонтальная составляющая.

Обозначим площадь левой стенки через s, а среднее давление на нее — через p. Тогда силу давления на левую стенку можно выразить следующим образом:

$$F_{л} = p \cdot s.$$

Как это нетрудно видеть из рисунка 11, площадь правой стенки превышает площадь левой в $\frac{1}{\sin\alpha}$ раз, так как именно во столько раз отличаются длины сторон стенок, лежащих в плоскости чертежа.

Поэтому сила давления на правую стенку при одном и том же среднем давлении p оказывается несколько иной, а именно:

$$F_{п} = p \cdot \frac{s}{\sin\alpha}.$$

Однако, как уже сказано выше, в направлении возможного перемещения действует только горизонтальная составляющая силы $F_{п}$, которую можно выразить так:

$$F = F_{п} \cdot \sin\alpha = p \cdot s.$$

Таким образом, силы, действующие справа налево и в противоположном направлении, равны.

Доказательство можно провести и не прибегая к услугам тригонометрии. Можно, например, воспользоваться подобием треугольников (построение, необходимое для этого, мы предоставляем читателям выполнить самостоятельно). Еще проще положить угол α равным 30°, чтобы затем воспользоваться теоремой о соотношении между катетом и гипотенузой в прямоугольном треугольнике с таким острым углом.

45

Решение очевидно. Однако мы сочли полезным поместить этот софизм, так как часто наблюдали, как учащиеся, правильно указав, какой закон не принят во внимание, не могли объяснить, как же его все-таки следует применять для истолкования явления.

46

Мы живем на дне воздушного океана, и на все тела, в него погруженные, действует архимедова сила, равная весу вытесненного воздуха. Из-за большего объема пух «теряет» в весе больше, чем железо. Поэтому, чтобы весы находились в равновесии, следует пуха брать по массе несколько больше, чем железа.

При точном взвешивании всегда вводятся специальные поправки на потерю веса.

Значит, шуточная задача: «Что тяжелее — пуд железа или пуд пуха?» — оказывается вполне серьезной.

47

Выталкивающая сила появляется при погружении в жидкость любого тела, даже в том случае, когда «погружается» вода в воду, то есть на некоторый мысленно выделенный в жидкости объем действуют две взаимно уравновешивающиеся силы. Однако следует иметь в виду, что силы, в соответствии с третьим законом Ньютона, всегда появляются парами. Поэтому если есть направленная вверх архимедова сила, действующая на выделенный объем, то этот объем действует на остальную жидкость с силой, равной весу «вытесненной» жидкости, то есть своему собственному. Эта сила направлена вниз. Таким образом, хотя «вода в воде и ничего не весит», она все же давит на нижерасположенные слои и на дно сосуда, ее заключающего, с силой, равной своему весу.

Те же рассуждения можно, конечно, привести и для воздуха.

48

Подъемная сила $F_{\text{газа}}$ некоторого объема газа $V_{\text{газа}}$ равна разности веса воздуха $P_{\text{воздуха}}$, вытесненного газом, и веса самого газа $P_{\text{газа}}$.

$$F_{\text{газа}} = P_{\text{воздуха}} - P_{\text{газа}}.$$

Учитывая, что вес некоторого объема газа может быть выражен в виде

$$P = D \cdot g \cdot V,$$

где D — плотность газа и g — ускорение силы тяжести, мы можем записать:

$$F_{\text{газа}} = (D_{\text{воздуха}} - D_{\text{газа}}) \cdot g \cdot V.$$

Для гелия имеем:

$$F_{\text{He}} = (D_{\text{воздуха}} - D_{\text{He}}) \cdot g \cdot V.$$

Аналогично для такого же объема водорода:

$$F_{\text{H}_2} = (D_{\text{воздуха}} - D_{\text{H}_2}) \cdot g \cdot V.$$

Рассмотрим отношение подъемных сил:

$$\frac{F_{\text{He}}}{F_{\text{H}_2}} = \frac{D_{\text{воздуха}} - D_{\text{He}}}{D_{\text{воздуха}} - D_{\text{H}_2}}.$$

Подставляя сюда численные значения плотности гелия, водорода и воздуха, получим:

$$\frac{F_{\text{He}}}{F_{\text{H}_2}} = \frac{(1{,}29 - 0{,}178)\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{(1{,}29 - 0{,}089)\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 0{,}92.$$

Отсюда видно, что подъемная сила остается практически неизменной.

49

Давление в потоке ветра, проносящегося над крышей, становится меньше, чем в неподвижном воздухе. Поэтому, если на фронтоне чердака нет окон, возникает подъемная сила, стремящаяся сорвать крышу или черепицу с нее. Но достаточно сделать на чердаке окна, как воздух под крышей также придет в движение, разница давлений над крышей и под ней уменьшится и станет недостаточной, чтобы причинить ущерб дому.

Парадокс можно сформулировать иначе: почему во время ураганов крыши домов не продавливаются давлением ветра, а срываются вверх? Или почему взрывная волна валит сплошные заборы и оставляет невредимыми тонкие столбы? Полезно также упомянуть о необходимости открывать рот во время выстрела артиллерийских орудий, чтобы давление по обе стороны барабанной перепонки (со стороны ушной раковины и евстахиевой трубы) было одинаковым.

50

Торможение о берега, дно и прилегающий к поверхности реки воздух приводит к тому, что быстрее всего движутся слои воды, расположенные на середине реки, несколько ниже ее поверхности. Распределение скоростей имеет примерно вид, показанный на рисунке 40.

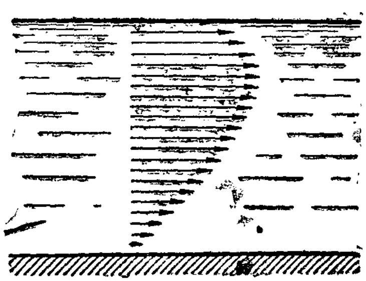

Рис. 40.

Поэтому при увеличении нагрузки и осадки нижняя часть плота попадает в слои с большей скоростью, в связи с чем плот начинает двигаться быстрее.

Это, между прочим, явилось одной из причин, по которой едва не погиб Генри Ватцингер — один из членов экипажа «Кон-Тики» *.

* Тор Хейердал, Путешествие на Кон-Тики, изд. «Молодая гвардия», 1957, стр. 170, 185—187.

III ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

51

Сжимаемость жидкостей ничтожна: для воды уменьшение объема составляет примерно 0,00005 от первоначального значения на каждую атмосферу приложенного давления.

Нетрудно подсчитать, что вода сравняется по плотности со сталью при давлении около 50 000 атмосфер. Такие давления существовали бы на глубине порядка 500 *км*. Если же учесть сжимаемость железа, потребовалась бы еще большая глубина. Между тем наиболее глубокое место в океане имеет «всего» около 11 *км*.

Интересно отметить, что вода все же значительно сжата собственным весом. Если бы она могла освободиться от сжатия, уровень воды в мировом океане поднялся бы на 30 *м*. Огромные территории низменных областей Земли оказались бы в результате затопленными.

52

Высоко над Землей атмосфера очень разрежена, и число молекул в единице объема невелико. Поэтому, хотя каждая молекула обладает значительной кинетической энергией, частиц слишком мало, чтобы передать при соударении со стенками спутника заметное количество энергии. Наоборот, когда спутник не освещается лучами Солнца, он отдает в окружающее пространство в процессе лучеиспускания гораздо больше энергии, чем получает от ударяющихся о него молекул, и может сильно охладиться, если не приняты специальные меры против этого нежелательного явления.

Нагревание спутника в плотных слоях атмосферы при посадке происходит совершенно по иным причинам. Оно объясняется трением поверхности спутника о воздух.

53

Полет метеорита через земную атмосферу длится всего несколько секунд. За такое короткое время тепло, возникающее при трении метеорита о воздух, не успевает проникнуть в его толщу, так как теплопроводность метеоритного вещества, как и пород земной коры, мала. Поэтому, хотя поверхность метеорита, как правило, оплавлена, в его глубине сохраняется температура космического пространства. При падении в воду поверхностные слои быстро охлаждаются и его поверхность покрывается коркой льда, как покрывается тонким слоем льда брошенный в воду сильно охлажденный кусок железа.

Факт, описанный в задаче, не выдуман, и сообщения о нем приводились в научной печати.

54

Отольем половину холодной воды в сосуд *Г* и поместим его внутрь сосуда с горячей водой. Нетрудно подсчитать, что в отсутствии тепловых потерь в сосудах *А* и *Г* установится температура 60°С. Затем подогретую воду перельем из сосуда *Г* в пустовавший сосуд *В* и повторим описанную процедуру с остатком холодной воды. После того как она с помощью сосуда *Г* будет введена в сосуд *А*, вода в обоих сосудах примет температуру около 47°С. Если теперь перелить воду из сосуда *Г* в сосуд *В*, то температура смеси в последнем окажется равной примерно 53°С. Таким образом, требование задачи выполнено, так как холодная вода оказалась нагретой до 53°С за счет охлаждения горячей до 47°С, причем смешивания воды не производилось.

Если бы вода была разделена не на две, а на большее число частей, разница конечных температур оказалась бы значительнее; при бесконечно малых порциях переносимой воды произошел бы полный «обмен температурами».

Это в какой-то мере осуществляется в технических теплообменниках, где по соосно расположенным трубкам текут навстречу друг другу два потока жидкости (или газов) — холодный и горячий. При достаточно длинных трубках происходит практически полный «обмен температурами», как это показано на рисунке 41. Если же потоки двигались бы в одном направлении, температуры в лучшем случае только бы выравнялись.

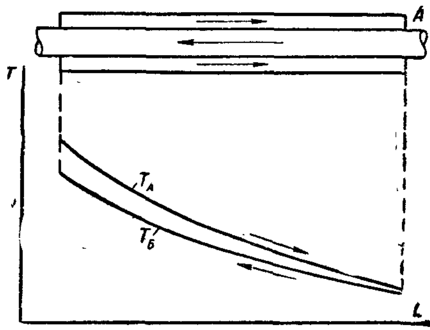

Рис. 41.

Хочется еще раз подчеркнуть, что никакого нарушения тепловых законов (второго начала термодинамики, о котором см. решения задач 72—74) в описанных процессах не происходит, так как во всех случаях температура жидкости, которой передается тепло, оказывается меньше температуры жидкости, отдающей тепло. Это хорошо видно из рисунка 41, где нижняя кривая представляет температуру жидкости, получающей тепло.

55

За одно и то же время тело отдает в окружающее пространство тем большее количество тепла, чем сильнее его температура отличается от температуры окружающей среды (закон Ньютона). Поэтому остывание происходит вначале быстро, а затем все медленнее. Следовательно, разумнее выждать пять минут вначале, когда теплота теряется остывающим телом быстрее.

56

Для измерения температуры можно пользоваться любой температурной шкалой. Не изменяются при переходе от одной шкалы к другой, разумеется, и физические законы. Таким образом, вычисление количества тепла, необходимого для нагревания тела, можно вести по прежним формулам. Однако численные значения тех величин, в определение которых входит понятие температуры, будут иными. Так, например, численное значение тепло-емкости воды при переходе от шкалы Цельсия к шкале Реомюра возрастает в 1,25 раза, то есть от 4,19 $\frac{кдж}{кг \cdot град\,C}$ до 5,23 $\frac{кдж}{кг \cdot град\,R}$. Но так как кипение воды по шкале Реомюра наступает при 80°, количество тепла, необходимого для нагревания воды от точки таяния льда до кипения, останется прежним и равным 41,9 *кдж.*

57

В приведенном софизме заключено лишь кажущееся противоречие, так как в обоих случаях работа против внешних сил производится не «сама собой», «не даровым образом», а за счет какой-то энергии. В первом случае эта энергия подводится к системе и з в н е, от нагревателя, во втором — работа произведена за счет убыли так называемой в н у т р е н н е й энергии тела.

Внутренняя энергия тела зависит от скоростей и взаимного расположения молекул. Это соответственно молекулярно-кинетическая и молекулярно-потенциальная составляющие внутренней энергии. При затвердевании жидкости с у щ е с т в е н н ы м о б р а з о м м е н я е т с я х а р а к т е р д в и ж е н и я и р а с п о л о ж е н и е м о л е к у л, хотя их скорости остаются практически неизменными. Молекулы в кристаллической решетке твердого тела располагаются в строгом порядке, которому соответствует минимум молекулярно-потенциальной составляющей энергии. «Излишек» энергии выделяется — это так называемая теплота затвердевания или теплота плавления. Именно за ее счет и происходит разрушение герметически закупоренного чугунного шара при замерзании налитой в него воды.

Рассмотрим еще один пример. Пока в цилиндр паровой машины поступает пар из котла, работа по перемещению поршня совершается за счет энергии, подводимой с паром из котла. Однако после так называемой «отсечки пара», когда цилиндр оказывается разобщенным с котлом, пар перемещает поршень за счет убыли внутренней энергии, а именно молекулярно-кинетической ее составляющей. При этом пар охлаждается. Работа с отсечкой позволяет полнее использовать энергию пара.

58

Как и в софизме с исчезновением потенциальной энергии угля (см. задачу 32), решение не составит труда: энергия не может исчезнуть бесследно, она лишь переходит из одного вида в другой. Действительно, достаточно точные измерения показали бы, что после растворения согнутой пружины температура кислоты окажется несколько выше, чем в том случае, когда растворяется несогнутая пружина. Впрочем, повышение температуры настолько мало, что не может быть обнаружено простыми средствами, и было бы совершенно безнадежно пытаться воспользоваться для этой цели обычным термометром.

59

Работа — это процесс, в результате которого происходит передача энергии от одного тела к другому. Количество переданной энергии в этом случае определяется произведением силы на путь (если, конечно, направления этих двух векторов совпадают; в противном случае появляется третий сомножитель — косинус угла между направлениями перемещения и силы).

Работа — один из возможных, но не единственный способ передачи энергии. Не менее часто в жизни приходится сталкиваться со вторым способом обмена энергией между телами — теплопередачей.

Ракета «висит» в воздухе неподвижно, хотя двигатели ее работают. Поскольку перемещение отсутствует, работа равна нулю. Но это вовсе не означает, что энергия сожженного в ракете топлива исчезает бесследно,— газы, вылетающие из дюз ракеты, нагреты до высокой температуры и уносят с собой энергию, ранее заключенную в топливных баках.

60

Как это уже отмечалось в решении предыдущей задачи, существуют две, и только две, принципиально различные формы обмена энергией между телами — процесс работы (упорядоченная передача энергии от одних тел другим) и процесс теплопередачи (неупорядоченная форма). Несмотря на качественное различие, они могут привести к одинаковым результатам. Именно в этом и состоит эквивалентность тепла и работы *. Рассмотрим один конкретный пример.

Пусть в цилиндре под поршнем заключен воздух. Его можно нагреть несколькими способами. Можно, например, подводить тепло от некоторого нагревателя, предварительно закрепив поршень в определенном положении. В этом случае процесс, в котором принимает участие газ, называется изохорическим. При изохорическом нагревании теплоемкость воздуха равна 0,73 *кдж/кг · град,* и количество тепла, необходимого для нагревания 1 *кг* воздуха на 1 *град,* будет в этом случае равно:

$$Q = M \cdot c_v \Delta t = 1\ кг \cdot 0{,}73 \frac{кдж}{кг \cdot град} \cdot 1\ град = 0{,}73\ кдж,$$

где через c_v обозначена удельная теплоемкость при изохорическом процессе.

Поскольку поршень закреплен, газ не совершает работы против внешних сил и все подведенное тепло — 0,73 *кдж* — идет на увеличение внутренней энергии газа, которое приводит к повышению температуры на 1 *град.*

Однако такого же увеличения температуры и такого же увеличения внутренней энергии газа можно добиться и другим путем — подведя энергию не путем теплопередачи, а совершив над газом работу, сжав его.

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающими телами, называется адиабатным (или адиабатическим). Чтобы процесс носил адиабатный характер, необходимо газ заключить в абсолютно нетеплопроводную оболочку. Достаточно хорошим приближением к этому идеальному случаю является система, находящаяся в стеклянном сосуде с двойными посеребренными стенками, из пространства между которыми удален воздух (сосуд Дьюара).

Практически адиабатным будут также очень быстро протекающие процессы. При очень быстром сжатии газа теплообмен с окружающими телами не успевает про-

* Подробнее об этом см.: К. А. Путилов, Курс физики, т. I, § 128, «Термодинамическое содержание понятий «теплота» и «работа», ГИТТЛ, М., 1954

изойти, и увеличение внутренней энергии газа равно работе по его сжатию. Увеличение внутренней энергии при адиабатическом сжатии сопровождается ростом температуры, которое хорошо известно велосипедистам и шоферам по нагреванию насоса при накачивании спустивших шин.

Из термодинамики известно, что объем газа и его температура связаны при адиабатическом процессе следующим образом:

$$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1},$$

где T — температура газа по шкале Кельвина и γ — постоянная величина (отношение теплоемкостей при изобарическом и изохорическом нагревании), равная для воздуха 1,4.

Полагая первоначальный объем, занимаемый 1 *кг* воздуха, равным 1 *м*³ и начальную температуру 273°К, получим для объема, до которого надо адиабатически сжать газ, чтобы его температура стала 274°К, следующее значение:

$$V_2 = V_1 \cdot \sqrt[\gamma-1]{\frac{T_1}{T_2}} = 1 м^3 \sqrt[0,4]{\frac{273^\circ}{274^\circ}} = 0,99\ м^3.$$

61

Если даже взять вещество с большим коэффициентом теплового расширения, то величина $-\frac{1}{\alpha}$ все равно оказывается много меньше —273°С, то есть абсолютного нуля. Так для свинца α равно $3 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$ и $-\frac{1}{\alpha} =$ $= -3 \cdot 10^6$ *град*. Подобные температуры принципиально недостижимы.

При разборе софизма важно указать на зависимость коэффициента теплового расширения от температуры.

62

Надо всегда различать силу, производящую работу, и силу, против которой работа производится. Величины этих сил иногда и не совпадают, поэтому и произведенные ими работы при одном и том же пути могут оказаться различными не только по знаку (так обстоит дело всегда), но и по величине.

Поднимая, например, гирю массой 1 *кг* на высоту 1 *м*, мы совершаем работу $A = M \cdot g \cdot H = 1$ *кг* $\cdot$ 9,8 *м/сек*^{2} $\cdot$ $\cdot$ 1 *м* = 9,8 *дж* только в том случае, если прикладываем во время подъема к гире силу величиной ровно 9,8 *н*. Затраченная нами энергия в этом случае целиком идет на увеличение потенциальной энергии гири.

Но ведь можно, поднимая гирю, прикладывать силу больше, чем 9,8 *н*. В этом случае «излишек» силы будет приводить к ускоренному движению и постепенному увеличению кинетической энергии гири. Сумма потенциальной и кинетической энергии гири на высоте 1 *м* будет равна работе, произведенной рукой человека на этом пути.

В рассматриваемой задаче также существует сила, производящая работу,— сила атмосферного давления — и сила, против которой производится работа — вес столбика ртути, вошедшей в трубку.

Работа первой силы для обеих трубок одинакова и может быть вычислена по формуле

$$A_{\text{ат}} = p_{\text{ат}} \cdot V,$$

где $p_{\text{ат}}$ — атмосферное давление и V — внутренний объем каждой трубки.

Что же касается второй силы, то произведенную ею работу можно в принципе рассчитать по такой же формуле. Однако практически сделать это не так-то просто, так как следует учитывать, что во время заполнения трубки давление столбика ртути будет непрерывно меняться. Непосредственно после открывания кранов оно равно нулю, так как в трубках ртути еще нет. Затем силы давления растут вместе с высотой столбиков. Возрастание происходит медленнее в правой трубке, где раздутие расположено ниже,— ведь пока оно не заполнится ртутью, давление меняется очень мало. Поэтому среднее давление оказывается больше в левой трубке, поскольку высота столбика ртути здесь сразу увеличивается быстро. Следовательно, и работа против сил давления здесь сказывается больше.

Таким образом, работа сил атмосферного давления одинакова в обоих случаях, но производится она не только для того, чтобы увеличить потенциальную энергию ртути, но также и для того, чтобы привести ее в ускоренное движение, а также, чтобы преодолеть силы трения. При остановке ртути ее кинетическая энергия превращается в тепло. Точно так же сопровождается нагреванием трение ртути о стенки трубок.

Сумма количеств тепла, пошедшего на нагревание ртути и на увеличение ее потенциальной энергии, в обоих случаях равна работе сил атмосферного давления, но относительная величина второго слагаемого больше для левой трубки.

63

Часто те или иные изменения, происходящие с телами, ускользают от нашего внимания не потому, что их нет вообще, но вследствие своей незначительности.

Поднятие смачивающей жидкости в капиллярных трубках происходит за счет убыли внутренней энергии жидкости. Однако сопровождающее подъем понижение температуры слишком мало, чтобы его можно было легко обнаружить.

Пусть масса жидкости, вошедшей в капилляр, равна M и высота подъема составила H. Тогда произведенная капиллярными силами работа по увеличению потенциальной энергии жидкости может быть записана следующим образом:

$$A=\frac{1}{2}MgH,$$

где g — ускорение силы тяжести. Множитель $\frac{1}{2}$ введен потому, что центр тяжести жидкости в капилляре оказался поднятым на высоту $\frac{H}{2}$ над поверхностью жидкости в сосуде.

Работа капиллярных сил, как мы уже говорили, равна убыли внутренней энергии. Поэтому понижение температуры мы можем найти, разделив полученное выражение на массу жидкости M и ее удельную теплоемкость c

$$\Delta t=\frac{1}{2}MgH:Mc=\frac{1}{2}\,\frac{gH}{c}.$$

Подставив сюда значение высоты подъема жидкости в тонкой трубке, взятое из учебника физики для IX класса, получим:

$$\Delta t = \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{c} \cdot \frac{2\sigma}{RgD} = \frac{\sigma}{cRD},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, D — ее плотность и R — радиус капиллярной трубки.

Пусть радиус капиллярной трубки равен 1 *мм* = $=0{,}001$ *м*, а жидкостью является вода, для которой удельная теплоемкость составляет $4{,}19 \frac{кдж}{кг \cdot град}$, коэффициент поверхностного натяжения равен $0{,}07 \frac{н}{м}$ и плотность равна $10^3 \frac{кг}{м^3}$. Тогда

$$\Delta t = \frac{0{,}07 \frac{н}{м}}{4190 \frac{дж}{кг \cdot град} \cdot 10^{-3}\ м \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}} \approx 17 \cdot 10^{-6}\ град!$$

Фактически же понижение температуры будет еще меньше, так как работа совершается за счет убыли внутренней энергии всей жидкости, а не только ее части, вошедшей в капилляр.

Разумеется, возникающая разность температур между жидкостью и окружающей средой затем исчезает, что еще больше затрудняет ее обнаружение.

Следует добавить, что при вычислении возникающей разности температур следовало бы брать адиабатический (см. решение задачи № 60) коэффициент поверхностного натяжения, так как подъем жидкости по трубке происходит довольно быстро. Однако учащимся это понятие незнакомо, а ошибка не так уж велика, чтобы существенно повлиять на конечный вывод.

64

Раствор сахара в воде имеет бóльший коэффициент поверхностного натяжения (бóльшую удельную поверхностную энергию), чем чистая вода. Вследствие этого поверхность, занимаемая раствором сахара, стремится сократиться, увлекая за собой спички к кусочку сахара. При растворении мыла натяжение воды уменьшается, поверхность, занятая мыльным раствором, увеличивается, и спички уходят вслед за границей с чистой водой к краям тарелки.

65

Совершенно однородная нить действительно не оборвалась бы. При нагрузке, превышающей предел упругости материала нити, она начала бы «течь», равномерно утончаясь по всей длине.

В какой-то мере таким образом ведут себя аморфные (не имеющие упорядоченной структуры в расположении атомов) тела. Характерным примером поведения аморфных тел под влиянием нагрузки может служить растяжение капли сиропа. Однако из факта ее «бесконечного» растяжения (фактически и для идеального аморфного тела должен наступить разрыв, хотя бы после того как нить станет толщиной в атом) никак не следует, безусловно, ее бесконечная прочность.

Кристаллические тела никогда не бывают совершенно однородными. Этому прежде всего препятствует атомное строение. Даже в весьма совершенных кристаллах существуют местные искажения строгой периодичности в расположении атомов, возникающие при росте кристаллов во время кристаллизации. Эти искажения и являются слабыми местами, с которых начинается разрушение. Чем больше кристаллическое тело, тем труднее избежать искажений. Наоборот, удается получить очень маленькие кристаллики в виде тонких нитей (их принято сейчас называть «усами»), почти совершенно не имеющие дефектов. Такие кристаллы имеют прочность, в сотни и тысячи раз превышающую прочность обычных *. Несомненно, со временем человечество научится получать и достаточно большие бездефектные кристаллы, пригодные для практического использования.

Существенно снижают прочность кристаллических тел также и микротрещины на поверхности. Удаляя поверх-

* См., например, статьи в журнале «Юный техник» «Сверхпрочный металл без дислокаций» (1959, № 5, стр. 22) и «Борода на металлах» (1959, № 7, стр. 28).

ностный слой с кристалла каменной соли путем ее растворения в обычной воде, академику А. Ф. Иоффе (1880—1960 гг.) удалось повысить прочность кристаллов в сотни раз.

66

Ответить на поставленный вопрос поможет несложный опыт. Возьмем железную или медную проволоку диаметром 1—2 *мм* и сильно нагреем ее в печи. После отжига проволока станет очень податливой — ее легко согнуть, свить в кольцо. Однако если перегибать проволоку из стороны в сторону несколько раз, то с каждым разом проволока будет становиться все более неподатливой. Это явление упрочнения материалов под действием нагрузки называется н а к л е п о м. Упрочнение такого типа можно объяснить взаимной компенсацией дефектов различного типа, имевшихся в кристаллической решетке. Теория этого вопроса сложна и не может быть здесь изложена достаточно строго *.

В процессе волочения происходит наклеп, в результате которого проволока, прошедшая волочильный глазок, упрочняется. Если волочение производится многократно, проволоку перед каждым последующим волочением отжигают, чтобы облегчить процесс.

67

При любой температуре внутри жидкости имеются как более быстрые, так и более медленные молекулы. Испарение происходит за счет ухода из жидкости более быстрых молекул, обладающих энергиями, достаточными для преодоления сил сцепления с остальной частью жидкости. С уходом быстрых молекул средняя скорость оставшихся уменьшается; уменьшается также и средняя температура жидкости, которая, как об этом впервые догадался М. В. Ломоносов (1711—1765 гг.), определяется средней скоростью молекул. После этого температуры перестают быть равными и становится возможным теплообмен.

---

* См. книгу И. А. Одинга «Теория дислокаций в металлах и ее применение», изд. АН СССР, 1959.

68

Хотя студентка и робела (ведь среди экзаменаторов был сам великий Э. Ферми), она все же сообразила и ответила правильно:

«Когда жарят, кипит не масло, а вода, содержащаяся в пище».

И действительно, пока не выкипит вся вода, температура не поднимется выше 100°С. По этой же причине можно вскипятить воду в бумажной воронке.

69

С уменьшением давления вода действительно закипает при более низкой температуре. Поэтому на горах, где атмосферное давление меньше, чем на уровне моря, кипяток может иметь температуру 80°С, например, и даже ниже, так как понижение точки кипения воды составляет примерно 3° на каждый километр подъема. С этим явлением хорошо знакомы альпинисты, использующие его для определения достигнутой высоты.

Но ведь важен не сам факт кипения, а т е м п е р а т у р а кипятка. Кому, в самом деле, нужен «кипяток» с температурой, например, 60°С?! В таком «кипятке» не разварится мясо или рыба, он не пригоден для стерилизации медицинских инструментов, даже не всякий любитель удовлетворится чаем такой температуры!

Начальник 4-й Советской антарктической экспедиции А. Г. Дралкин рассказывал, что во время перехода по трассе Мирный — Южный географический полюс — станция «Восток» гусеничным вездеходам «Харьковчанка» приходилось подниматься на высоту 3500 *м* и более. В этих условиях практически невозможно было варить пищу, так как из-за низкого атмосферного давления вода начинала кипеть уже примерно при 55—60° и, чтобы, например, сварить мясо, приходилось тратить шесть-семь часов. В дальнейшем полярники установили на вездеходах электрокамбузы с автоклавом *.

---

* Чтобы согласовать приведенные цифры, следует иметь в виду, что Антарктика расположена в области пониженного атмосферного давления. Такие области в метеорологии принято называть атмосферными депрессиями.

70

Как мы уже говорили об этом в предыдушей задаче, температура кипения воды зависит от давления. При сорока атмосферах, в частности, точка кипения воды составляет 249,3°С. В то же время температура плавления олова при этом давлении практически не отличается от 232°С — температуры плавления при нормальном атмосферном давлении. Таким образом, в воде, находящейся при давлении 40 атмосфер, действительно можно расплавить олово.

Можно и обжечься куском льда. Как показали опыты Таммана и Бриджмена, при повышенном давлении структура обычного льда меняется — он переходит в новые кристаллические модификации. Тамман обнаружил существование трех видов льда — лед II, III и IV (знакомый нам обычный лед — это лед I). Исследования Бриджмена позволили обнаружить еще две модификации — лед V и лед VI. При давлении 20 000 атмосфер последний остается твердым даже при температуре 75°С выше нуля. А если повысить давление, лед VI может существовать при еще более высоких температурах. Таким льдом вполне можно обжечь руки.

71

Расчеты изобретателя неверны, так как 100%-ная экономия топлива означала бы возможность осуществления вечного двигателя.

Применение всех трех усовершенствований вместе сулит, безусловно, бо́льшую экономию, чем каждое изобретение в отдельности, но, конечно, не 100%.

Для простоты подсчета положим, что до применения изобретений установка потребляла 100 *кг* топлива в час. После применения первого изобретения расход топлива сократился до 70 *кг* в час.

Второе усовершенствование позволяет экономить еще 25%, но уже от 70 *кг*! Таким образом, после применения двух изобретений одновременно расход топлива составит 52,5 *кг/час*. Наконец, третье изобретение, экономящее еще 45% топлива, позволит снизить его расход до 28,9 *кг/час*.

Окончательная величина не зависит от того, в какой последовательности производился расчет. Во всех случаях экономия составляет около 71,1%.

Наряду с законом сохранения энергии термодинамикой—отделом физики, изучающим связь и взаимопревращение различных видов энергии, теплоты и работы,— установлен еще один закон, содержание которого можно выразить следующим образом: природа устроена так, что во всякой тепловой машине наряду с «нагревателем» непременно должен быть «холодильник». Так, например, в паровозе нагревателем является топка котла, а холодильником служит атмосфера.

Воды океана можно рассматривать как гигантский нагреватель. Но для тепловой установки, использующей его энергетические ресурсы, требуется такой же исполинский холодильник, которого мы не в состоянии предложить.

Для работы тепловых машин любого типа необходимо наличие разности температур. Этого требует так называемый второй закон термодинамики (первым является закон сохранения энергии).

Второй закон термодинамики имеет большое значение в жизни природы. Подчеркивая его важность, английский астрофизик Р. Эмден писал: «В гигантской фабрике естественных процессов принцип энтропии (второй закон термодинамики.— *В. Л.*) занимает место директора, который предписывает вид и течение сделок. Закон сохранения энергии играет лишь роль бухгалтера, который приводит в равновесие дебет и кредит» *.

Постройка машины, использующей тепло океанских вод, не противоречит первому началу термодинамики, но противоречит второму.

Отметим, что машины, основанные на эксплуатации разности температур поверхностных и глубинных вод океана, вполне осуществимы, но их коэффициент полезного действия, как это вытекает из формулы

$$\text{к. п. д.} = \frac{T_{\text{нагрев}} - T_{\text{холод}}}{T_{\text{нагрев}}}$$

* Цитируется по книге А. Зоммерфельда «Термодинамика и статистическая физика», ИЛ, 1955, стр. 60.

(относительно этой формулы см. текст задачи № 73), оказывается довольно малым — тем меньше, чем меньше разность температур «нагревателя» и «холодильника». Если температура поверхностных слоев воды равна 27°C, а глубинных 2°C, то коэффициент полезного действия будет во всяком случае не более 8,3%. Использовать разность температур легко в так называемых термоэлектрических батареях. Можно надеяться, что в будущем, когда их производство станет обходиться значительно дешевле, мощные термоэлектрические станции, установленные в океане, будут вносить заметный вклад в энергетический баланс нашей страны.

73

Отношение

$$\frac{T_{\text{нагрев}} - T_{\text{холод}}}{T_{\text{нагрев}}},$$

представляющее ту часть энергии сгоревшего топлива, которая может быть переведена тепловой машиной в работу в наиболее благоприятном случае отсутствия бесполезных потерь (к.п.д. идеальной тепловой машины), зимой действительно возрастает. Однако в это время года масло в двигателе, коробке передач, дифференциале заднего моста и т. д. становится настолько густым, что, хотя применяются специальные зимние сорта с пониженной вязкостью, потери на трение сильно возрастают, и реальный к.п.д. оказывается меньше летнего. Кроме того, зимой приходится тратить много бензина на разогревание холодного двигателя при запуске. По этим причинам расход бензина зимой больше, чем летом.

74

Парадокс Максвелла удалось разрешить сравнительно недавно. Мы молчаливо предполагали, что устройство, сортирующее молекулы по скоростям, работает либо вообще без затраты энергии, либо потребляет ее в ничтожных количествах. Между тем для работы «демона» необходима энергия. «Демон», в частности, должен «видеть» молекулы, а для этого их нужно освещать, что требует затраты энергии.

Точные расчеты, произведенные французским ученым Л. Бриллюэном, показали, что даже в наиболее благоприятном случае отсутствия бесполезных потерь на трение и т. п. после первой сортировки молекул по скоростям в устройстве накапливается энергия в количестве, как раз достаточном для приведения в действие «демона» еще раз. Таким образом, в лучшем случае, «демон» сможет приводить в действие лишь самого себя, а об использовании всего устройства в качестве двигателя не может быть и речи!

III ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

75

Чтобы в электрической цепи существовал ток, она должна быть замкнутой и должны существовать какие-то причины, приводящие в направленное движение носители тока — электроны или иные заряженные частицы. Чаще всего таковой является наличие разности потенциалов между различными точками цепи *.

Отсутствие тока в ответвлении *A1B* свидетельствует о равенстве потенциалов точек *A* и *B*. Положение не изменится и после того, как к этим точкам будет присоединен проводник *A2B*, в котором ток также будет отсутствовать по тем же причинам.

Иначе обстоит дело во втором случае. Между точками *C* и *D* существует разность потенциалов, равная электродвижущей силе каждого элемента, поскольку параллельные элементы можно рассматривать как один элемент с электродами вдвое больших размеров. Однако пока к электродам батареи не присоединен проводник *C3D*, цепь не замкнута и ток между точками *C* и *D* поэтому отсутствует. Можно сказать, что до подключения проводника *C3D* имеется лишь внутренняя часть цепи — батарея, тогда как внешней нет.

* Могут быть и другие причины, вызывающие перемещение зарядов. Подробнее об этом говорится в решении задачи № 87.

76

Это скорее математический, чем физический софизм.

По условию и смыслу задачи

$$I_0 = I_1 + I_2.$$

Поэтому

$$I_0 - I_1 - I_2 = I_0 - (I_1 + I_2) = 0,$$

а на ноль, как известно, сокращение производить нельзя.

Отсюда следует, что, производя в физических задачах преобразования, не следует забывать математических правил.

77

На аккумуляторе обозначен максимально допустимый при нормальной эксплуатации ток. Фактически при перегрузках можно получать значительно больше. Нужно лишь иметь в виду, что при перегрузках происходит разрушение пластин аккумулятора, в результате чего он может быстро выйти из строя. Особенно чувствительны к перегрузкам свинцовые аккумуляторы обычного типа. В так называемых стартерных аккумуляторах, устанавливаемых на автомашинах, предпринимаются специальные меры, чтобы при запуске двигателя можно было на короткий срок получать токи силой в сотни ампер, не опасаясь за сохранность пластин. Щелочные аккумуляторы меньше боятся перегрузок, так как обладают значительным внутренним сопротивлением, ограничивающим ток.

78

Ток, протекающий по лампочке во время измерения ее сопротивления омметром, слишком мал, чтобы заметно изменить температуру ее нити, и можно считать, что измеряется сопротивление холодной нити.

Когда сопротивление определяется подсчетом, в формулу подставляется значение мощности, соответствующее рабочему току, раскаляющему нить добела. При увеличении же температуры сопротивление нити возрастает по закону

$$R_t = R_0(1 + \alpha t).$$

Подставляя сюда сопротивление холодной и горячей нити, а также температурный коэффициент сопротивления α вольфрама, равный 0,0046 *град*$^{-1}$, можно определить температуру накала нити:

$$t = \frac{484\ \textit{ом} - 35\ \textit{ом}}{35\ \textit{ом} \cdot 0{,}0046\ \textit{град}^{-1}} = 2800°\mathrm{C},$$

то есть весьма близкое к истинному значение.

По изменению сопротивления проводника можно судить об изменении температуры, что положено в основу устройства так называемых термометров сопротивления.

Полезно указать, что особенно сильно зависит от температуры электропроводность полупроводников, сопротивление которых при повышении температуры быстро уменьшается. Поэтому наиболее чувствительные термосопротивления — болометры, улавливающие тепло от зажженной спички на расстоянии в несколько километров, изготавливаются из полупроводниковых материалов. Зависимость сопротивления от температуры слабее в металлах и еще меньше в сплавах металлов между собой. Сопротивление константана, состоящего из меди, никеля и марганца, практически не меняется при нагревании и охлаждении, что очень важно при постройке особо точных электротехнических приборов.

79

Разность потенциалов на концах некоторого участка цепи равна произведению силы тока, текущего по участку, на его сопротивление только в том случае, когда участок не содержит источников тока (электродвижущих сил). В противном случае для вычисления разности потенциалов следует пользоваться формулой

$$\varphi_A - \varphi_B = IR - E,$$

где φ_A и φ_B — потенциалы соответственно начальной и конечной точек участка цепи, R — его сопротивление, I — сила тока, текущего по нему, и E — величина электродвижущей силы, имеющейся на участке. Для правильного применения этой формулы следует I брать со знаком «плюс», если ток направлен от A к B, и со знаком «минус» в противоположном случае. В свою очередь электродвижущую силу E надо считать положительной, если она заставляет положительные заряды двигаться от A к B, и отрицательной, если электродвижущая сила направляет их от B к A. (Иными словами говоря, «дополнительную» э.д.с. берут со знаком плюс, если она «помогает» току перемещаться от точки A к точке B, и со знаком минус — в противном случае.)

В нашем случае «дополнительную» э.д.с. следует брать со знаком плюс, так как правый элемент посылает ток в том же направлении, что и левый, и наоборот. Учитывая это, имеем:

$$\varphi_A - \varphi_B = IR - (+E) = \frac{2E}{2R} \cdot R - E = E - E = 0.$$

Следует иметь в виду, что формула, приведенная в начале решения настоящей задачи, в сущности уже знакома учащимся.

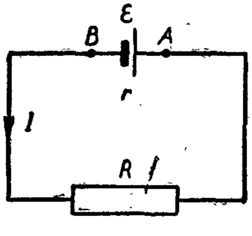

Рис. 42.

В самом деле, из закона Ома для полной цепи (см. рис. 42), имеем:

$$I = \frac{E}{R+r},$$

где E — э.д.с. элемента, R — сопротивление внешнего участка цепи, r — внутреннее сопротивление элемента и I — сила тока в цепи. Перепишем равенство в таком виде:

$$IR = E - Ir.$$

В этом равенстве все величины и их произведения положительны. Поэтому правую часть равенства надо приравнять на основании закона Ома для участка цепи BRA разности потенциалов $\varphi_B - \varphi_A$ (а не $\varphi_A - \varphi_B$), так как потенциал точки B больше потенциала точки A. Таким образом, имеем:

$$\varphi_B - \varphi_A = E - Ir.$$

Откуда

$$\varphi_A - \varphi_B = Ir - E,$$

что и представляет приведенную вначале формулу в применении к участку ArB, содержащему э.д.с., равную E.

80

Холодной пайкой монтеры называют простую скрутку проводников. Сопротивление холодной пайки велико, так как контакт получается плохим и обладает большим сопротивлением. Поэтому, в согласии с законом Джоуля—Ленца ($Q = I^2Rt$), при прохождении сильных токов холодная пайка нагревается значительно сильнее, чем остальная часть проводки.

Горячая (обычная) пайка, выполненная паяльником, обеспечивает надежный контакт с небольшим сопротивлением и поэтому мало греется проходящим по ней током.

81

Действительно, чем больше R, тем коэффициент использования электроэнергии больше. Он достигает значения, равного единице, при «бесконечно большом» сопротивлении потребителя — случай, конечно, не осуществимый практически, но приблизиться к которому можно сколь угодно близко.

Однако делать сопротивление подключенного к источнику тока потребителя слишком большим нецелесообразно. При этом, правда, возрастает напряжение на нем, но больше э.д.с. источника тока оно стать не может, тогда как сила тока при неограниченном увеличении R уменьшается также неограниченно. Таким образом, в формуле для мощности

$$N = IU$$

первый сомножитель при неограниченном росте сопротивления потребителя стремится к нулю, а второй не превышает некоторого конечного значения. Легко видеть, что забираемая от источника тока мощность будет в результате стремиться к нулю.

Не следует также брать потребитель и со слишком малым сопротивлением, так как в приведенной выше формуле мощности первый сомножитель не сможет стать больше $\frac{E}{r}$ (такой ток потечет при коротком замыкании, когда сопротивление потребителя равно нулю), тогда как напряжение на нагрузке при неограниченном уменьшении ее сопротивления будет стремиться к нулю.

Можно показать, что максимальное значение потребляемой мощности достигается при равенстве сопротивлений источника тока и нагрузки, подключенной к нему. В самом деле, запишем выражение для мощности, потребляемой внешним участком цепи, в следующем виде:

$$N = \frac{E^2}{(R+r)^2} \cdot R,$$

где буквенные обозначения те же, что были нами приняты ранее.

Помножим числитель и знаменатель на $4r$. Тогда

$$N = \frac{E^2 \cdot 4Rr}{4r(R+r)^2}.$$

Воспользовавшись тождеством $4Rr = (R+r)^2 - (R-r)^2$, получим после несложных преобразований

$$N = \frac{E^2}{4r}\left[1 - \frac{(R-r)^2}{(R+r)^2}\right].$$

Отсюда сразу видно, что $N=0$ при $R=0$ и $R=\infty$, а при $R=r$ мощность достигает максимума (поскольку и числитель и знаменатель дроби в квадратных скобках положительны, ее наименьшее значение равно нулю, что достигается при $R=r$).

Еще проще доказательство провести с помощью численного примера.

Пусть в нашем распоряжении имеется источник тока с электродвижущей силой 4 *в* и внутренним сопротивлением 1 *ом*. Тогда при различных значениях нагрузочного сопротивления мы будем получать следующие значения мощности, потребляемой от источника тока нагрузкой:

Величина нагрузочного сопротивления, *ом*	Мощность, потребляемая нагрузочным сопротивлением, *вт*
0,7	3,87
0,8	3,95
0,9	3,98
1,0	4,00
1,1	3,99
1,2	3,96
1,3	3,92

В связи с решением этой задачи полезно остановиться на роли выходных трансформаторов в радиоприемниках. Внутреннее сопротивление выходных ламп, приводящих в действие динамик, очень велико. Оно составляет десятки и сотни тысяч ом. В то же время катушка электродинамического громкоговорителя имеет сопротивление всего 5—10 *ом*, так как более высокоомные динамики изготовить технически очень трудно. Включив низкоомный динамик непосредственно в анодную цепь лампы, можно получить лишь небольшую звуковую мощность. Поэтому между лампой и динамиком в схеме предусматривается согласующий выходной трансформатор с высокоомной первичной катушкой и низкоомной вторичной. Его включение полезно также и потому, что в этом случае через динамик будет течь только переменная составляющая анодного тока.

82

Оба полученных ответа правильны. Но это, конечно, вовсе не означает, что через прибор текут два различных тока одновременно. Возможно, оказывается, создать две сильно различающиеся электрические цепи, каждая из которых удовлетворяет приведенным в тексте задачи требованиям. Рассчитаем эти цепи.

По двум полученным значениям силы тока и величине дополнительного сопротивления можно найти два значения напряжения на нем:

$$U'_{\text{сопр}} = 0{,}5a \cdot 40\ \textit{ом} = 20\ \textit{в} \text{ и}$$

$$U''_{\text{сопр}} = 2{,}5a \cdot 40\ \textit{ом} = 100\ \textit{в}.$$

Аналогичным образом можно получить два значения напряжения на приборе:

$$U'_{\text{приб}} = \frac{50\ \textit{вт}}{0{,}5\ a} = 100\ \textit{в} \text{ и } U''_{\text{приб}} = \frac{50\ \textit{вт}}{2{,}5\ a} = 20\ \textit{в}$$

и два значения сопротивления прибора r:

$$r' = \frac{120\ \textit{в}}{0{,}5\ a} - 40\ \textit{ом} = 200\ \textit{ом} \text{ и } r'' = \frac{120\ \textit{в}}{2{,}5\ a} - 40\ \textit{ом} = 8\ \textit{ом}.$$

Задача не содержит никаких данных, которые дали бы нам достаточные основания предпочесть первое решение второму или наоборот. Правда, если мы рассчитаем для обоих случаев мощность, потребляемую дополнительным сопротивлением

$$N' = (0{,}5a)^2 \cdot 40\ \textit{ом} = 10\ \textit{вт} \text{ и } N'' = (2{,}5a)^2 \cdot 40\ \textit{ом} = 250\ \textit{вт},$$

и сравним ее с мощностью включенного прибора (50 *вт*), то второй вариант решения нам покажется мало вероятным, однако уверенности в том, что цепь такого типа кому-то не понадобится, у нас не будет.

Следовательно, нам придется считать правильными оба решения. Если мы хотим все же иметь только о д н о решение, необходимо потребовать от составителей задачи ввести в текст еще какое-либо данное, например мощность, потребляемую дополнительным сопротивлением.

Отметим, что в нашем сборнике уже встречались задачи, сводящиеся к решению квадратного уравнения и имеющие, следовательно, два решения (см. задачу № 6 из раздела «Механика»).

83

И эта попытка найти процессы, противоречащие закону сохранения энергии, обречена на неудачу, как и все предыдущие.

При зарядке конденсатора C_1 энергия электрического тока частично затрачивается на нагревание проводников

(Джоулево тепло), частично же излучается в окружающее пространство в форме электромагнитных волн. Замечательно здесь только то, что при $C_1 = C_2$ «потери» энергии, независимо от сопротивления соединительных проводников, составляют при перезарядке всегда 50%. Если $C_1 \ll C_2$, рассеяние практически отсутствует, а при $C_1 \gg C_2$ оно равно 100%.

84

На сторонах стеклянной пластинки, обращенных к обкладкам конденсатора, образуются вследствие поляризации диэлектрика связанные с ним заряды, противоположные по знаку зарядам на обкладках. При удалении стекла экспериментатору приходится совершать работу по преодолению сил кулоновского притяжения разноименных зарядов. Эта работа идет на увеличение энергии конденсатора.

85

Получившаяся система не будет обладать магнитными свойствами, так как вследствие полной симметрии через каждую точку составленного шара и окружающего пространства будет проходить равное число магнитных силовых линий противоположных направлений. Иными словами говоря, «магнит» моментально сам себя размагнитит. Это, конечно, вовсе не означает невозможности шарообразного магнита; важно лишь, чтобы на его поверхности обязательно были разноименные полюса. Можно, например, намагнитить шар так, что у него на поверхности окажутся два северных и один южный полюс или наоборот. В связи с обсуждением возможности намагнитить шар уместно напомнить учащимся о шарообразности Земли, являющейся гигантским магнитом.

Интересные снимки приводит в своей статье «О многополюсном намагничении», опубликованной в № 2 журнала «Физика в школе» за 1955 г., А. И. Птушко. Эти снимки полезно показать учащимся. Еще лучше попытаться получить аналогичные снимки самостоятельно.

86

По мере сближения магнита и железа энергия системы постоянный магнит — железный предмет уменьшается ровно на величину работы, произведенной против сил тяготения. Чтобы восстановить первоначальное ее значение, нужно удалить железо от магнита. Совершенно очевидно, что для этого необходимо совершить работу, равную работе, совершенной магнитом при подъеме железа.

Таким образом, магнит вполне можно уподобить в этом отношении пружине, поднимающей груз: чтобы пружина могла вторично совершить работу, ее нужно предварительно растянуть, затратив на это энергию.

Подробно вопрос рассмотрен в работе Д. И. Сахарова и С. И. Авксентьева «Постоянные магниты в курсе общей физики», опубликованной в сборнике «Некоторые вопросы преподавания физики в высшей школе», изданном Московским областным педагогическим институтом имени Н. К. Крупской в 1960 г.

87

Этот софизм тесно связан с рассмотренной ранее задачей № 79. Как и там, нелепый вывод получен из-за неправильного применения закона Ома.

Разность потенциалов на концах некоторого участка цепи можно получить, перемножив сопротивление участка и силу тока, протекающего по нему, только в том случае, если на участке не содержится источников электродвижущей силы (батарей, генераторов постоянного тока и т. п.). Такие участки называют однородными.

В рассматриваемом случае любой участок кольца является **неоднородным**, так как индуцируемая электродвижущая сила **равномерно** распределена по всему кольцу.

В соответствии с формулой закона Ома для участка цепи, содержащего э.д.с. (неоднородного участка), мы можем записать для отрезка ARB, считая точку A начальной и B конечной, следующее равенство:

$$\varphi_A - \varphi_B = IR - E_{ARB},$$

где E_{ARB} — э.д.с., индуцируемая на участке ARB.

Если полная э.д.с., существующая в кольце, равна E, то сила тока, текущая по кольцу, может быть найдена из формулы:

$$I = \frac{E}{R+r}.$$

С другой стороны, долю э.д.с., сосредоточенную на каком-либо участке кольца, следует положить прямо пропорциональной длине участка или, при однородном проводнике, его сопротивлению. Тогда для E_{ARB} получим:

$$E_{ARB} = E \cdot \frac{R}{R+r}.$$

Подставляя два последних выражения в первое, находим:

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{E}{R+r} \cdot R - E \cdot \frac{R}{R+r} = 0.$$

К тако́му же выводу можно прийти, применяя закон Ома к участку BrA.

В этом случае

$$\varphi_B - \varphi_A = Ir - E_{BrA}.$$

Сила тока, как и раньше, равна

$$I = \frac{E}{R+r},$$

а для E_{BrA} по высказанным ранее соображениям можно записать:

$$E_{BrA} = E \cdot \frac{r}{R+r}.$$

После этого получаем:

$$\varphi_B - \varphi_A = \frac{E}{R+r} \cdot r - E \cdot \frac{r}{R+r} = 0.$$

Таким образом, ток в электрической цепи может существовать и в том случае, когда разность потенциалов между двумя произвольно взятыми точками цепи равна нулю. В этом в сущности нет ничего удивительного, если вспомнить определение электрического тока: электрическим током называется направленное перемещение электрических зарядов. Но для перемещения зарядов *наличие разности потенциалов совершенно не обязательно*. Электрический ток, например, может быть образован потоком падающих заряженных песчинок или облаком заряженных частиц дыма, которое гонит ветер.

Более того, электрический ток может даже течь *от большего потенциала к меньшему*, как это в действительности имеет место внутри гальванического элемента.

Следующие примеры, принадлежащие А. В. Шубникову (см. № 2 журнала «Физика в школе» за 1957 г.), помогут уяснить изложенное выше.

Вода в реке движется под действием «разности потенциалов», однако в стакане чая при помешивании ложечкой вода движется, хотя «разности потенциалов» нет. Наконец, при выкачивании воды из колодца насосом ее частицы движутся в направлении противоположном «разности потенциалов» — весу воды.

В связи с настоящим софизмом рекомендуем ознакомиться со статьей Е. И. Минченкова «Тема «Постоянный электрический ток» в X классе». Эта статья опубликована в № 4 журнала «Физика в школе» за 1955 г.

88

Магнитный поток в сердечнике трансформатора создается током не только в первичной обмотке, но также и током, проходящим по вторичной катушке. В соответствии с правилом Ленца направления магнитных потоков противоположны (они сдвинуты по фазе на угол почти равный 180°), так что результирующий магнитный поток в сердечнике в идеальном случае вообще должен бы равняться нулю. При увеличении нагрузки на трансформатор растет ток в первичной обмотке и создаваемый им магнитный поток. Одновременно возрастает ток во вторичной обмотке и «вторичный» магнитный поток, создаваемый им. При этом суммарный магнитный поток меняется в прежних пределах, а следовательно, остается неизменной электродвижущая сила переменного тока, индуцируемого во вторичной обмотке.

89

В цепи переменного тока на концах любого участка цепи напряжение меняется по абсолютной величине 100 раз в секунду от нуля до некоторого максимального значения, называемого амплитудным. Вольтметр электромагнитной системы, включенный параллельно этому участку, покажет некоторое промежуточное напряжение, называемое действующим или эффективным. Амплитудное напряжение в $\sqrt{2}=1,41...$ раз превышает действующее. Если, например, вольтметр электромагнитной системы показывает 50 *в*, это означает, что в отдельные моменты времени напряжение достигает $50 \cdot 1,41...$, то есть около 70 *в*, при котором зажигается лампа на постоянном токе. Поэтому никакого противоречия в опытах нет.

Этот простой и легко осуществимый в школьных условиях эксперимент полезно показать на уроке — он сильно облегчит учащимся понимание соотношения между эффективным и амплитудным напряжением в цепи переменного тока.

90

Чтобы ответить на поставленный вопрос, следует вспомнить устройство амперметров обеих систем.

В приборах магнитоэлектрической системы подвижная рамка, по которой течет измеряемый ток, находится между полюсами постоянного магнита. Отклонение рамки в этих условиях пропорционально силе тока. Если ток достаточно быстро меняется по величине, то отклонение стрелки прибора будет определяться средним значением протекающего по прибору тока.

В приборах электродинамической системы измеряемый ток проходит вначале через неподвижную катушку, создающую магнитное поле, а затем через рамку. Таким образом, отклонение стрелки будет пропорционально току как в первой, так и во второй катушке, то есть квадрату силы тока, поскольку ток один и тот же в обеих катушках. В случае меняющегося по величине тока отклонения стрелки амперметра этого типа будут пропорциональны среднему квадрату тока.

Показывая в цепи постоянного тока одно и то же, амперметры будут, естественно, давать в цепи, где циркулирует пульсирующий ток, различные показания. Методами высшей математики можно показать, что они будут отличаться в $\pi : 2$ раз.

В самом деле, средняя сила пульсирующего тока может быть вычислена следующим образом:

$$\overline{I} = \frac{\int_{0}^{\frac{T}{2}} I_0 \sin \omega t dt}{T} = \frac{2I_0}{\omega T} = \frac{2I_0}{2\pi} = \frac{I_0}{\pi},$$

где I_0 — амплитудное значение пульсирующего тока, ω — угловая частота технического переменного тока, T — период его изменения. Из полученного выражения видно, что показания амперметра магнитоэлектрической системы в цепи пульсирующего тока с амплитудным значением тока, равным I_0, будет в π раз меньше, чем в том случае, когда он включен в цепь постоянного тока силой I_0 ампер.

Аналогичным образом средний квадрат пульсирующего тока с амплитудным значением I_0 равен

$$\overline{I^2} = \frac{\int_{0}^{\frac{T}{2}} I_0^2 \sin^2 \omega t dt}{T} = \frac{I_0^2 \frac{T}{4}}{T} = \frac{I_0^2}{4}$$

В качестве верхнего предела интегрирования как в первом, так и во втором случае берется $\frac{T}{2}$, поскольку ток через амперметры проходит только в течение одного полупериода.

Из последнего выражения видно, что отклонение стрелки электродинамического прибора уменьшится в

$$\frac{I_0^2}{\overline{I^2}} = 4 \text{ раза}$$

по сравнению с тем случаем, когда он включен в цепь постоянного тока силой I_0 ампер. Но так как шкала приборов этого типа к в а д р а т и ч н а (то есть угол отклонения пропорционален к в а д р а т у величины тока), показания уменьшатся лишь в $\sqrt{4}=2$ раза.

Таким образом, показания магнитоэлектрического и **электродинамического** амперметров, регистрировавших в цепи постоянного тока одну и ту же силу, будут теперь различаться в

$$\frac{\pi}{2} = 1,57 \text{ раза.}$$

Может возникнуть вопрос, показания какого же амперметра следует принимать во внимание, какому амперметру нужно верить? Нетрудно видеть, что это будет зависеть от того, для какой цели применяется амперметр, в какую цепь его хотят включить.

Если, например, необходимо контролировать силу тока, протекающую через гальваническую ванну, питаемую несглаженным током от выпрямителя того или иного типа, следует брать прибор магнитоэлектрической системы, так как масса вещества, выделяющегося при электролизе, как и показания приборов этого типа, зависит от средней величины тока, текущего через ванну (поскольку сила тока входит в законы Фарадея в первой степени).

Если интересуются тепловым эффектом пульсирующего тока, в цепь следует включать амперметр электродинамической системы, поскольку и его показания, и количество выделяемого при прохождении тока тепла зависят от среднего квадрата тока (сила тока в закон Джоуля — Ленца входит во второй степени).

91

Три соединенные параллельно катушки можно рассматривать как одну, намотанную проводником втрое большего сечения. При включении в сеть постоянного тока по такой системе потечет втрое больший ток, поскольку именно во столько раз уменьшается при параллельном соединении сопротивление. Поэтому в сети постоянного тока магнитное поле увеличилось бы в три раза. Иначе обстоит дело при включении параллельных катушек в сеть переменного тока.

Как известно, сопротивление катушки в цепи переменного тока значительно больше, нежели в цепи с постоянным током. В учебнике физики для X класса (А. В. Перышкин, Курс физики, ч. 3, § 99) приведен такой пример. Сопротивление одной из катушек разборного школьного трансформатора на постоянном токе примерно

3,3 *ом*, а в сети переменного тока с частотой 50 *гц* по ней протекает ток, соответствующий сопротивлению 20 *ом*.

Полное сопротивление катушки на переменном токе (его называют также **импедансом**) зависит не только от ее активного сопротивления, вычисляемого по формуле

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s},$$

но также от числа витков в катушке, ее геометрических размеров и частоты переменного тока. Если число витков в катушке велико, то даже при малом активном сопротивлении (катушка намотана очень толстым медным проводом!) импеданс может быть большим.

Присоединив параллельно катушке еще две такие же, лаборант фактически лишь несколько уменьшил активное сопротивление, тогда как индуктивность системы практически не изменилась, поскольку число витков и форма катушки остались прежними. Небольшое изменение активного сопротивления почти не отразилось на импедансе. Поэтому потребляемый из сети ток и магнитное поле внутри катушек также не претерпели заметных изменений.

Полезным же параллельное включение было признано по той причине, что ток, протекающий по каждой катушке, уменьшился втрое, в результате чего уменьшился нагрев каждой из них.

Для объяснения явления можно также привлечь рассмотрение взаимной индукции катушек: поскольку катушки надеты друг на друга, то э.д.с. самоиндукции и взаимоиндукции равны между собой. Это ведет к уменьшению силы тока в каждой катушке в три раза.

92

Перегорел предохранитель, установленный на групповом щитке на фазе *3*, подведенный к нашей квартире.

Почему же в таком случае горела контрольная лампа?

Дело в том, что после внезапного прекращения подачи электроэнергии выключатели никто не трогал и все лампы в квартире остались включенными (чтобы ошибка в рассуждении не сразу бросалась в глаза, на рисунке 25 выключатели, наоборот, показаны в положении «выключено»). Поэтому при включении контрольной лампы между точками *А* и *Б* на нее попадало напряжение с фазы *2* и «нуля», с которым лампа оказалась соединенной через квартирную проводку.

Более внимательный и опытный наблюдатель должен был бы, конечно, сразу обратить внимание, что при описанном способе проверки контрольная лампа при включении ее между точками *А* и *Б* или между *А* и *В* при неисправном предохранителе на фазе *3* должна гореть с некоторым недокалом, поскольку параллельно соединенные лампы в 19-й квартире все же дают некоторое сопротивление. В то же время при исправном предохранителе должен наблюдаться перекал, так как на лампу попадало бы при этом напряжение, в 1,73 раза превышающее нормальное,—220 *в* вместо 127 *в* или 380 *в* вместо 220 *в*.

93

Как уже отмечалось в решении предыдущей задачи, в больших домах питание электроэнергией от сети переменного тока осуществляется по так называемой четырехпроводной системе. Можно предположить, что ток в учебные аудитории № 1 и № 2 подводился по проводке, схема которой должна иметь примерно вид, показанный на рисунке 43.

Из схемы видно, что при выходе из строя предохранителя *А*, установленного на «нулевом» проводе, лампы $Л_1$ и $Л_2$ в первой аудитории не будут гореть, если одновременно во второй аудитории не будет включен какой-нибудь прибор, например плитка *П*. Если же плитка включена, то как на нее, так и на лампы через исправные предохранители *Б* и *В* попадает напряжение с фаз $Ф_1$ и $Ф_2$.

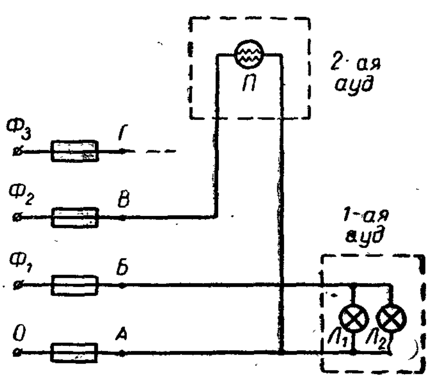

Рис. 43.

Понятно также, почему плитка горела с недокалом, тогда как накал ламп был выше нормального. В самом деле, если напряжение между «нулем» и фазой 127 *в*, то между фазами Φ_1 и Φ_2 оно будет в $\sqrt{3}$ раз больше, то есть 220 *в*. В соответствии с законом Ома это напряжение распределяется между первой и второй аудиториями пропорционально сопротивлению включенных в них приборов. Мощная плитка имеет сравнительно малое сопротивление, тогда как небольшие, видимо, лампы $Л_1$ и $Л_2$, даже будучи включенными параллельно, имеют значительное сопротивление. В результате на плитке существует небольшое напряжение и она горит с недокалом, а лампочки светят ярче нормального, так как напряжение на них выше номинала.

94

Включенный в сеть переменного тока непосредственно вольтметр электромагнитной системы показывает эффективное значение напряжения. Однако, как мы об этом уже говорили в решении задачи № 89, в отдельные моменты времени разность потенциалов при синусоидальном законе изменения достигает максимального своего значения, в $\sqrt{2}=1{,}41...$ раза превышающего эффективное. В эти моменты включенный параллельно вольтметру конденсатор заряжается до разности потенциалов $125 \cdot 1{,}41 \approx 175$ *в*. Именно эту цифру и показывает вольтметр. Роль выпрямляющего устройства сводится лишь к тому, чтобы препятствовать разряду конденсатора при изменении направления тока.

С описанным явлением хорошо знакомы радиолюбители, которые знают, что напряжение после кенотрона (или вообще выпрямителя) сразу же возрастает после включения фильтра, состоящего из дросселя и конденсаторов.

Софизм нетрудно оформить в виде экспериментальной задачи. При этом существенно взять конденсатор большой емкости, порядка нескольких микрофарад, и вольтметр с большим сопротивлением. При малом сопротивлении и небольшой емкости система, как говорят в технике, будет обладать малой постоянной времени, то есть конденсатор будет быстро разряжаться через вольтметр, в результате чего на них будет существовать разность потенциалов меньшая, чем 175 *в*. В особо неблагоприятных случаях показания вольтметра могут быть даже меньше, чем эффективное напряжение в сети, вплоть до

$$\frac{E_0}{2} = \frac{E_{эфф} \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{125 \cdot \sqrt{2}}{2} = 90 \text{ в},$$

где E_0 — амплитудное значение напряжения в сети (сравните с решением задачи № 90).

95

Несмотря на всю наивность софизма, считаем полезным разобрать его с учащимися, чтобы лишний раз подчеркнуть необходимость выполнять над наименованиями те же действия, что и над числами, к которым наименования относятся.

96

Ток и напряжение в приборе, включенном в сеть переменного тока, могут изменяться так, что максимальные и минимальные значения ими будут достигаться одновременно. В этом случае говорят, что ток и напряжение совпадают по фазе. Именно такой случай изображен на рисунке 183 в курсе физики А. В. Перышкина для X класса. Ток и напряжение совпадают по фазе, когда в сеть переменного тока включен прибор, обладающий только активным сопротивлением, например электрическая плитка. В этом случае мощность, потребляемую прибором, можно вычислить по формуле

$$N = I \cdot U, \tag{1}$$

где I и U — эффективные значения тока и напряжения соответственно.

Однако не всегда ток и напряжение совпадают по фазе. Если включить в цепь переменного тока катушку самоиндукции или конденсатор, то максимальные и минимальные значения током и напряжением будут достигаться неодновременно. В этом случае формула мощности приобретает иной вид — в ней появляется третий сомножитель k, называемый коэффициентом мощности:

$$N = k \cdot I \cdot U. \qquad (2)$$

I и U здесь имеют тот же смысл, что и в формуле (1). Множитель k называют часто иначе — «косинус фи». «Фи» — это угол сдвига фаз между током и напряжением.

Обмотки электромотора обладают не только активным сопротивлением, но также и индуктивным. В результате между током, протекающим по обмоткам электромотора, и напряжением, приложенным к нему, возникает сдвиг по фазе. Косинус угла сдвига фаз при нормальном режиме работы равен:

$$k = \frac{N}{IU} = \frac{900\ \text{вт}}{220\ \text{в} \cdot 5\ \text{а}} = 0{,}82.$$

Обычно значение «косинуса фи», соответствующее оптимальному режиму работы, указывается в паспорте электродвигателя.

97

Прежде всего отметим, что описанный процесс не противоречит закону сохранения энергии, так как зарядка конденсатора происходила бы не «сама собой», а за счет энергии теплового движения электронов. Однако действие изображенной на рисунке 27 установки противоречило бы второму началу термодинамики (см. о нем задачу № 72 второго раздела), поскольку процесс требует самопроизвольного возникновения «сгущений» и «разрежений» электронного облака, а это так же невозможно, как невозможно самопроизвольное разделение электронов или молекул на быстрые и медленные (последнее означало бы самопроизвольное возникновение разности температур).

Следует, впрочем, отметить, что второй закон термодинамики в отличие от первого носит не столь категорический характер; он не совсем отрицает возможность самопроизвольного разделения молекул на быстрые и медленные, или возможность возникновения флуктуаций (местных сгущений и разрежений) плотности. Он лишь утверждает, что такие события маловероятны и вероятность тем меньше, чем больше флуктуации.

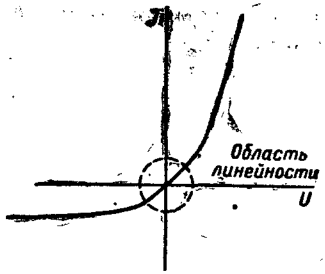

Рис. 44.

Из-за хаотичности движения электронов на концах проводника действительно может возникнуть разность потенциалов. Но возникновение значительного напряжения, как уже отмечено, маловероятно, а при малых — конденсатор будет разряжаться через детектор, так как при малых разностях потенциалов вольт-амперные характеристики всех детекторов линейны, как это показано на рисунке 44, и эффект выпрямления отсутствует. Нелинейность вольт-амперной характеристики, объясняющая эффект выпрямления, обнаруживается лишь при достаточно больших напряжениях, вероятность возникновения которых за счет флуктуации плотности распределения электронов практически равна нулю.

Зарядка конденсатора также невозможна, как невозможно практически (хотя это и мыслимо в принципе), чтобы хаотическое движение молекул воздуха в запаянной консервной банке превратилось в направленное вверх, способное приподнять банку над поверхностью Земли. Расчет показывает, что самопроизвольное «подпрыгивание» банки из-за флуктуации в движении молекул может наблюдаться не чаще, чем раз в миллиарды миллиардов лет.

Хорошо известен научно-фантастический роман А. Р. Беляева «Ариель». Герой романа мог по своему желанию управлять характером движения собственного тела. К сожалению, это, как мы видели, противоречит второму началу термодинамики и возможно лишь на страницах научно-фантастического романа.

Разряд банки носит колебательный характер, так как вместе с намотанной на спицу спиралью она образует, как принято говорить в радиотехнике, к о л е б а т е л ь н ы й к о н т у р. Поскольку проволока обладает сопротивлением и происходит излучение энергии в пространство в виде электромагнитных волн, колебания постепенно затухают. Спица сохраняет намагничение того знака, который соответствует последнему размаху колебаний, настолько еще сильному, что он пробивает искровой промежуток, через который происходил разряд лейденской банки.

IV ОПТИКА И СТРОЕНИЕ АТОМА

99

Как ни заманчив описанный Фламмарионом способ ознакомиться с прошлым нашей планеты, приходится примириться с мыслью, что он никогда не будет осуществлен: как вытекает из теории относительности, созданной трудами гениального немецкого физика А. Эйнштейна, никакое материальное тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в пустоте, то есть примерно 300 000 *км/сек*.

Более того, для тел с «массой покоя», отличной от нуля (а к ним принадлежат электроны, протоны, нейтроны, целые атомы и молекулы, а также построенные из них тела — куски металла, камни и т. д.), даже и эта скорость недостижима. Оказывается, что по мере роста скорости масса разгоняемого тела увеличивается по закону

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

где m_0 — масса покоящегося тела (масса покоя), v — скорость, до которой разогнали тело, m — его масса при этой скорости и c — скорость света в пустоте. Из этой формулы видно, что по мере приближения v к c масса тела увеличивается неограниченно, разгон становится все труднее и практически совершенно невозможен при скоростях, близких к c. Зависимость массы от скорости хорошо известна физикам, изучающим свойства частиц с высокими энергиями. Протоны, разогнанные в советском ускорителе-синхрофазотроне, установленном в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, обладают массой, в 100 раз превышающей массу покоящегося протона.

Существуют, впрочем, и частицы, движущиеся со скоростью света. Это, например, кванты электромагнитного излучения — фотоны. Однако их масса покоя равна нулю! Физически это означает, что фотон остановить нельзя. Он обречен постоянно находиться в движении. Попытка остановить фотон приводит к его гибели. Интересно отметить также, что скорость фотона в вакууме всегда равна 300 000 *км/сек,* независимо от относительного движения наблюдателя и источника фотонов, то есть источника света.

100

Передача тепла от раскаленного металла к человеку происходит главным образом через излучение. Максимум энергии излучения при температуре металла несут инфракрасные лучи, которые, как и вообще электромагнитные волны, очень сильно отражаются металлами. Это и дает ответ на вопрос, зачем металлизируют одежду сталеваров.

101

Как это видно из рисунка 45, независимо от расстояния человека до стены, на которой повешено зеркало, он может рассматривать одну и ту же часть своей фигуры, расположенную не ниже, чем на расстоянии *H* от пола.

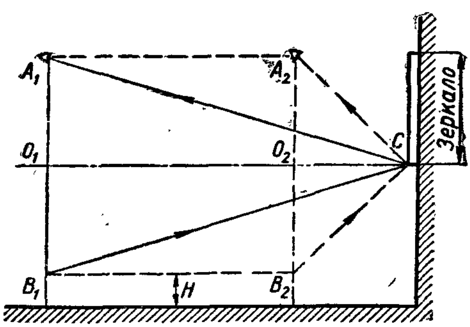

Рис. 45.

102

Мы приняли, что поверхность дождевых капель имеет сферическую форму. Действительно, под действием одних лишь молекулярных сил капля должна была бы быть шарообразной, так как при этом энергия поверхностного натяжения минимальна (см. решение задачи № 64): из всех тел равного объема шар обладает наименьшей возможной поверхностью. Примерно такую форму имела бы капля при падении в безвоздушном пространстве.

Однако сопротивление воздуха приводит к искажению сферичности, и капля приобретает характерную обтекаемую, «каплеобразную» форму. В результате условия отражения в разных точках перестают быть одинаковыми: если в одном месте произойдет полное отражение, то в другом — возможен выход луча наружу.

Нужно отметить, что полного отражения фактически в капле никогда не наблюдается. Часть лучистой энергии в любом случае все же «просачивается» из капли в воздух.

103

Удалим собирающую линзу и поместим на ее место рассеивающую. Тогда ход лучей можно изобразить так, как это сделано на рисунке 46. Из этого рисунка видно, что в кольцевой зоне, ограниченной окружностями с диаметрами $A'B'$ и CM, освещенность на экране создается не только лучами, рассеянными линзой, но и прошедшими

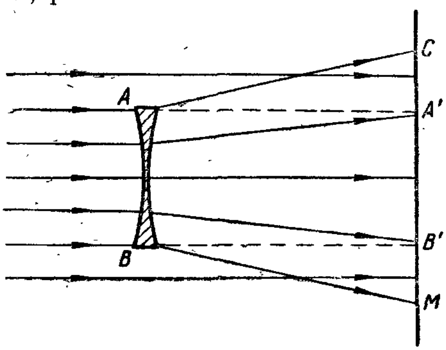

Рис. 46.

мимо нее, а поэтому превышает освещенность, которая создавалась бы на экране без линзы.

Описанное явление легко наблюдать на опыте, вооружившись очками, предназначенными для близоруких,— на листке бумаги, поставленном на пути солнечных лучей после очков, будут ясно видны светлый круг, опоясанный еще более светлой каймой, а затем экран, освещенный только прямыми солнечными лучами. Освещенность в пределах каймы будет максимальной.

104

Негативы обоих снимков будут одинаково плотными, если величина экспозиции останется неизменной. В фотографии под экспозицией понимается величина, характеризующая количество освещения, получаемого светочувствительным слоем материала при съемке. Экспозиция обозначается буквой H и выражается произведением

$$H = E \cdot t, \tag{1}$$

где E — освещенность фотопленки и t — время экспонирования (выдержка).

Освещенность изображения прямо пропорциональна количеству световой энергии W, попадающей через объектив от предмета, и обратно пропорциональна площади изображения s_1:

$$E \sim \frac{W}{s_1}. \tag{2}$$

Если предмет (для определенности удобно рассматривать, например, пуговицу на костюме посетителя фотографии) излучает во все стороны приблизительно равномерно, то количество энергии, попадающее в объектив, прямо пропорционально величине телесного угла θ, под которым из точки, где находится предмет, виден объектив:

$$W \sim \theta. \tag{3}$$

Считая площадь объектива равной s_0 и предмет удаленным от фотоаппарата на a_2, получим (см. рис. 47, левую часть) для телесного угла приблизительно

$$\theta = \frac{s_0}{a_2^2}. \tag{4}$$

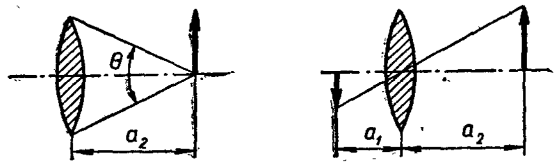

Рис. 47.

Комбинируя три последних выражения, имеем:

$$E \sim \frac{s_0}{s_1 a_2^2}. \tag{5}$$

Но площади предмета s_2 и его изображения s_1 относятся как

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{a_1^2}{a_2^2}, \tag{6}$$

где a_1 — расстояние от объектива до фотопленки (см. правую часть рис. 47).

Подставляя отсюда значение a_2^2 в выражение (5), получим:

$$E \sim \frac{s_0 s_1}{s_1 s_2 a_1^2} = \frac{s_0}{s_2 a_1^2}. \tag{7}$$

Так как s_0 и s_2 — постоянные величины, то

$$E \sim \frac{1}{a_1^2}. \tag{8}$$

Первое и последнее равенство вместе дают, что

$$t \sim a_1^2. \tag{9}$$

Но чем дальше удален фотографируемый объект (то есть чем больше a_2), тем меньше расстояние a_1 от объектива фотоаппарата до пленки, что следует из формулы линзы.

Следовательно, для более удаленного предмета выдержка должна быть меньшей, а для более близкого, наоборот, большей.

105

Если передняя (обращенная к предмету) поверхность роговицы будет плоской, то фокусное расстояние глаза останется неизменным и в воздухе, и в воде, благодаря чему преломление лучей, идущих от достаточно удаленных предметов (то есть параллельных лучей), будет отсутствовать. Таким образом, подобный глаз будет одинаково хорошо видеть удаленные предметы как в воздухе, так и под водой.

106

На каждом кадре кинопленки через равные промежутки времени запечатлены отдельные фазы движения тела.

Свойство человеческого глаза таково, что при быстрой смене одного кадра другим отдельные этапы сливаются, создавая впечатление непрерывного движения.

В звуковом кино смена кадров происходит через каждую $^1/_{24}$ долю секунды. Пусть за это время колесо экипажа, изображенное для удобства рассуждений всего лишь с одной спицей, повернется на столько, что спица из положения $A_1Б_1$ перейдет в положение $A_2Б_2$ (рис. 48). Глаз воспримет это как поворот по часовой стрелке на угол, обозначенный дужкой.

При большой скорости движения за время смены кадров в киносъемочном аппарате колесо может повернуться на значительно бо́льший угол, причем спица займет положение $A'_2Б'_2$, показанное в нижней части рисунка. Поскольку оба конца спицы ничем не отличаются, глаз может «ошибиться» и воспринять вращение на угол $A_1OA'_2$ как поворот на угол $A_1OБ'_2$. В результате вращение колеса будет казаться происходящим против часовой стрелки.

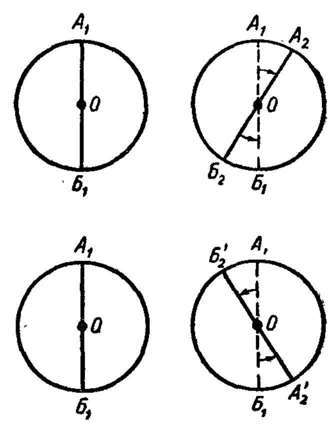

Рис. 48.

Нетрудно видеть, что парадокс возникает при такой частоте съемки, когда за время смены кадров спицы успевают повернуться на угол, превышающий половину угла между ними. Поэтому при одной и той же частоте съемки и одинаковой скорости движения экипажа вращение колес с разным числом спиц может казаться происходящим в противоположных направлениях, как это также приходится иногда наблюдать в кино (только реже) — задние колеса телеги, где спиц больше, вращаются в сторону, противоположную вращению передних.

107

Параллельный пучок лучей, выходящий из окуляра телескопа, становится после прохождения через хрусталик глаза сходящимся, способным образовать на сетчатке изображение предмета.

Важная роль глаза как составной части некоторых оптических систем, в том числе также и микроскопа, лупы, телескопа и т. д., подробно рассмотрена О. Д. Праведниковой в статье, опубликованной в № 1 журнала «Физика в школе» за 1958 г. Этот вопрос освещен также Л. И. Резниковым в работе «Глаз как составная часть оптических инструментов», напечатанной в № 3 того же журнала за 1946 г.

108

В приведенном рассуждении все, кроме окончательного вывода, правильно. Телескопы действительно не дают увеличенного изображения звезд, но тем не менее в сильной степени помогают при астрономических наблюдениях. Бурное развитие астрономии началось лишь после изобретения Галилеем телескопа в 1609 г.

Задача телескопа при наблюдении звезд состоит не в получении увеличенного изображения, а в увеличении светового потока, попадающего в глаз человека от наблюдаемого объекта. При пользовании телескопом поток световой энергии, попадающий на сетчатку, увеличивается во столько раз, во сколько площадь входного отверстия телескопа больше площади зрачка.

В Советском Союзе, как известно, строится телескоп-гигант с диаметром зеркала 6 *м*. Основание площади его зеркала к площади сильно расширенного зрачка составит примерно

$$\frac{s_{\text{тел}}}{s_{\text{зр}}} = \left(\frac{d_{\text{тел}}}{d_{\text{зр}}}\right)^2 = \left(\frac{600\ см}{1\ см}\right)^2 = 360\,000.$$

Таким образом, световой поток, попадающий в глаз наблюдателя, увеличивается в 360 000 раз! Поэтому в телескоп можно видеть и такие светила, которые не видны простым глазом.

109

Идея постройки аппарата, могущего дать «лучевой шнур», приходила в голову многим изобретателям уже с давних пор, но ни одному из них не удалось ее осуществить. И это не случайно! На пути постройки гиперболоида (вообще говоря, аппарат инженера Гарина Алексей Толстой должен был бы назвать параболоидом, так как все сказанное в романе относится не к гиперболическим, а параболическим зеркалам) стоит ряд серьезных трудностей.

Трудно, во-первых, подобрать достаточно тугоплавкий материал для зеркал, которые, отражая мощный пучок лучей, должны и сами нагреваться до высоких температур.

Неясно, во-вторых, каким горючим питать гиперболоид, так как оно при малом объеме должно содержать колоссальное количество энергии, иначе гиперболоид будет совершенно безвредной игрушкой.

Но самая большая неприятность состоит в том, что получение протяженных, то есть распространяющихся на значительные расстояния, узких пучков невозможно из-за волновой природы света. Чем уже стараются получить световой пучок, тем резче проявляется дифракция, приводящая к его размытию. Из-за дифракции нельзя с помощью зеркал, диафрагм, линз и любых других средств геометрической оптики получить сколь угодно узкие волновые пучки, какие хотелось бы иметь инженеру Гарину.

Полное доказательство невозможности получить узкий параллельный пучок лучей, а также ряд очень интересных оптических задач с их подробным разбором можно найти в книге профессора Г. Г. Слюсарева «О возможном и невозможном в оптике», выпущенной вторым изданием в 1957 г. Государственным издательством технико-теоретической литературы. С этой книгой мы настоятельно и рекомендуем познакомиться читателю.

Остается добавить, что все сказанное безусловно справедливо для приборов, в которых используются принципы геометрической оптики. Однако сравнительно недавно советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров создали установки, в которых предварительно возбужденные атомы излучают запасенную ими энергию практически одновременно. (Такие излучатели можно назвать когерентными.) В результате получается очень тонкий, почти не расходящийся пучок лучей. Плотность лучистой энергии в нем так велика, что на расстоянии нескольких метров пучок способен пробить доску. С помощью «квантовых генераторов» (коротко их принято называть лазерами) уже сейчас с поразительной точностью определяются расстояния в геодезии и астрономии, высверливаются тончайшие — диаметром в несколько микрон — отверстия в твердых драгоценных камнях и металлических изделиях, производятся хирургические операции над глазом человека. С каждым днем область применения лазеров расширяется.

За открытие квантовых генераторов Н. Г. Басов и А. М. Прохоров были удостоены Ленинской, а затем вместе с американским ученым Ч. Таунсом Нобелевской премий. В 1964 г. Ленинская премия была присуждена группе советских ученых под руководством члена-корренспондента АН СССР Б. М. Вула и профессоров Д. Н. Наследова и С. М. Рывкина за разработку и внедрение в производство малогабаритных полупроводниковых лазеров.

110

Ощущение того или иного цвета, возникающее в глазу наблюдателя, определяется не длиной волны, зависящей от показателя преломления среды, а частотой электромагнитных колебаний, воздействующих на окончания зрительного нерва. Частота при переходе из одной среды в другую не меняется. Действительно, из

$$n_{1,2}=\frac{c_1}{c_2}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

следует, что

$$\frac{c_1}{\lambda_1}=\frac{c_2}{\lambda_2},$$

то есть отношение $\frac{c}{\lambda}$ остается постоянным. Но это отношение как раз и представляет частоту колебаний.

Поэтому свет, воспринимаемый в воздухе как красный, будет казаться таким же и в воде.

111

Частицы табачного дыма рассеивают падающий на них свет по-разному, в зависимости от длины волны. Сильнее всего рассеиваются лучи с малой длиной волны — фиолетовые, синие, голубые. Длинноволновые лучи, лежащие у другого конца спектра, рассеиваются значительно меньше, так как явление дифракции — огибание светом преград — свойственно для них в данном случае значительно больше. Поэтому в пучке света, прошедшего через облако дыма, преобладают красноватые оттенки. Наоборот, при наблюдении со стороны источника света или сбоку мы видим в основном коротковолновые лучи и дым нам кажется голубоватым.

Зависимость поглощения световых лучей от цвета всегда принимается во внимание на практике: в аварийные и предупреждающие об опасности фонари вставляются красные стекла (красный цвет светофора!), а в целях светомаскировки (во время войны, например) освещение осуществляется синими лампами.

112

Свойство человеческого глаза таково, что при полосах равной ширины синее и белое полотнища кажутся шире красного. При отношении же 30 : 33 : 37 все полосы кажутся одинаковыми. Заметим, впрочем, что сейчас все полосы французского флага разрешено делать одинаковой ширины.

113

Как уже упоминалось в задаче 110, длина волны, соответствующая красному цвету, равна примерно 0,65 *мк*. Зеленому цвету соответствует длина волны около 0,55 *мк*. Таким образом, изменение длины волны вследствие эффекта Допплера должно было бы составить

$$\frac{0{,}55\ мк}{0{,}65\ мк} = 0{,}85.$$

Это означает, что частота электромагнитных колебаний, попадающих в глаз автомобилиста, должна вследствие взаимного сближения его с источником света возрасти в

$$\frac{1}{0{,}85} = 1{,}18\ \text{раза},$$

то есть примерно на 20%. Такое увеличение частоты возможно лишь при космических скоростях. Минимальная скорость, при которой становится заметным эффект Допплера в оптике, должна быть около 500 *м/сек*.

114

Как известно, электроны в атомах могут находиться в разных состояниях, каждому из которых соответствует различная энергия. При переходе электрона из состояния с более высокой энергией в состояние с более низкой «излишек» энергии выделяется в виде электромагнитного излучения. В зависимости от его частоты наблюдатель видит свет того или иного цвета.

В металлах наиболее удаленные от ядра электроны (в химии их называют валентными) за счет тепловой энергии легко переходят в «возбужденное» состояние и так же легко возвращаются в «нормальное», отдавая запасенную энергию в виде света.

Не так обстоит дело в кварце и стекле. Все электроны здесь прочно связаны с ядрами атомов и с большим трудом изменяют свое энергетическое состояние. Чтобы получить заметное свечение, в этом случае нужна значительно более высокая температура.

Сделанный вывод, конечно, неверен, так как если бы радий в результате распада мог исчезнуть, то этот момент наступил бы давным-давно, поскольку со «дня рождения» Земли прошло уже около 10 миллиардов лет, а период полураспада радия «всего» 1590 лет.

В софизме допущен ряд ошибок, из которых самая грубая — утверждение, что через «вторые» 1590 лет распадется оставшаяся половина, тогда как на самом деле распаду подвергнется половина от оставшейся половины. Таким образом, через 3180 лет останется одна четверть первоначального запаса, через 4770 лет — одна восьмая и так далее.

Как видно из приведенных цифр, запасы радия на Земле должны убывать настолько быстро, что, казалось бы, через сравнительно короткий, с геологической точки зрения, разумеется, период его на Земле остаться практически не должно (см. следующую задачу), и наш первоначальный вывод как будто бы не так уже далек от истины?!

Однако радий не только распадается, но и сам является продуктом распада — его запасы на Земле непрерывно пополняются в результате распада радиоактивного элемента тория.

Впрочем, уместно тогда поставить вопрос о возможности постепенного исчезновения на Земле родоначальника «радиоактивного семейства», к которому принадлежат радий и торий,— урана 238. Оно вполне возможно, однако наступит не скоро, ибо период полураспада урана 238 равен четырем с половиной миллиардам лет. Поэтому к настоящему времени на Земле осталось еще около одной четверти первоначального запаса этого элемента.

Что же касается всей Вселенной в целом, то если бы исчезновение радиоактивных элементов, стоящих в конце периодической системы, было возможно, то оно наступило бы уже давно, так как Вселенная существует вечно. Очевидно, где-то в ее недрах происходит процесс рождения тяжелых элементов, о подробностях которого современной науке пока ничего не известно. Можно лишь указать, что вспышки так называемых сверхновых звезд удалось объяснить, предположив, что их причиной является распад одного из изотопов 98-го элемента периодической системы — калифорния, может быть, когда-то и существовавшего на Земле, но целиком исчезнувшего к нашему времени.

116

Приведенный расчет убедительно показывает, какие нелепые выводы можно получить, механически применяя математические формулы, не слишком вникая в суть физического явления, которое они описывают.

Радий — один из членов радиоактивного семейства. В цепочке превращений, следующих друг за другом, он стоит между торием, распад которого порождает радий, и радоном, являющимся продуктом распада радия. Имеющийся сейчас на Земле радий — это вовсе не сохранившиеся еще не распавшимися до настоящего времени остатки колоссального первоначального запаса, вычисленного в задаче!

В настоящее время известны три естественных радиоактивных семейства. Это ряды урана, тория и актиния, названные так по имени «родоначальника» семейства, открывающего цепь радиоактивных превращений. Четвертое семейство, названное именем нептуния, состоит из искусственно полученных изотопов, не встречающихся на Земле.

Родоначальники трех первых семейств существуют в природе до сих пор потому, что период полураспада их очень велик. Он составляет для

урана . . . . . . $4{,}5 \cdot 10^9$ лет,
тория . . . . . . $1{,}4 \cdot 10^{10}$ лет,
актиния . . . . . . $7{,}1 \cdot 10^8$ лет.

Члены же их семейств существуют в природе только благодаря непрерывному образованию в процессе распада других элементов.

Может быть, на Земле при ее образовании было и небольшое количество нептуния (весьма сомнительная с точки зрения ядерной физики возможность), однако период полураспада его, составляющий «всего» $2{,}2 \cdot 10^6$ лет, оказался слишком малым, чтобы нептуний мог сохраниться до наших дней.

117

Рассмотрим газ, находящийся в цилиндре, запертом поршнем. Пока поршень неподвижен, средняя скорость молекул газа v остается постоянной, если, конечно, к газу не подводится тепло, так как соударения молекул со стенками цилиндра и поршнем носят упругий характер, и скорости остаются после соударения прежними.

Однако если поршень вдвигается в цилиндр с некоторой постоянной скоростью u, то молекулы, ударяющиеся о поршень, будут обладать относительно него скоростью $v+u$. С такой же скоростью относительно поршня они отразятся. Но так как поршень движется относительно цилиндра со скоростью u, то скорость молекул относительно цилиндра после отражения окажется равной $u+(u+v)=v+2u$, то есть возрастет на $2u$.

Подобным же образом происходит ускорение заряженных частиц в космическом пространстве. Если протон, летящий от Земли со скоростью v, попадет в скопление межзвездного газа, несущее магнитное поле и движущееся со скоростью u по направлению к Земле, то после «отражения» магнитным полем (см. рис. 49) протон устремится к Земле со скоростью $v+2u$. Правда, протон может попасть в магнитное поле, вектор скорости которого направлен от Земли, и замедлить свое движение, но точный расчет показывает, что движущиеся частицы встречают в единицу времени ускоряющих полей больше, чем замедляющих, в результате чего эффект ускорения преобладает.

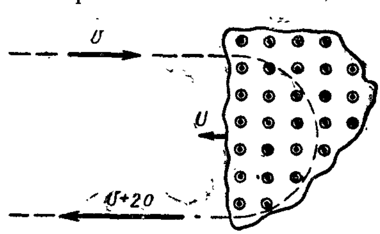

Рис. 49.

118

Ядерные реакции, как и химические, бывают двух типов: с выделением энергии — экзотермические и с поглощением энергии — эндотермические. Первая из написанных в задаче реакций относится к экзотермическим и протекает «сама собой». Что же касается второй, то она является эндотермической,— чтобы вызвать превращение протона в пару частиц — нейтрон и позитрон, ему нужно сообщить колоссальное, по масштабам микромира, количество энергии.

Согласно современным представлениям, вытекающим из теории относительности А. Эйнштейна, увеличение энергии тела сопровождается увеличением его массы. Протон, способный породить пару нейтрон — позитрон, должен иметь массу, превышающую массу протона в «нормальном состоянии» на величину, равную удвоенной массе электрона (или позитрона, так как массы этих двух частиц в точности равны). Поэтому закон сохранения массы в ядерных реакциях остается справедливым. Также всегда справедлив в этих случаях закон сохранения заряда, что можно видеть на примере приведенных реакций.

119

Уже в решении предыдущей задачи мы говорили, что теория относительности установила взаимосвязь между массой и энергией. Изменению массы системы на ΔM соответствует, оказывается, изменение энергии на

$$\Delta W = \Delta M \cdot c^2,$$

где c — скорость света в пустоте.

Уменьшение энергии системы сопровождается уменьшением ее массы, и, наоборот, увеличение энергии приводит к росту массы.

В нашем случае масса ядра O^{16} на $0{,}242 \cdot 10^{-27}$ *кг* меньше суммы масс восьми протонов и восьми нейтронов. Это означает, что при образовании ядра из этих частиц должна выделяться энергия

$$\Delta W = 0{,}242 \cdot 10^{-27}\ кг \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{м}{сек}\right)^2 = 2{,}178 \cdot 10^{-11}\ дж.$$

Это огромная, по масштабам микромира, величина, так как в пересчете на образование из нейтронов и протонов одного килограмм-атома изотопа кислорода O^{16} получается энергия $13{,}118 \cdot 10^{15}$ *дж*, то есть столько же энергии, сколько выделяется при сжигании 300 000 *т* бензина!

При учете «дефекта массы», соответствующего выделяемой при образовании ядра энергии, масса остается аддитивной.

Почему же нам не приходится сталкиваться с кажущейся неаддитивностью массы в обыденной жизни? Потому, что энергия, которую приобретают или отдают тела, чаще всего слишком мала, чтобы вызвать заметное изменение массы.

Пусть, например, один кубический метр воды нагрет от 0°С до 100°С. При этом энергия воды увеличится на

$$\Delta W = 4{,}19\,\frac{\textit{кдж}}{\textit{кг}\cdot\textit{град}}\cdot 1000\ \textit{кг}\cdot 100\ \textit{град} = 4{,}19\cdot 10^{8}\ \textit{дж}.$$

Однако увеличение массы составит всего

$$\Delta M = \frac{4{,}19\cdot 10^{8}\ \textit{дж}}{9\cdot 10^{16}\ \textit{м}^2/\textit{сек}^2} = 0{,}52\cdot 10^{-8}\ \textit{кг} = 0{,}0052\ \textit{мг},$$

то есть $0{,}52\cdot 10^{-6}\%$!

Заметить такое изменение практически невозможно!

Работа атомного реактора, конечно, не может противоречить закону сохранения энергии. Следовательно, общий запас атомной (точнее, ядерной) энергии в результате работы реактора уменьшается. Однако следует отличать общее количество энергии от доступного для практического использования. Оказывается, в результате работы ядерных реакторов в некоторых из них (это так называемые реакторы-размножители) атомы «сжигаемого» ядерного топлива вновь превращаются в ядерное топливо, причем количество воспроизводимого превосходит количество сжигаемого.

В одном из типов реактора-размножителя воспроизводимое и сжигаемое топливо представляют собой изотопы одного и того же химического элемента, например сжигается ${}_{92}U^{235}$, воспроизводится ${}_{92}U^{233}$; в другом — воспроизводимое и сжигаемое топливо являются изотопами различных химических элементов, например сжигается ${}_{92}U^{235}$, воспроизводится ${}_{94}Pu^{239}$.

СОДЕРЖАНИЕ

II ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

III ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ